

KfK 5156
Februar 1993

Realisierung eines Fertigungssystems zum Gußputzen mit aufgabenorientierter Programmierung

J. Isele
Institut für Angewandte Informatik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Angewandte Informatik

KfK 5156

**Realisierung eines
Fertigungssystems
zum Gußputzen
mit aufgabenorientierter
Programmierung**

J. Isele

**Von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe genehmigte Dissertation**

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Realisierung eines Fertigungssystems zum Gußputzen mit aufgabenorientierter Programmierung

Inhaltsangabe

Gußputzen gilt als eine dringend verbesserungsbedürftige Arbeit. Manipulatoren, Werkzeugmaschinen oder Industrieroboter konnten das manuelle Gußputzen nicht ersetzen. Nur für kleine Gußwerkstücke, in größeren Mengen produziert, lohnen Investitionen in Rohguß-Schleifmaschinen. Für größere Werkstücke, beispielsweise LKW-Achsgehäuse, wurden bisher keine Automatisierungslösungen angeboten.

In der vorgelegten Arbeit wird nach Beobachtung der Gratentstehung und einer Systematik der Gratausprägung ein Konzept für die Problemlösung vorgestellt und diskutiert. Zwei Fragen bilden den Schwerpunkt:

1. Wie lassen sich Geometrieabweichungen kompensieren?
2. Wie läßt sich das Fertigungssystem bedienen und programmieren?

Die Werkstück- und Aufspanntoleranzen müssen erfaßt und ausgeglichen werden. Ein Roboter tastet die Werkstücke mit einem Laserscanner in einer Meßstation ab. Bei der Bearbeitung in der Putzstation führt ein zweiter Industrieroboter das Werkzeug an der gemessenen Kontur entlang. Die 'Nachgiebigkeit' ist eine mittels Pneumatikzylinder gegen einen Anschlag vorgespannte Linearachse. Sie federt bei Überschreitung der zulässigen Bearbeitungskraft ein und hält die Anpresskraft konstant. Erkennt ein Endschalter die Ausweichbewegung, wird der Bahnabschnitt nochmals bearbeitet.

Mit der aufgabenorientierten Programmierung wird das Fertigungssystem in einer Gießerei beherrschbar. Anlagenwissen und technologisches Wissen sind in die Programmierumgebung eingearbeitet. Die Steuerungsprogramme werden aufgebaut, ohne daß sich der Bediener um Details kümmert. Routinetätigkeiten und Sicherheitsverantwortung übernimmt die aufgabenorientierte Programmierung. Die Verständigung zwischen Anlagenbediener und Steuerung erfolgt im Branchenjargon. Geometriedaten werden aufgezeichnet, während der Meßroboter mit Hilfe einer 6-achsigen Sensorkugel, die an die Roboterhand montiert ist, am Grat entlang geführt wird.

Der Hardwareaufbau und der Softwareentwurf für den Prototypen werden sehr ausführlich beschrieben. Von praktischen Erfahrungen mit dem Gußputzsystem wird berichtet, die das Potential der Anlage aufzeigen. Mit einem neuentwickelten Werkzeug wird eine Maschinen-seitenwand in einem Drittel der manuell benötigten Zeit geputzt.

Eine mögliche Systemvariante ist die 'Einroboterlösung'. Aus den Meßwerten von mehreren Werkstücken können die signifikanten Punkte extrahiert werden. Nach einer Lernfrist beschränkt sich die Messung auf diese wenigen Punkte.

Realization of a manufacturing system for fettling with job-orientated-programming

Abstract

Fettling is a job badly in need of improvement. Manipulators, manufacturing machines or robots couldn't replace manual fettling. Only for small iron castings, produced in great numbers, did the investment for grinding machines prove profitable. Until now there was no automated machinery to fettle larger workpieces like for example truck axle boxes.

After considering the origin of flushes and the introduction of flush systematics a solution concept can now be presented and discussed in this thesis. The focus is based on two questions:

1. How can deviations in geometry be compensated?
2. How will the manufacturing system be driven and programmed?

Workpiece tolerance and deviations in clamping have to be registered and equalized. One robot equipped with a laser scanner measures each workpiece in the measuring station. In the fettling cell a second robot leads the grinding tool along the measured path. In the 'compliant device' a linear axis is pneumatically pressed against a stop. The axis moves back and the machining force stays constant when grinding force becomes higher than pre-stress. The movement is detected by a switch and the piece of the path is fettled again if necessary.

The job-orientated-programming makes the manufacturing system controllable in the foundry. System knowledge and technological know how is embedded in the programming environment. Instruction lists for the control instruments are composed without the operators need for concern about details. Routine jobs and responsibility for security are taken over by the job-orientated-programming. Conversation between operator and machine is carried out in the foundry jargon. The geometry is recorded when the measurement robot is let along the flush by a 6-axis sensorball mounted in the robots hand.

The prototype's hardware construction and software design is described in great detail. The practical experience with the manufacturing system is reported and shows the systems potentials. A machine housing is fettled in a third of the necessary time for manual grinding with a newly developed tool.

A possible system variant is the 'one-robot-solution'. Significant points are filtered out of the recorded measuring data of several castings. Only the remaining coordinates have to be measured after a learning period.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik beim Gußputzen	6
2.1	Manuelles Gußputzen	6
2.2	Gußputzen mit Manipulatoren	8
2.3	Automatisches Gußputzen	9
2.4	Entgraten	13
3	Gratsystematik	15
3.1	Gratformen	15
3.1.1	Gießsystem	15
3.1.2	'Geplanter Putzaufwand'	17
3.1.3	'Ungeplanter Putzaufwand'	19
3.2	Andere Unterscheidungsmerkmale	20
4	Konzept für die Problemlösung	22
5	Diskussion des Lösungskonzeptes	25
5.1	Geometrieabweichungen	25
5.2	Programmierung	30
5.3	Die Rolle des Menschen	37
5.4	Unternehmensziele	38
6	Hardware Systembausteine	39
6.1	Übersicht	39
6.2	Werkstück Transportsystem	40
6.3	Werkzeugsystem	41
6.3.1	Werkzeug	41
6.3.2	Werkzeugantrieb	44
6.3.3	Werkzeugwechsel	45
6.3.4	Werkzeug Sensorik	46
6.3.5	Nachgiebigkeit	47
6.4	Geometriesensor	50
6.5	Handhabungsmaschinen	52
6.5.1	Meßmaschine	52
6.5.2	Bearbeitungsmaschine	53
6.6	Steuerungen	55
6.7	Zellenrechner und Kommunikation	55
6.8	Weitere Komponenten	56

7	Software-Realisierung	58
7.1	Ablaufsteuerung	58
7.2	Aufgabenorientierte Programmierung	62
7.2.1	Einlernen und Bearbeiten eines Putzbahnelementes	62
7.2.2	Einlernen und Abarbeiten eines Meßbahnelementes	69
7.2.3	Übertragen von Meßergebnissen	71
7.2.4	Datenreduktion und Koordinatentransformation	73
7.3	Softwarebausteine	75
7.3.1	Mensch-Maschine-Schnittstelle	75
7.3.2	Grafik	77
7.3.3	Bahnverwaltung	79
7.3.4	Editierfunktionen	81
8	Erfahrungen mit dem Prototyp	87
8.1	Erste Ergebnisse mit dem Fertigungssystem	88
8.2	Programmierkomfort	90
8.3	Beispiele für Putzergebnisse	93
8.4	Verbesserungsvorschläge	99
8.5	Erweiterte Aufgabenstellung	101
9	Systemvarianten	103
9.1	'Einroboterlösung'	103
9.2	Gußputzen mit Werkstückhandhabung	106
9.3	Entgraten, Kleben, Bahnschweißen etc.	108
10	Zusammenfassung	109
11	Literatur	112

Abkürzungen und Begriffe

ASEA	Firmenname
AST	Firmenname
BE	Bahnelement
CAD	Computer Aided Design
CIB	Computer Integrated Business
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
DNC	Direct Numerical Control
DOS	Disk Operating System
EGA	Enhanced Graphics Adapter
IBM	Firmenname
IR	Industrieroboter
LAN	Local Area Network
Meß-PC	PC mit Schnittstellen zum Meßroboter
MMI	Man Machine Interface
NC	Numerical Control
PC	Personal Computer
PHG	Programmierhandgerät
Putz-PC	PC mit Schnittstellen zum Bearbeitungsroboter
Scan	Menge der an einem Meßpunkt abgetasteten Daten
Server	PC im Rechnernetz, der gemeinsamen Massenspeicher zur Verfügung stellt
TCP	Tool Center Point
Teach-PC	PC für die Bedienoberfläche der aufgabenorientierten Programmierung
VGA	Video Graphics Adapter
3COM	Firmenname
3+OPEN	Netzwerktreiber für LAN

1 Einleitung

Von Arbeitswissenschaftlern wird das Gußputzen zu den sieben höchstbelastenden Tätigkeiten gerechnet. Gießereifachleute sehen 50% ihrer Mitarbeiter [WOLFF 87] in der Gußputzerei. Bild 1 zeigt das Ergebnis einer 1989 durchgeführten Expertenbefragung. Das Gußputzen ist das am dringlichsten zu lösende Problem im Gießereibereich.

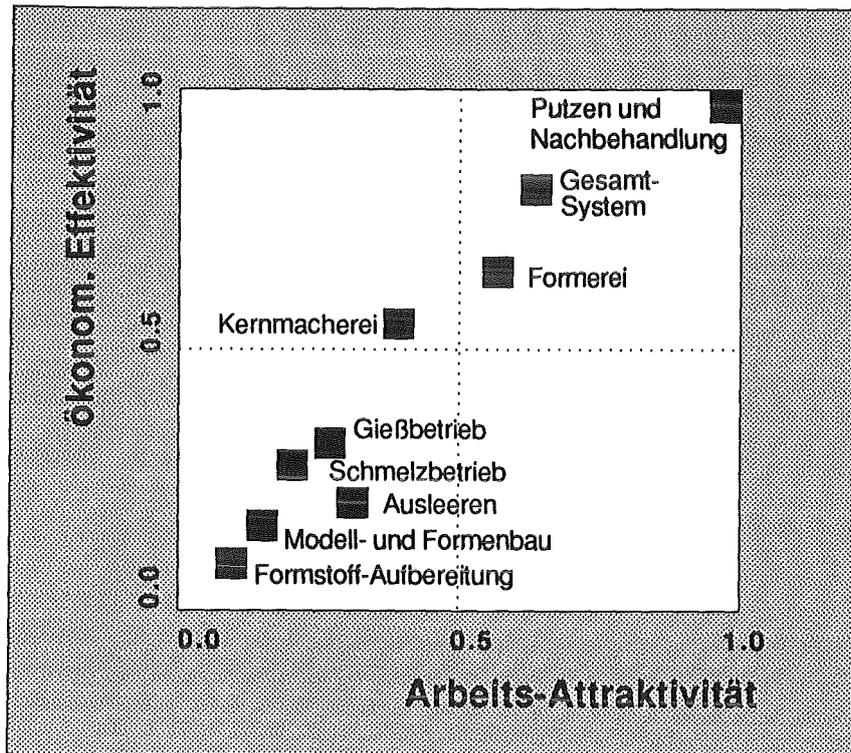


Bild 1 FuE-Potentiale zukünftiger Arbeitssystemgestaltung in Gießereien (Expertenbefragung 1989) [ZANGEMEISTER 90]

Schmutz, Lärm und Unfallgefahr müssen gemindert werden. Der aus der Putzerei stammende Lohnkostenanteil an Gußwerkstücken muß gesenkt werden. Bei Gußeisen mit Lamellengraphit entfallen 30% der Fertigungszeit auf das Gußputzen [WECK 86a]. Der hohe Krankenstand (ca. 15%) und die Fluktuation müssen abgebaut werden. 30000 Menschen arbeiten in Gußputzereien der alten Bundesrepublik. Diese Zahl ist groß genug, um sich des Themas anzunehmen.

Was aber bedeutet Gußputzen? Nach Riege [SPUR 81] bestehen die Aufgaben einer Gußputzerei "im Beseitigen der anhaftenden Formstoffe und der eingeschlossenen Kerne, im Entfernen der form- und gießtechnisch bedingten Verstärkung und Zusätze, sowie der Form- und Gießfehler". Ferner wird üblicherweise die Wärmebehandlung, die

Qualitätskontrolle, eventuell die Lackiererei und der Versand der Gußnachbehandlung und damit der Gußputzerei zugeschlagen.

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet: "Im Gegensatz zur herkömmlichen Werkstückbearbeitung, bei der eine vorgegebene Werkstückkontur erzeugt wird, besteht beim Gußputzen die Aufgabe darin, einer vorhandenen Werkstückkontur zu folgen und dabei Anschnittsysteme und Grate zu entfernen" [WECK 86b].

Die erste Definition ist zu weit gefaßt. Sie ist von Organisationsstrukturen in Gießereien geprägt. Die zweite Definition aus Sicht des Zerspanners ist eng. Dabei kann übersehen werden, daß oft Strahlmittel in Kammern des Werkstücks zurückbleibt, oder daß der Sand nicht vollständig ausgeleert ist. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen gilt im weiteren die zweite Definition.

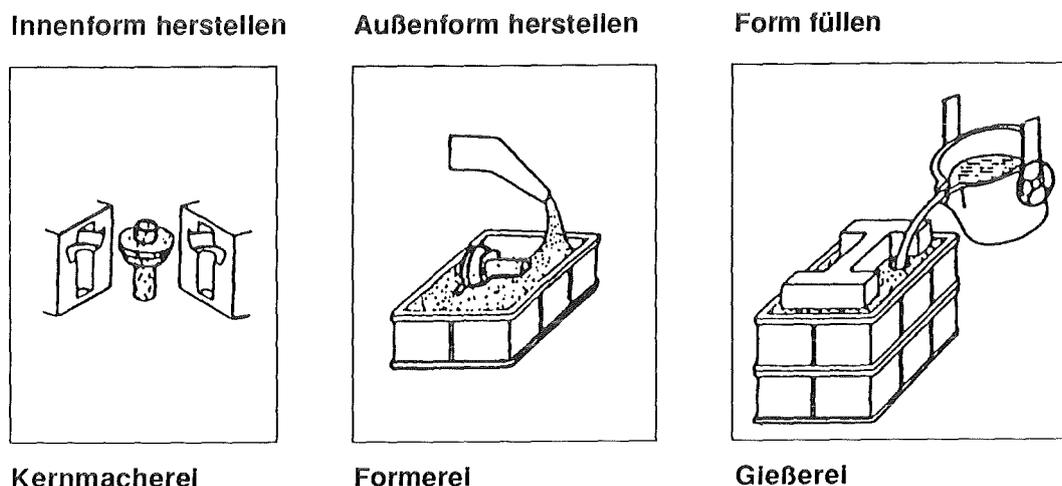


Bild 2 Der Fertigungsprozeß beim Formgießen

Die Sand-Gußherstellung wird anhand von **Bild 2** kurz erläutert. Kerne aus Sand formen die Gußwerkstücke im Innern. Sie können nur durch Zerstörung entfernt werden. Die Formhälften stellen ein Negativ der Werkstückaußenform dar. Die Kerne werden in die Form eingelegt. Beim Gießen werden die Hohlräume zwischen Form und Kern mit verflüssigtem Werkstoff gefüllt. Gußwerkstoffe können sein: Eisen, Stahl, Leichtmetalle, Kunststoffe, Wachs, etc. Das Gußputzen beginnt nach dem Abkühlen und Erstarren der Werkstücke und vollzieht sich in vier Stufen gemäß **Bild 3**. Das Auskernen und Strahlen ist weitgehend automatisiert. Handarbeit beim Auskernen ist nur bei ungünstigen Werkstücken erforderlich. Im Arbeitsgang Trennen werden große Teile überflüssigen Metalls abgeschlagen bzw. abgetrennt. Was die vorangegangenen Arbeitsgänge nicht geschafft haben, muß beim Putzen entfernt werden.

Existieren Alternativen zum Gußputzen? Werden Gußteile nicht sowieso mechanisch bearbeitet? Kann das Gußputzen nicht dabei miteinbezogen werden? Könnten nicht Maßnahmen

in der Kernmacherei und der Formerei das Gußputzen überflüssig machen? Es gibt keine eindeutigen Antworten auf diese Fragen.

In vielen Fällen könnte durch die Entfeinerung [VDG440; VDG441] schon sehr viel erreicht werden. Eine genaue Beschreibung der erwarteten Qualität existiert meist nicht. Oft ist eine Beschreibung nur Makulatur, weil die Gußputzer sie nicht kennen, oder weil sie von den Produktionsleuten nicht anerkannt wird. Aber auch dort, wo die Kommunikation funktioniert, muß weiterhin geputzt werden. Gießereien, die ausschließlich für den firmeneigenen Bedarf fertigen, sind dafür ein Beispiel und Beweis.

Durch Primärmaßnahmen kann der Putzaufwand erheblich gesenkt werden. Gerade im Bereich der Kerne kann sehr viel getan werden. Zusammengebaute Kerne können geschlichtet werden, um Stoßfugen zu füllen. Andere Binder können die Festigkeit der Kerne erhöhen. Aber auch solche Maßnahmen kosten Geld und sie machen die Gußputzerei nicht überflüssig. Denn (nur) 50% der Putzaufwendungen sind vermeidbar [GÄRTNER 88].

Gußputzen mit mechanischer Endbearbeitung in einer Aufspannung wäre ein logischer Ansatz. Selbst Betriebe, die Fertigteile ausliefern, gehen diesen Weg nicht. Im Bereich der Spannstellen können keine Grate zugelassen werden. Dünne Grate sind bei Eisenguß sehr hart und können Werkzeuge zerstören. Nur wenige Gußteile werden auf der gesamten Oberfläche bearbeitet. Teure Maschinen müßten weitere Aufgaben übernehmen. Aufgaben, die sie heute nicht erfüllen können. Werkzeugmaschinen arbeiten auf Endmaß; hier ist ein Maß relativ zur Werkstückoberfläche gefordert.

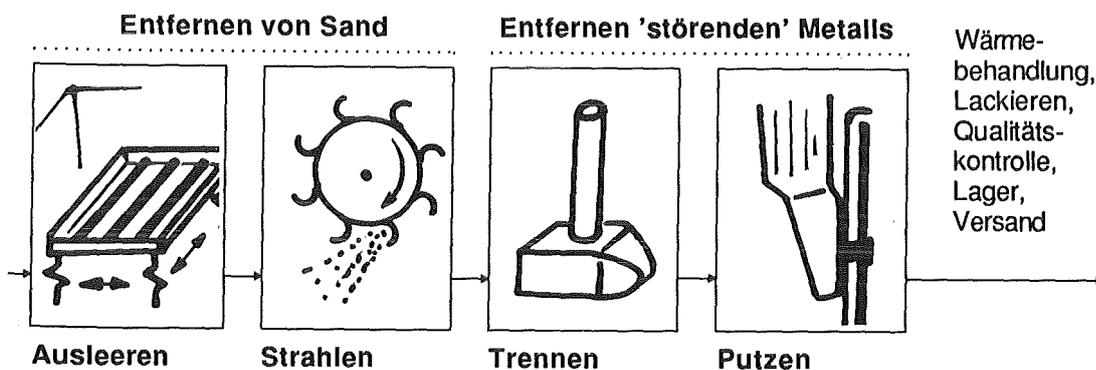


Bild 3 'Die Putzstationen'

Die Notwendigkeit Guß zu putzen bleibt bestehen. Eine Automatisierung ist vom Standpunkt der Humanisierung und der Wirtschaftlichkeit ein erstrebenswertes Ziel.

Bisherige Automatisierungsansätze konzentrierten sich auf kleine Werkstücke (< 50 kg), oder technische Details, wie Werkzeuge oder Sensorik. Die Rahmenbedingungen unter denen diese Arbeit entstand erlaubten einen 'top down' Ansatz, bei dem der Systemgedanke im Mittelpunkt steht. Das Projekt war längerfristig angelegt (ca. 5 Jahre) und finanziell

großzügig ausgestattet. Vor diesem Hintergrund wurde das Entwicklungsziel sehr hoch gesteckt. Die angestrebte Lösung sollte:

- aus käuflichen Komponenten bestehen,
- als Prototyp realisiert werden,
- auch bei kleinen Losgrößen (ca. 20 Stück) einsetzbar sein,
- schon bei geringen Stückzahlen (< 1000 Stück/Jahr) rentabel sein,
- mit einer überschaubaren und leicht verständlichen Bedienoberfläche ausgestattet sein,
- ein Baukastensystem bilden, mit dessen Hilfe schnell neue und spezielle Lösungen geschaffen werden können und
- in einer Gießerei eingesetzt werden.

Bild 4 zeigt einen ungeputzten Vertreter des Musterwerkstücks, das der Entwicklung und Auslegung des Prototyps des Fertigungssystems zum Gußputzen mit aufgabenorientierter Programmierung zugrundegelegt wurde. Derartige Achsgehäuse werden in Land- und Bau-
maschinen eingesetzt.

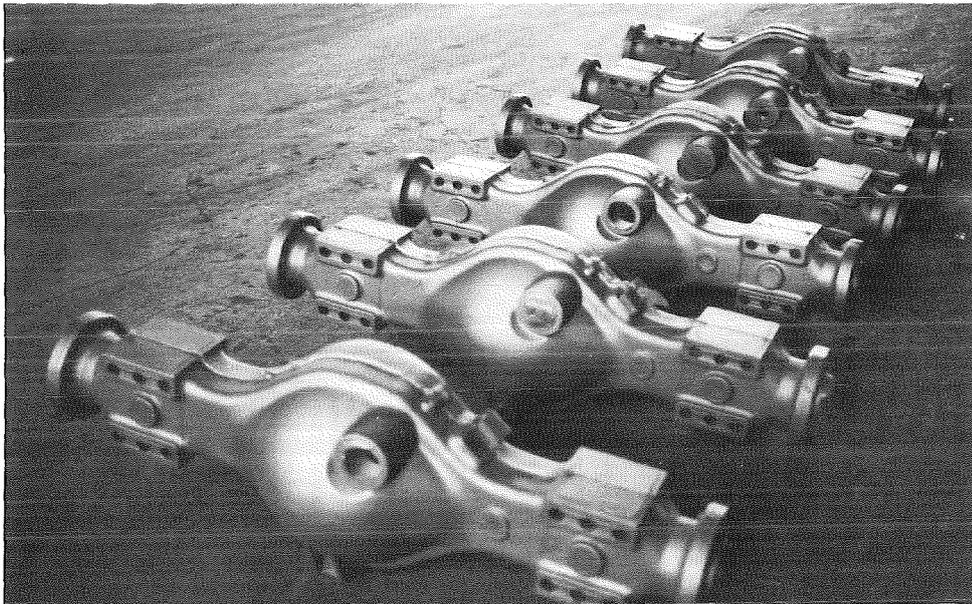


Bild 4 Musterwerkstücke

Die Gießerei, aus der das Musterwerkstück stammt, lagert über 100 verschiedene Achsgehäuse-Modellplatten. **Bild 5** enthält einige Zahlen zu dem Musterwerkstück.

Der ebene Teilungsgrat und die Kerngrate bilden etwa 13 m Liniengrat. Das Werkstück hat vier großflächige ebene Kühleisengrater im Bereich der Federauflagefläche und einige kleinere gekrümmte Kühleisenflächengrater. Manuell werden die Werkstücke mit einem Schruppschleifwinkelschleifer und Schleifstiften verschiedener Größe auf Geradschleifern geputzt.

Werkstoff		GGG-50
Fertiggewicht Einsatzgewicht		223 kg 350 kg
Abmessungen	Länge max. Durchmesser	1580 mm 500 mm
Länge des Liniengrates		ca. 13 m
Vorgabezeiten	Trennen Putzen Kernfertigung	25 min 75 min 47 min
Stückzahlen Losgrößen		< 1000 St/a 10..40 St

Bild 5 Einige Zahlen zum Musterwerkstück [S&S]

Das Musterwerkstück wird mit Kühlleisen im Kern gegossen. Die dort entstehenden Grate werden ausgeklammert. Sie werden weiterhin manuell beseitigt, weil sie nur sehr schwer zugänglich sind. Ein manueller Putzplatz bleibt wegen des ungeplanten Putzaufwands auf lange Sicht unumgänglich. Dort wird das Innenputzen vom Menschen mit übernommen.

In der vorliegenden Arbeit werden die verschiedenen Grattypen analysiert. Darauf bauen die Anforderungen an ein Fertigungssystem zum Gußputzen auf. Das Lösungskonzept nimmt die Randbedingungen einer Kundengießerei auf. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Systembeschreibung, gegliedert in die Hard- und Softwarekomponenten. Der anschließende Erfahrungsbericht beschreibt den Stand der Entwicklung des Prototyps und zeigt Entwicklungsmöglichkeiten auf.

2 Stand der Technik beim Gußputzen

Trotz zahlreicher Versuche den Arbeitsplatz des Gußputzers mit:

- Werkzeugmaschinen,
- Industrierobotern,
- Manipulatoren oder
- Sondermaschinen

zu rationalisieren und humaner zu gestalten, werden heute die Mehrzahl der gegossenen Werkstücke manuell geputzt.

2.1 Manuelles Gußputzen

Nur drastische Worte können einen zutreffenden Eindruck vermitteln. Die Arbeitsplätze sehen oft aus wie Werkstätten unter Tage: dunkel, laut, staubig, schmutzig und gefährlich.

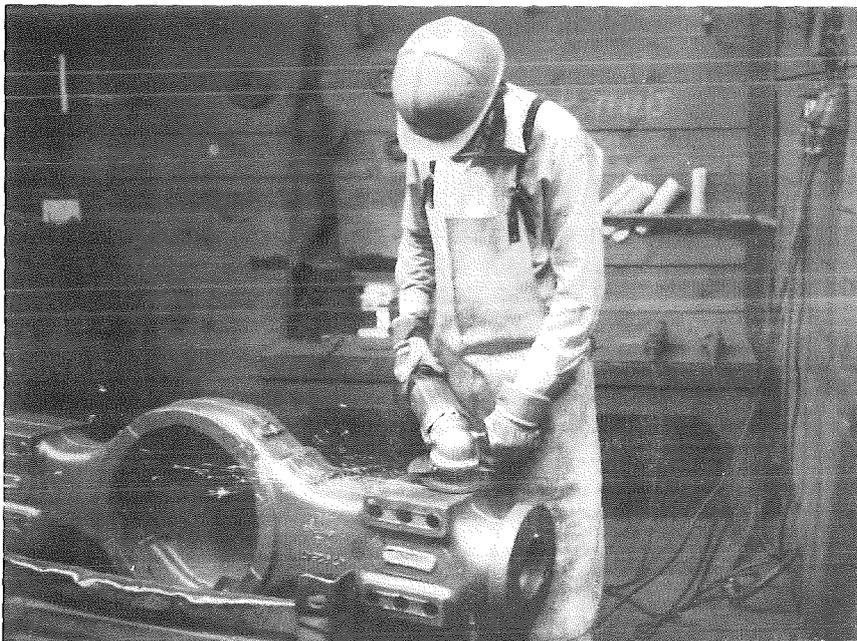


Bild 6 Gußputzarbeitsplatz

Bild 6 zeigt einen Arbeitsplatz für Großgußteile. Die Ausrüstung des Werkers besteht aus:

- einer ca. 3x3 m² großen Fläche,
- einer Trennwand aus Holzdielen auf drei Seiten,
- einem Ablagetisch für die Werkzeuge,
- einer Transportkiste (im Beispiel) als Werkstückablage,
- einem Säulenschwenkkran zur Handhabung der Werkstücke (nicht sichtbar),

- Hammer und Meißel,
- einem Winkelschleifer,
- drei unterschiedlichen Geradschleifern und
- Druckluft zum Ausblasen der Werkstücke.

Einige Betriebseinrichtungen werden für alle Arbeitsplätze gemeinsam bereitgestellt:

- ein Hochfrequenzstromnetz,
- Druckluft zum Blasen und als Antriebsenergie für Spezialwerkzeuge,
- eine Absauganlage und
- Gabelstapler zum An- und Abtransport der Werkstücke.

Die Werker schützen sich gegen die Umwelteinflüsse mit:

- Helm,
- Gehörschutz,
- Schutzbrille,
- Mundschutz,
- Ledermantel,
- Handschuhen und
- Sicherheitsschuhen.

Bei Kleinteilen ist der Materialfluß besser organisiert. Mit Hilfseinrichtungen werden die Transportbehälter in eine günstige Entnahmehöhe gebracht.

Bei leicht zu handhabenden Werkstücken, aber z.B. auch bei großen Traktorzylinderblöcken kann man eine arbeitsteilige Arbeitsorganisation vorfinden. Beim Musterwerkstück werden an einem Arbeitsplatz die Speiser abgetrennt und erst an einem zweiten Platz wird geputzt.

Abhängig vom Werkstückgewicht werden Gußteile entweder an stationären Maschinen mit Handwerkzeugen oder abwechselnd in Werkzeug- und Werkstückhandhabung geputzt. Grauguß ist der dominante Gußwerkstoff. Die Gußputzer nutzen seine Sprödigkeit. Ein großer Teil der Putzarbeit wird mit dem Hammer erledigt. Andere Werkstoffe und die Graugußrestgrate werden mit Schleifscheiben und Schleifstiften bearbeitet.

Handgeführte Werkzeuge haben Druckluft oder Hochfrequenzantriebe. Die Leistungsgrenze liegt bei drei Kilowatt. Stationäre Werkzeuge erreichen um den Faktor 10 höhere Leistungen. Sogenannte Pendelschleifmaschinen sind große Schleifmaschinen, die mit einem Seil aufgehängt sind. Große Leistung und gute Beweglichkeit sollen vereint werden. Sie haben sich nicht durchgesetzt. Die Handhabung der Werkstücke wird zu aufwendig, weil nur Grat erreichbar ist, der nach oben zeigt. Die Werkstückseiten können nicht bearbeitet werden.

2.2 Gußputzen mit Manipulatoren

Manipulatoren, wie in **Bild 7** zu sehen, werden in Gießereien in größeren Stückzahlen zur Werkstückhandhabung eingesetzt. Die Bediener entwickeln ein erstaunliches Geschick, auch kleinere Teile nach dem Auspacken vom schwingenden Rüttelrost aufzunehmen. Die Geräte sind robust aufgebaut. Sie ähneln in Aussehen und Technik einem kleinen Bagger.

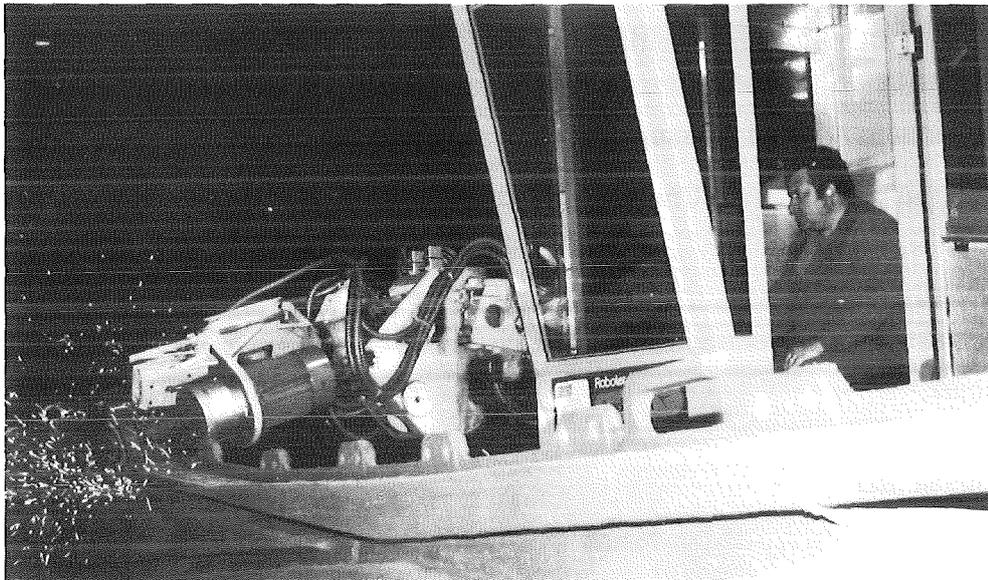


Bild 7 Manipulator beim Gußputzen (Quelle AST)

Solche Maschinen werden zum Gußputzen eingesetzt [AMBOS 90, WANINGER 87, RIEGE 84]. Sie bieten:

- hohe Werkzeugantriebsleistung,
- hohe Abtragsleistung,
- großen Arbeitsraum,
- Kraftreflexion und
- einfache Bedienung.

Im Unterschied zu Baggern lassen sich Manipulatoren über einen Masterarm steuern, der alle Bewegungsmöglichkeiten in einem Bedienelement vereint. Durch die Kraftreflexion spürt der Bediener die Kraft, mit der er z.B. auf die Werkstückoberfläche aufdrückt. Die Bedienung erfordert keine theoretischen Vorkenntnisse, sondern praktische Übung.

Ein erfolgreicher Einsatz ist das Verschleifen von Kaplansturbinenblättern [MICHELBERGER 90]. Die Turbinenschaufeln werden in rostfreiem Stahl in Einzelanfertigung gegossen. Sie werden in der Gießerei auf Endmaß geschliffen, was hier zehntel Millimeter bedeutet. Der Kostenanteil der Handschleifarbeit am Verkaufspreis liegt oft bei 30 bis 50%. Bei Stahlguß verzundert die gesamte Oberfläche. Deshalb wird in drei Stufen gearbeitet. Im ersten Schritt wird die Zunderschicht abgeschliffen. Das Gußstück wird prüffähig gemacht. Beim anschließenden Vermessen wird das Aufmaß auf dem Werkstück

notiert und danach wieder geschliffen. Der Feinschliff erfolgt zuletzt ohne Manipulator in Handarbeit, denn der Manipulatorbediener sitzt einige Meter von der Wirkstelle des Werkzeuges entfernt und kann daher nur sehr schwer Millimeterbruchteile auflösen. Die Sichtbedingungen sind zu schlecht. Im angesprochenen Einsatzfall wird angestrebt, den letzten Schritt auf einer CNC-Fräsmaschine auszuführen. In der gleichen Gießerei werden auch Pelton- und Francislaufräder gegossen. Dort bietet es sich an, eine CNC-Maschine für eine Schaufel zu programmieren und das Programm für die anderen, identischen Schaufeln am Laufrad zu nutzen.

Die weitere Verbreitung von Manipulatoren wird gehemmt durch:

- die erforderliche Mindestgröße der Werkstücke,
- die schlechten Sichtbedingungen,
- den Aufwand für die Peripherie (z.B. Drehtische) und durch
- fehlende Systemkomponenten (z.B. Werkzeugwechselsysteme).

Neben Manipulatoren für die Werkzeughandhabung werden auch Geräte für die Werkstückhandhabung während des manuellen Putzens angeboten. Auch darin liegt ein Rationalisierungs- und Humanisierungspotential beim Putzen größerer Werkstücke. Diese Manipulatoren leiden unter Akzeptanzproblemen. Unter Akkordlohnbedingungen werden von den Betroffenen längerfristig einsetzende Gesundheitsschäden leichter akzeptiert als Nebenzeiten zur Manipulatorbedienung.

2.3 Automatisiertes Gußputzen

Rotationssymmetrische Teile wie Bremsscheiben oder Flansche lassen sich mit **Sondermaschinen** automatisch putzen [*SPUR 81*]. Auch für andere Massenteile lassen sich Transferstraßen aufbauen, mit denen ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden kann [*HONSEL 89*]. Viele Getriebegehäuse oder Zylinderblöcke haben einige Seitenflächen, wo Planschleifmaschinen effizient nutzbar sind. Die Flexibilität solcher Anlagen ist jedoch gering.

Der erste **Industrieroboter** wurde Anfang der 60er Jahre an einer Druckgußmaschine bei den Fordwerken eingesetzt [*KÄMPFER 84*]. 1977 waren in der BRD 541 Industrieroboter im Einsatz. Davon arbeiteten etwa 100 Geräte an Druck- und Spritzgußmaschinen. Diese Zahl war größer als die Zahl der danach in der Statistik lange führenden Punktschweißroboter. Die Gießereien nahmen eine Vorreiterrolle ein.

1978 fanden die ersten Gußputzversuche in einer Gießerei der BRD statt [*BOLLE 80, BOLLE 81*]. Aus diesen Versuchen muß die Lehre gezogen werden, das Putzen mit Schleifstiften den Menschen zu überlassen. Die 80/20-Regel besagt, daß 80% der Leistung mit 20% an Aufwand erreichbar sind. Bei dem Versuch, das Werkstück fertigzuputzen,

wurde keine Zeitersparnis gegenüber dem manuellen Putzen erzielt. Die Ergebnisse, dieses geförderten Vorhabens, veranlaßten eine weitere Gießerei 1982 umfangreiche Versuche zu unternehmen [TACKE 84]. In beiden Fällen wurde ein ASEA-Roboter mit 60 kg Traglast eingesetzt. Bild 8 ist einem Prospekt entnommen, mit dem damals geworben wurde. Mit einem Kraftsensor sollte eine adaptive Regelung realisiert werden, um Werkstücktoleranzen und Werkzeugverschleiß zu kompensieren. Der Roboter der zweiten Versuchsserie wurde enttäuscht an den Hersteller zurückgegeben. Heute ist nur ein Einsatzfall bekannt, bei dem ein Werker die Werkstücke robotergerecht vorputzt und taktgebunden in die Anlage einlegt [RIEGE 88]. Das Wort 'Roboter' wirkt wie ein Reizwort auf die Gießer.

Die Forschung setzte weiter auf Sensoren, weil ein passiver Toleranzausgleich mit nachgiebigen Elementen zwischen Werkstück und Roboter nur unter idealisierten Bedingungen funktionierte [ABELE 83]. Große Hoffnungen wurden auf kraft- statt lagegeregelt Industrierooter gesetzt [STEPIEN 87, HIRZINGER 85]. Auch der Versuch, das Wissen zum Gußputzen in ein Computerprogramm aufzunehmen, um die Verfahrensauswahl zu optimieren [STURZ 86] schaffte nicht den Durchbruch.

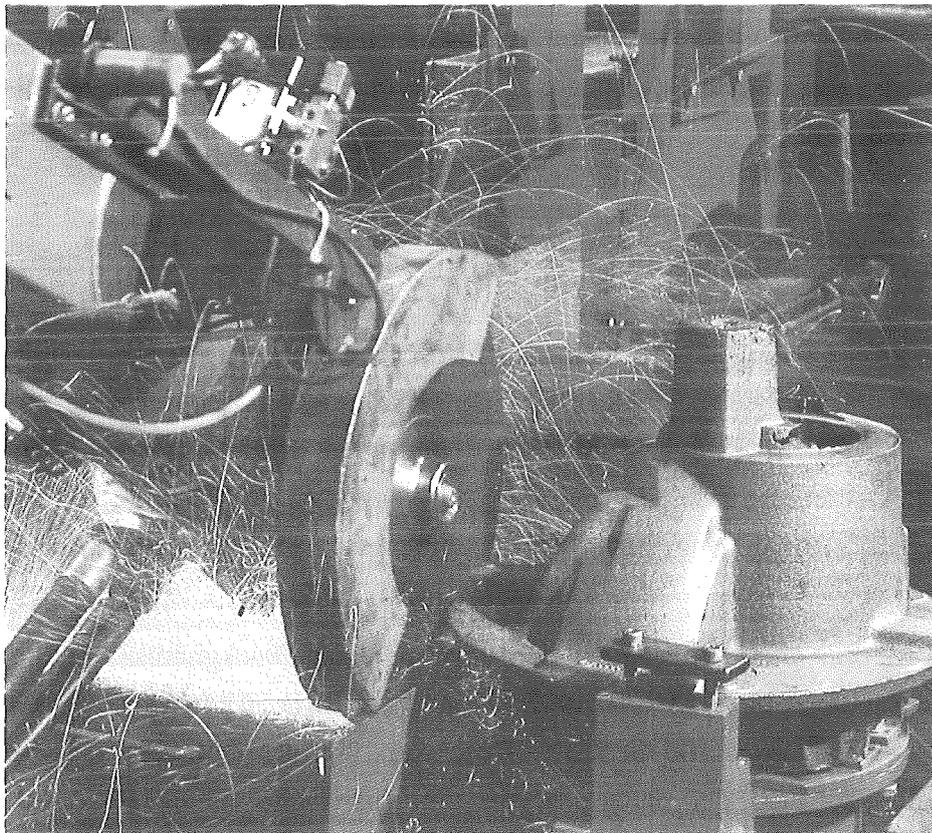


Bild 8 Aus einem Roboterprospekt (Quelle: ASEA)

Aus Schweden wurde über einen industriellen Einsatzfall berichtet, bei dem gemeißelt wurde. Dort wurde jährlich die Hand des Roboters ausgewechselt [HÖPF 87]. Aus Norwegen kommt ein neuer Ansatz eines Roboterherstellers. Der eingesetzte Roboter ist im

Vergleich zum Eigengewicht besonders steif. Es existiert ein Präprozessor, der für Schiffspropeller aus einem CAD-Modell ein Bearbeitungsprogramm erzeugt. Die Steuerung verfügt über Optionen zur Vorschubregelung in Abhängigkeit vom aufgenommenen Strom des Werkzeuges und zur Schleifscheibenverschleißkompensation.

In Belgien wurde von einem Systemhaus eine Lösung angeboten. Dabei wurden kleinere Gußteile in einer Presse vorentgratet, um die Werkstücke reproduzierbar spannen zu können. Danach wurde der Grat abgeschliffen, ohne das Programm zu korrigieren. Der Schleifscheibenverschleiß wurde durch eine Linearachse in der stationären Schleifmaschine automatisch kompensiert [TECNOMATIX 88].

In Japan wurden - mit öffentlichen Mitteln gefördert - von mehreren Firmen Lösungen zum Gußputzen mit Robotern erarbeitet, die sich ebenfalls international nicht durchsetzen konnten. Eine interessante Entwicklung aus diesem Projekt ist eine Schleifscheibe, in die ein elektrisch leitfähiger Draht eingepreßt ist (s. Bild 9). Bei Berührung des Drahtes mit dem Grat wird ein elektrischer Kurzschluß erzeugt. Bei bekannter Winkelgeschwindigkeit läßt sich die Gratbreite mit der Kurzschlußdauer bestimmen.

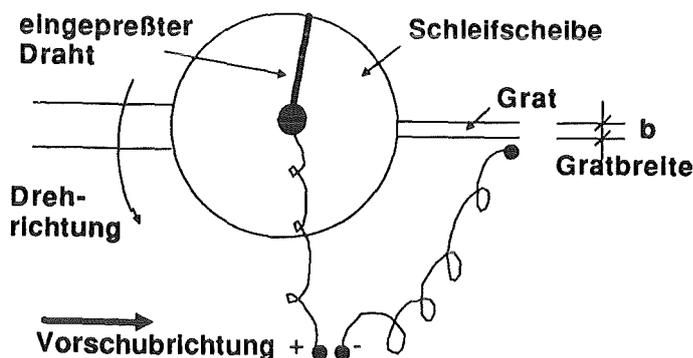


Bild 9 'Gratbreitensensor'

Derartige Sensorlösungen finden sich auch in der BRD [WECK 86b]. Ein interessanter Ansatz zum Auffinden der Werkstückoberfläche besteht darin, zwei Scheibenfräser mit unterschiedlicher Zähnezahl einzusetzen. Der erste Fräser soll den Grat abtragen. Der zweite Fräser soll nur in Eingriff kommen, wenn der Grat verschwunden ist. Dieser Moment läßt sich durch eine Frequenzauswertung des Körperschalls oder des Drehmomentes feststellen. Mit sogenannten 'schnellen Achsen' in der Hand des Roboters, die frei sind von Verzögerungszeiten der Robotersteuerung und der Roboterkinematik, lassen sich funktionierende Regelkreise aufbauen [ROGOS 90].

Steifer als übliche Industrieroboter ist eine Gußputzmaschine aufgebaut, die weite Verbreitung gefunden hat [FELDT 88, LANGE 88]. Maschinenbaulich handelt es sich bei der im

Bild 10 im Ausschnitt gezeigten Maschine um eine **Werkzeugmaschine**. Sie ist mit einer NC-Steuerung ausgerüstet, die auch einen einfachen Roboter steuern könnte. Auf der Werkzeugspindel sind zwei Schleifscheiben angebracht. Die Spindel kann radial in der Schleifscheibenebene verstellt werden. In der Ebene senkrecht dazu kann das Werkstück frei positioniert werden. Ein Rotationsfreiheitsgrad erlaubt eine Drehung des Werkstücks. Über einen Körperschallsensor wird die Berührung der Schleifscheibe mit dem Werkstück erkannt. Der Schleifscheibenverschleiß läßt sich über eine Zustellung der 1. Achse ausgleichen, sofern nur an einem Punkt des Schleifscheibenumfangs geputzt wird. Durch das Erta-
sten kann auch die Werkstücktoleranz teilweise kompensiert werden. Ein großes Problem dieses Systems ist die NC-Programmierung. Den Gießereien fehlt die Erfahrung auf diesem Gebiet und oft fehlen die Stückzahlen, die den Programmieraufwand rechtfertigen.

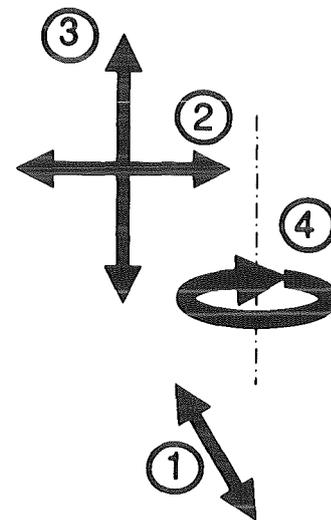
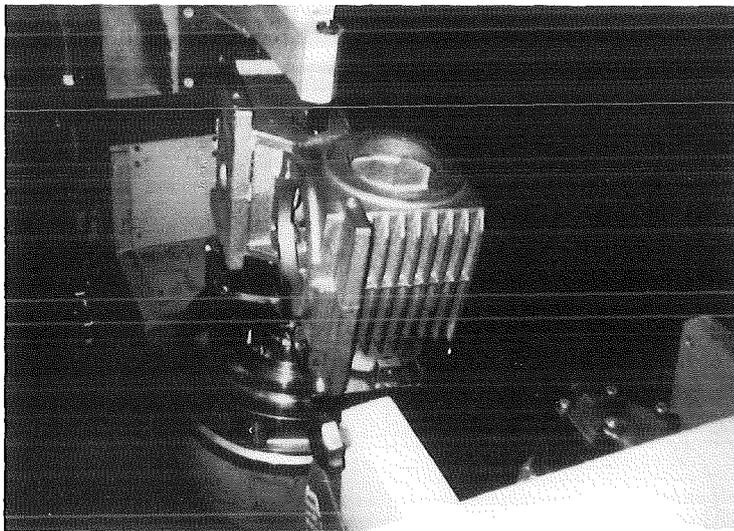


Bild 10 Gußputzmaschine mit 4 Freiheitsgraden (Robamat, Quelle: MAN roland)

Eine ähnlich steif aufgebaute Maschine wurde schon auf der Gießereifachmesse '79 vorgestellt [BASS 80]. Mit dieser Maschine wurde gefräst und genibbelt. Sie wurde nicht weiterentwickelt.

Mit Ausnahme der Sondermaschinen scheitern bzw. leiden automatische Lösungen an:

- dem Fehlen an NC-Programmierern in Gießereien,
- fehlender Infrastruktur und daraus resultierenden hohen Einstiegskosten z.B. für die Aufspannvorrichtungen,
- mangelnde Allgemeinheit der Sensorlösung,
- unklaren Qualitätsvorgaben und manchmal an
- Berührungsängsten der Verantwortlichen.

2.4 Entgraten

Entgrataufgaben sind meist dadurch gekennzeichnet, daß

- die Wirkstelle in einer ausreichend bekannten Ebene liegt und
- die Grate gleichmäßig sind.

Unter Entgraten wird ferner das Entfernen von Sekundärgraten, die bei anderen Bearbeitungsverfahren entstehen, verstanden. Diese Technik ist inzwischen weit entwickelt [SCHNEIDER 88, FÖHN 87]. In Bild 11 sind zwei Roboter zu sehen, die an stationären Werkzeugen Gehäuse Teile entgraten.

Es gibt eine Gießerei in den Niederlanden, in der vier Roboter Eisenguß entgraten. Diese Gießerei produziert sehr viele Aufsatzroste für Gasherde. Die Gußstücke sind vergleichsweise leicht und haben große Abmessungen (bis ca. 300 x 600 mm²). Das Verhältnis Gratlänge zu Werkstückgewicht ist überdurchschnittlich hoch. Die optische Qualität ist entscheidend. Der Erfolg bei diesem Einsatzfall gründet auf der Vereinfachung des Gußputzproblems. Mit modernster Formtechnik wird hochwertiger Guß mit sehr geringen Graten (Grathöhe, Gratbreite ≤ 1 mm) produziert. Diese Teile werden vom Anlagenbediener manuell für den Roboter vorbereitet. Hartmetallfrässtifte in Hochfrequenzfrässpindeln und Schleifscheiben werden als Werkzeuge eingesetzt. Zum Toleranzausgleich werden die Maschinen elastisch gelagert. Es wird mit Anpreßdruck gefräst und geschliffen. Dies ist die Strategie bei allen 'Entgratzellen'.

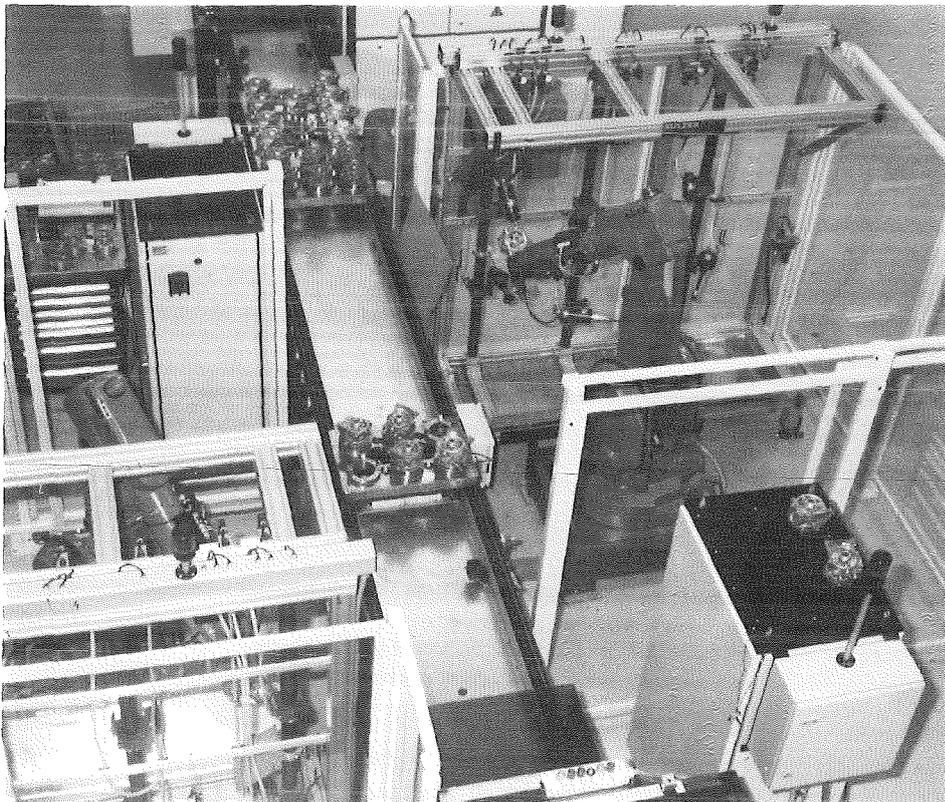


Bild 11 'Entgratzentrum' aus Baukastensystem (Quelle: Sulzer robot systems)

Die Programmierzeiten für solche Anwendungen sind sehr hoch. In 260 Stunden können 5 Meter Grat eingelernt werden [KLUMPP 87]. In einigen Arbeiten wurde gezeigt, daß sich Roboter ihren Weg selbst suchen können, wenn die Richtung vorgegeben wird [PRITSCHOW 89, SCHULZ 88]. Mit derartigen Hilfsmitteln läßt sich der Einlernprozeß in Zukunft stark beschleunigen.

Ein flexibles Fertigungssystem zum Gußputzen muß mit einer Verschiebung der Wirkstellen in beliebiger Richtung und mit unregelmäßigen Graten zurechtkommen. Ferner müssen flächige Grate abgetragen werden können. Dazu ist die Technik mit elastischen Elementen ungeeignet [ABELE 83].

Bevor ein Konzept entwickelt werden kann, das die Probleme früherer Lösungsansätze überwinden kann, werden die Grate näher analysiert, denn sie sind die Ursache für den in der Putzerei zu treibenden Aufwand.

3 Gratsystematik

Gußgrate sind in ihrer Ausprägung ein Zufallsprodukt, da die Gratausprägung von Werkstück zu Werkstück variiert:

- in der Grathöhe,
- in der Gratbreite,
- in der Form des Gratquerschnitts,
- in der Gratform in Gratlängsrichtung und
- im Gratvolumen.

Abhängig von der Gratenstehung ergibt sich eine Systematik. Die Gratenstehung erlaubt abzuschätzen, in welchen Grenzen sich der Grat an einer bestimmten Stelle ausprägen kann.

Unterschiedliche Grate erfordern unterschiedliche Putzstrategien. Aufgabenorientierte Programmierung bedeutet, daß die Bedienoberfläche des Fertigungssystems zum Gußputzen auf diese Unterschiede eingeht und gleichzeitig die Gemeinsamkeiten ausnutzt.

3.1 Gratformen

An einem Werkstück müssen im allgemeinen drei Klassen von Objekten entfernt werden:

- Das Gießsystem wird abgeschlagen oder abgetrennt.
- Der Teil der Grate, deren Entstehungsort und Erscheinungsbild vorhersehbar ist, verursacht den 'geplanten Putzaufwand'.
- Zufällig entstehende Grate erzwingen den 'ungeplanten Putzaufwand'.

3.1.1 Gießsystem

Die Gießtechnologie erfordert:

- einen Einguß,
- einen Lauf,
- einen Anschnitt,
- Luftpfeifen,
- Kühleisen und
- einen oder mehrere Speiser.

Durch den trichterförmigen **Einguß** wird das flüssige Metall eingegossen und über den **Lauf** im Formkasten verteilt. Durch den schmalen **Anschnitt** fließt das Metall in die Form. Die verdrängte Luft entweicht durch die **Luftpfeifen**. Die **Speiser** dienen als Depots, aus

denen beim Erstarren des Werkstücks flüssiges Material nachfließen kann. Dieses Gießsystem macht bisweilen 40% des Einsatzgewichtes eines Werkstücks aus, abhängig von Werkstoff, Speisertechnologie und Qualitätsanforderungen an das Gefüge [S&S]. Gießtechnologisch gehören hierher auch **Kühleisen**. Gußputztechnologisch sind Kühleisen unter dem 'geplanten Putzaufwand' einzuordnen.

Häufig verlieren Gußstücke beim Auspacken aus der Form Teile ihres Gießsystems, zumal meist Sollbruchstellen vorgesehen sind. Oft ist dem Gußputzen ein Arbeitsgang vorgelegt, bei dem die Läufe und Speiser mit Brechkeilen, Vorschlaghämmern oder anderen Werkzeugen entfernt werden. In anderen Fällen erfordert das Abtrennen des Gießsystems 25% der gesamten Putzzeit [S&S]. In fast allen Fällen verbleiben Reste am Werkstück, die unerwünscht sind und beseitigt werden müssen. Der Gußputzaufwand hängt von der Qualität des Trennvorgangs ab.

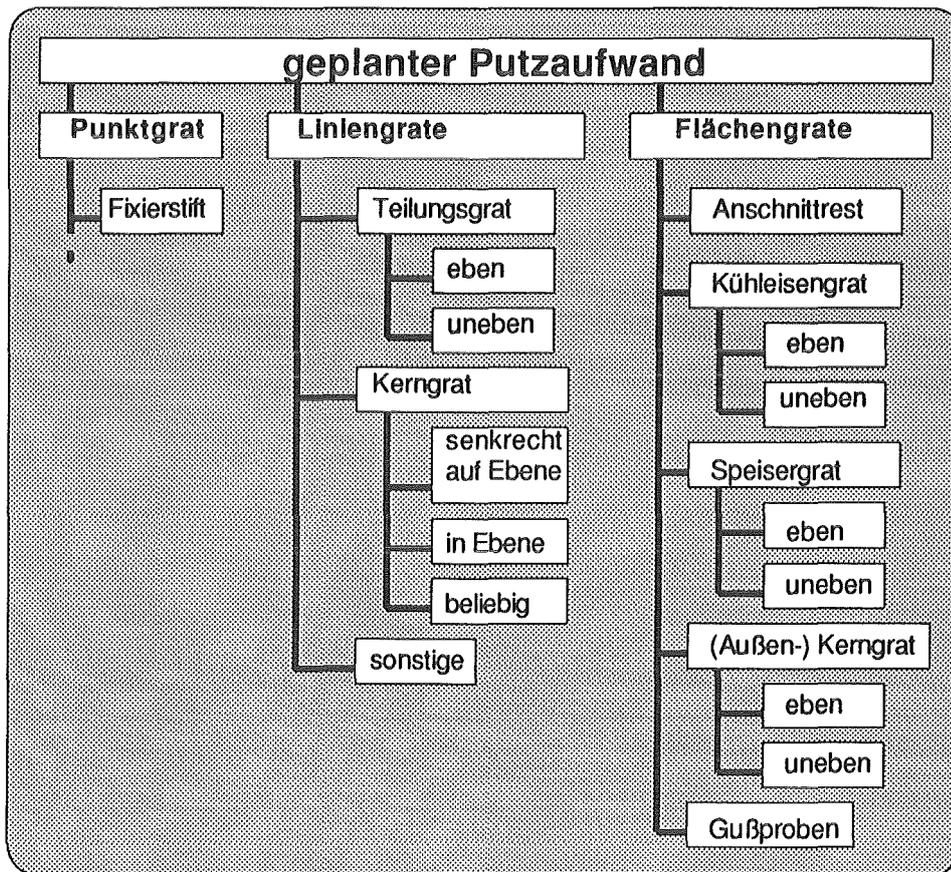
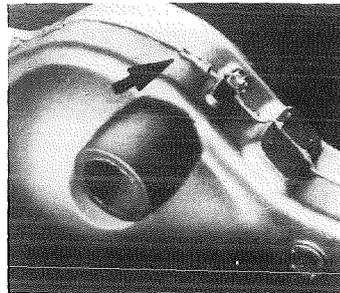
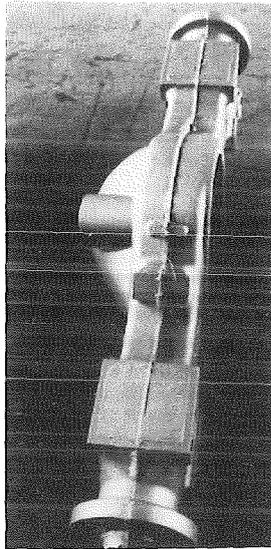


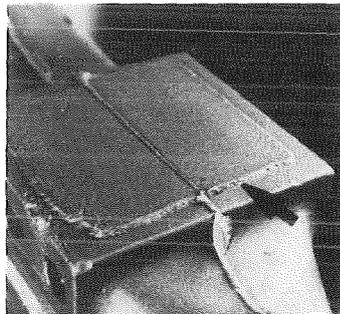
Bild 12 Systematik des 'geplanten Putzaufwands'

3.1.2 'Geplanter Putzaufwand'

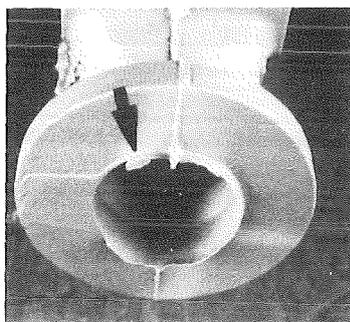
Der Begriff 'geplanter Putzaufwand' ist unglücklich. Gemeint sind damit alle Grate, die reproduzierbar auftreten, d.h. alle Grate, die an die Form gebunden und unvermeidbar sind. **Bild 12** gibt dazu einen Überblick.



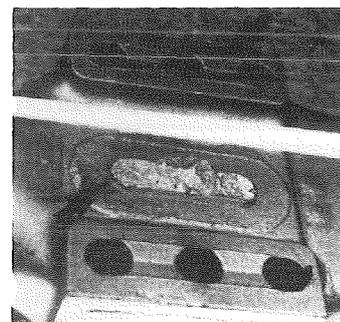
Anschnittgrat



**Kühleisengrat
flächiger Kerngrat**



linienförmiger Kerngrat



Speisergrat

Bild 13 Beispiele für Flächengrate

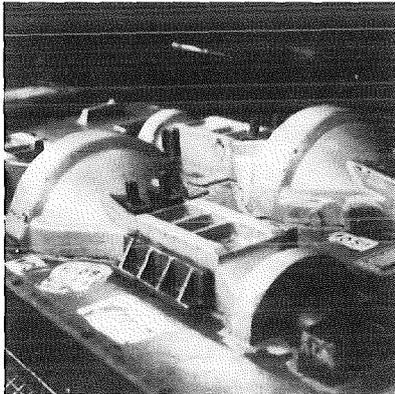
Flächengrate entstehen dort, wo getrennt werden mußte (Anschnittrest, Speisergrat, Gußprobe) und überall dort, wo die Gußoberfläche nicht von der Form direkt gebildet wurde (Kühleisengrat, (Außen-)Kerngrat). **Bild 13** zeigt Beispiele für Flächengrate. **Kühleisen** sind gegossene Formteile, die in die Sandform integriert werden. Sie dienen als Kristallisationskeime. Mit Kühleisen und Speisern kann die Erstarrungsrichtung der Form gesteuert werden. Kühleisen werden auf der Modellplatte fixiert und verbleiben im Sand

beim Abziehen des Modells. Ein Fehler entsteht durch Formfehler der Kühlleisen oder dadurch, daß das Kühlleisen beim Befüllen und Verdichten der Form nicht am Modell anliegt.

Kerne werden im Werkstückinnern, aber auch für Hinterschneidungen oder besondere Anschnittsysteme benötigt. Kerne werden in die Form in sogenannte Kernlager oder Kernmarken eingelegt. Die größte Fehlerquelle ist hier eine falsche Lagerluft, also eine falsche Passung zwischen Form und Kern. Eine zu enge Passung bedeutet einen Defekt der Form durch Sandausbrüche bei der Montage. Eine sehr weite Lagerluft erlaubt Verschiebungen zwischen Form und Kern und formt ein Kernblech. An dem Beispiel wird deutlich, daß Gußgrate tatsächlich (in Grenzen) reproduzierbar sind.

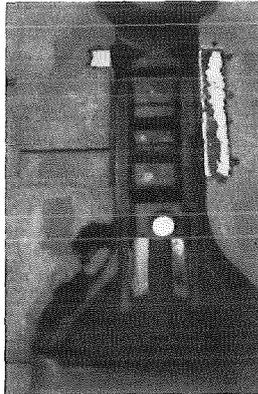
Punktgrate sind meist Teil eines Kühlleisengrates. **Bild 14** verdeutlicht ihre Entstehung. Die Fixierung des Kühlleisens auf der Modellplatte geschieht über Stifte, die kleine Löcher in der Form hinterlassen.

Modellplatte



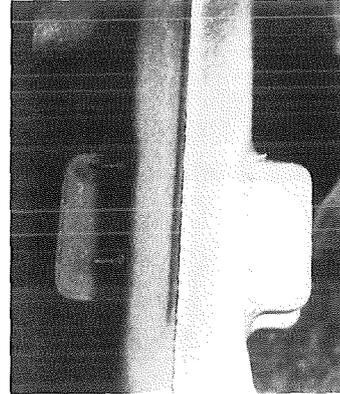
Fixierstifte

Form



Löcher

Werkstück



'Punktgrat'

Bild 14 Punktgrat: Modellplatte und gegossenes Werkstück

Liniengrate gliedern sich in zwei Hauptgruppen. Die **Teilungsräte** entstehen dort, wo die Formhälften aufeinanderstoßen. Bei eben geteilten Modellen liegt der gesamte Teilungsgrat in einer Ebene. In vielen anderen Fällen liegt der Teilungsgrat immerhin stückweise in verschiedenen Ebenen. Linienförmige **Kerngrate** werden durch das Material gebildet, das in das Kernlager hineinfließt. Während Außenkerne meist auch mit Flächenversätzen einhergehen, wird die Lageabweichung eines Innenkerns zur Form beim Gußputzen nicht berücksichtigt. Linienförmige Kerngrate stehen senkrecht auf einer Ebene, oder sie liegen in einer Ebene.

In vielen Fällen 'degenerieren' Flächengrate zu Liniengraten. Oft kommt es nur darauf an, Kanten zu verrunden. Der Flächenversatz kann bestehen bleiben, weil er im nachfolgenden Bearbeitungsschritt problemlos beseitigt wird. Besonders bei Kühlleisengraten ist dies oft der Fall, weil Kühlleisen häufig an Bearbeitungsflächen angebracht werden, die blasenfrei bzw. dicht sein müssen.

3.1.3 'Ungeplanter Putzaufwand'

Ein nicht vernachlässigbarer Teil der Putzzeit wird zum Entfernen des 'ungeplanten Putzaufwands' eingesetzt. Bild 15 zeigt die Systematik des 'ungeplanten Putzaufwands'.

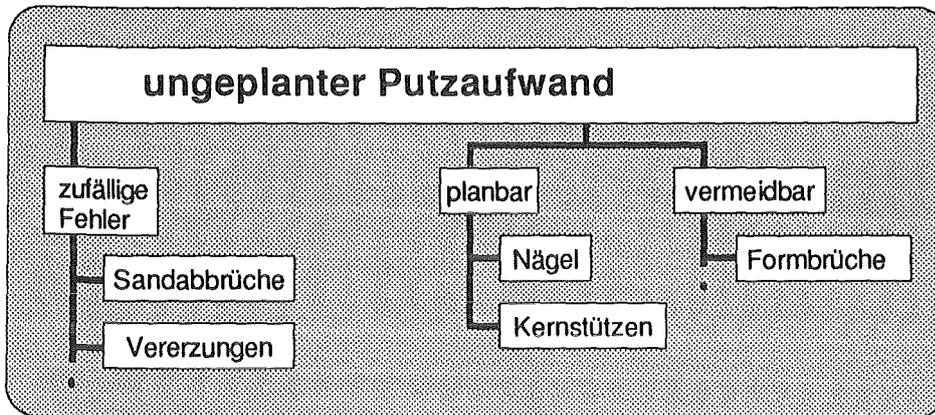
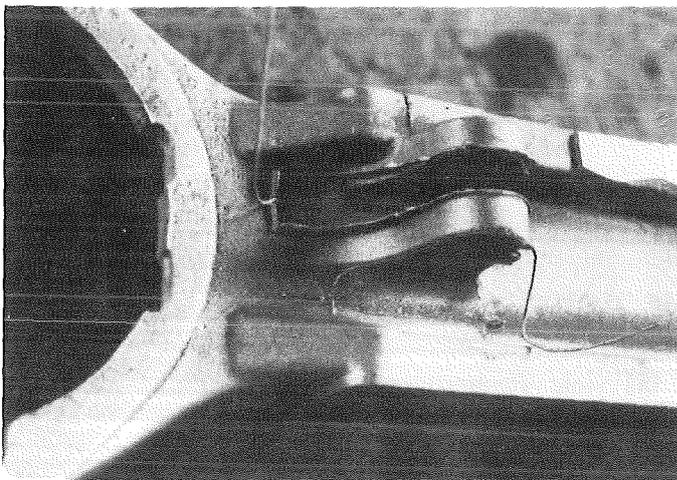
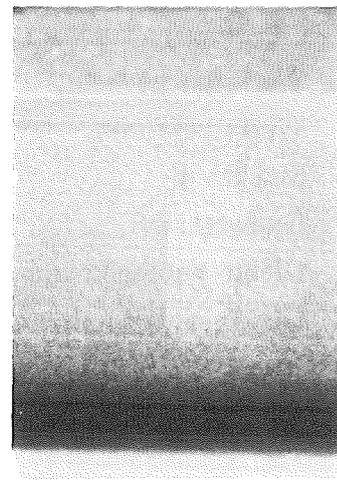


Bild 15 Systematik des 'ungeplanten Putzaufwands'



Nägel



Kernstützen

Bild 16 Die Spuren von Kernstützen und Nägeln

Planbarer Putzaufwand bedeutet, daß die Grate an die Form gebunden werden können, falls dies erforderlich wird. Bei größeren Kernen müssen oft sogenannte **Kernstützen** (s. Bild 16) verwendet werden, die zwischen Kern und Außenform eingeklemmt sind. Sie bewahren die Kerne vor Bruch, verhindern ein Aufschwimmen während des Formfüllvorganges und definieren letztlich die Wandstärke. Sie drücken sich jedoch im Sand ab und hinterlassen Spuren. In vielen Fällen werden die Kernstützen mehr oder minder zufällig plaziert. Oft werden sie mit **Drahtnägeln** fixiert, mit denen manchmal auch die Kerne gestützt werden. Hier läßt sich der Zufall leicht ausschalten. Dasselbe gilt für Luftpfeifen.

Vermeidbarer Putzaufwand entsteht, wenn Prozeßgrößen schwanken, wenn beispielsweise die Sandaufbereitung keine gleichbleibende Qualität liefern kann. Zu große Lagerluft ist vermeidbar. Formbrüche sind mitunter vermeidbar, wenn andere Sandsysteme eingesetzt werden. Das Putzen im Innern wird minimiert, wenn die Qualität der Kerne optimiert wird. Dies ist ein weites Feld. Letztendlich muß die Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen gesehen werden. Bei Sandsystemen geht der Umweltgedanke ein. Altsande einiger Anlagen müssen als Sondermüll entsorgt werden. Ganz wesentlich ist der Gesichtspunkt, daß viele Parameter nur durch Versuche eingestellt werden können, und daß es meist entscheidend darauf ankommt, wann ein Werkstück gegossen wird, bzw. wie lange die Vorlaufzeit dauert. - Bei Großserien rechtfertigt sich immer ein weit größerer Optimierungsaufwand.

Zufällige Fehler treten in jedem Prozeß auf. Beim Formen brechen häufig Sandkanten. An der Bruchstelle entsteht ein Grat, das Werkstück wird ausgebeult, während im Formboden durch den losen Sand eine unsaubere Oberfläche entsteht.

3.2 Andere Unterscheidungsmerkmale

Für das Gußputzen sind außerdem die folgenden Systematisierungsmerkmale interessant:

- Werkstückgewicht,
- Werkstückform,
- Stückzahl,
- Gußwerkstoff,
- Gießtechnologie, und
- Gußabnehmer.

Das **Werkstückgewicht** (1 Gramm bis viele Tonnen) entscheidet über die Werkstück-/Werkzeughandhabung.

Die **Werkstückformen** lassen sich schwer fassen. Die Gießtechnologie läßt den Konstrukteuren viele Freiheiten. Entsprechend unterschiedlich sind die Werkstücke. Bei manchen Teilen liegen alle Grate in einer Ebene und sind leicht zugänglich. Für andere Teile trifft das Gegenteil zu. Mit wenigen Schlagworten läßt sich die Geometrie nicht klassifizieren. Bei einer Teilefamilienbildung ist zu beachten, daß Gewicht und Außenabmessungen der Werkstücke wichtigere Kriterien sind, als die Funktion des Endproduktes.

Im Hinblick auf die Automatisierungsbemühungen ist die produzierte **Stückzahl** meist das wichtigste Unterscheidungsmerkmal. Die Gießtechnologie deckt den gesamten Bereich von der Einzelteilerfertigung bis zur Großserie ab.

Mit der eindeutigen Rangfolge der **Werkstoffe** in **Bild 17** gemessen am jährlichen (1987) Produktionsvolumen läßt sich eine entsprechende Rangfolge der wichtigsten **Gießtechnologien** aufstellen.

Gußeisen mit Lamellengraphit	2 169 000 t		Sandguß
Gußeisen mit Kugelgraphit	742 000 t		Druckguß
Aluminiumguß - Druckguß -	231 800 t		
Stahlguß	185 000 t		Kokillenguß
Aluminiumguß - Kokillenguß -	143 900 t		
Temperguß	119 000 t		

Bild 17 Rangfolge der Gußwerkstoffe und der Gießtechnologien [VDG 89]

Für das Gußputzen ergeben sich zwei Schwerpunkte. Leichtmetall Druck- und Kokillenguß kann zu einer Gruppe zusammengefaßt werden. Die Formen sind aus festem Material hergestellt. Kanten sind ausgeprägt. Grate sind in der Regel dünn und niedrig. Das Material ist vergleichsweise leicht zu bearbeiten. Die Gußtoleranzen sind gering (Laut [SPUR 81]: 0,1 ... 0,6%). Das Verfahren wird wegen der Formkosten nur in der Serienfertigung benutzt.

Eisen wird meistens in Sand gegossen. Die Sandbindemittel und die Verdichtungsverfahren sind sehr unterschiedlich. Entsprechend unterschiedlich ist die Qualität der Formen und Kerne und entsprechend ausgeprägt die Gratbildung. Dünne Eisengußgrate sind aufgrund der Erstarrungsbedingungen extrem hart. In Sand können auch kleine Serien und Einzelstücke wirtschaftlich gegossen werden. Die Gußtoleranzen sind erheblich (Laut [SPUR 81]: 1,5 ... 5%).

Der Gußabnehmer ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Während die eine Gruppe der Gießereien für das eigene Haus mitunter am gleichen Standort produziert, besteht die zweite Gruppe aus Kundengießereien. Es existieren keine allgemeinen Qualitätsnormen für das Gußputzergebnis. Daher sind die Kundenvorgaben meist unscharf. In der Tendenz sind die Anforderungen an Kundengießereien höher. Hausgießereien verfügen über bessere Kommunikationsmöglichkeiten. Die Entfeinerung, d.h. die Beschränkung des Gußputzaufwands auf das nötige Maß, ist dort weiter fortgeschritten.

Gußwerkstücke aus sprödem Grauguß, bei denen Toleranzen in der Restgrathöhe von über einem Millimeter zulässig sind, können mit anderen Werkzeugen gröber und damit schneller bearbeitet werden als Werkstücke aus schwer zerspanbaren Materialien, die rundum konturbündig geputzt werden müssen. Auch die letztgenannten Kriterien müssen demnach in die aufgabenorientierte Programmierung einfließen.

Vor dem Hintergrund dieser Systematik und früherer Lösungsversuche läßt sich ein Lösungskonzept entwickeln.

4 Konzept für die Problemlösung

Nachfolgend wird das Konzept für die Problemlösung vorgestellt, ohne alle Details zu diskutieren.

Die wichtigsten Grundsätze und Ideen bei der Entwicklung des Fertigungssystems zum Gußputzen waren:

- Die Geometrie jedes Werkstückes muß vermessen werden.
- Gemessen wird in einem eigenen Arbeitsschritt, nicht während der Bearbeitung.
- Als Sensor wird ein Laserscanner benutzt, um berührungsfrei zu messen.
- Mit der Messung werden auch große Aufspanntoleranzen kompensiert.
- Beim Putzen wird keine online-Sensorik eingesetzt. Die Kraft wird mittels einer sogenannten Nachgiebigkeit begrenzt.
- Das Einlernen neuer Werkstückprogramme erfolgt an den Maschinen, nicht an einem Simulationssystem.
- Neue Programme werden an einem ungeputzten Werkstück eingelernt.
- Die Bewegungsbahnen werden aufgezeichnet, während die Maschinen mit einem Joystick direkt geführt werden.
- Um die Einhaltung der Sicherheitsmaßnahmen kümmert sich die Steuerung des Fertigungssystems.
- Die Programmorganisation, die Programmlogik und die Parameterwahl sind Aufgaben der Steuerung.
- Bedienereingaben erfolgen über Menüs und Masken.
- Die Bedienoberfläche hat umfangreiche Hilfestellung zu bieten. Dazu gehören auch Grafikfunktionen.
- Die Hardware muß käuflich sein.

Aus den ersten Punkten ergibt sich die in **Bild 18** dargestellte Arbeitsfolge. Für die automatische Bearbeitung müssen die Werkstücke aufgespannt werden. Im ersten Meßschritt wird das Werkstück mit Methoden der Koordinatenmeßtechnik referenziert, falls die Aufspanntoleranzen nicht vernachlässigbar sind. Mit diesen Messungen wird das Werkstückkoordinatensystem festgelegt. Anschließend erfolgt das Trennen der Speiser, beispielsweise mit einem sogenannten hochflexiblen Handhabungsgerät, das automatisch Positionen ungefähr anfährt und nach einer Korrektur durch den Bediener das Automatikprogramm fortsetzt [LAWO 89]. Im folgenden Meßschritt werden die Grate und die Reste des Trennschnittes vermessen. Nach dem Putzen mit der Maschine muß ein Werker den 'ungeplanten Putzaufwand' erledigen. Erst nach der Qualitätskontrolle wird das Werkstück wieder abgespannt.

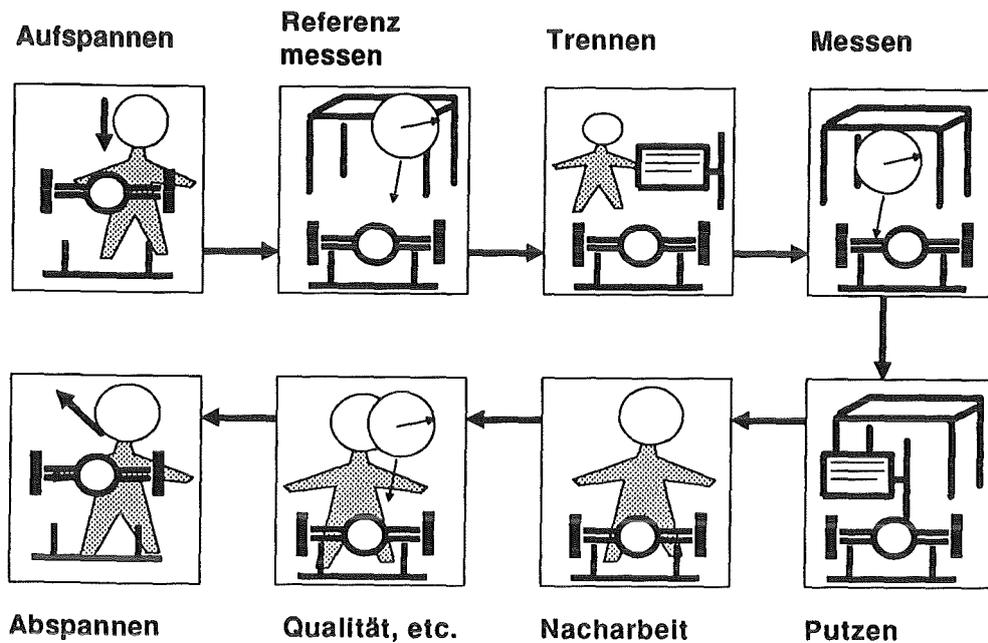


Bild 18 Die Arbeitsfolge im Automatikbetrieb

Eine Verteilung der Aufgaben Messen und Bearbeiten auf zwei Maschinen ergibt einige Vorteile, wenn die Maschinen ausgelastet werden können:

- Die Sensorik kann in einem geschützten Bereich eingesetzt werden.
- Die Vorgänge sind zeitlich entkoppelt. Die Rechenzeit zur Auswertung der Meßergebnisse ist unkritisch.
- Beide Maschinen können für ihre Aufgaben optimiert werden.

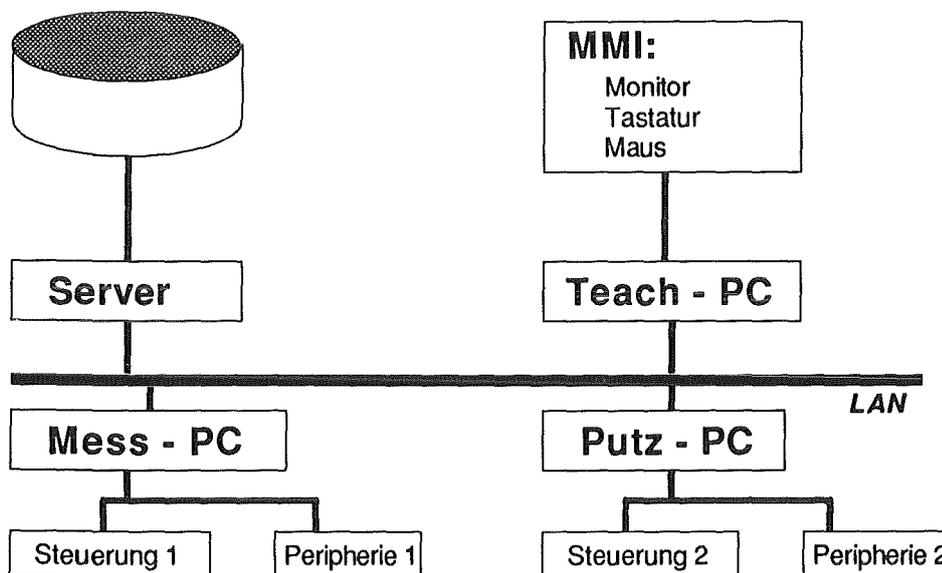


Bild 19 Rechnerhardwarekonzept
(MMI: Man-Machine-Interface; Mensch-Maschine-Schnittstelle
LAN: Local area network; lokales Netzwerk)

Es war eine strategische Entscheidung, als Hardwareplattform für die Softwareentwicklung IBM-kompatible Personalcomputer mit dem DOS-Betriebssystem einzusetzen und diese

wie in **Bild 19** dargestellt zu vernetzen. Die Steuerung und die Peripherie (z.B. der Sensor) der Meßmaschine werden mit dem sogenannten **Meß-PC** verbunden. Analog dazu wird die Steuerung und die Peripherie (z.B. die Druckregelventile für die Nachgiebigkeit) der Bearbeitungsmaschine mit dem **Putz-PC** verbunden. Die Bedienoberfläche, die Mensch-Maschine-Schnittstelle, wird auf dem **Teach-PC** realisiert. Ein Server stellt gemeinsamen Massenspeicher zur Verfügung. Mess-, Putz- und Teach-PC kommunizieren über das lokale Netzwerk und globale Dateien, die vom Server verwaltet werden.

Ein derartiges Rechnernetz läßt sich ohne wesentliche Störung bestehender Teile erweitern. Der Weg zu übergeordneten Systemen, wie einem Fertigungsleitrechner, ist offen.

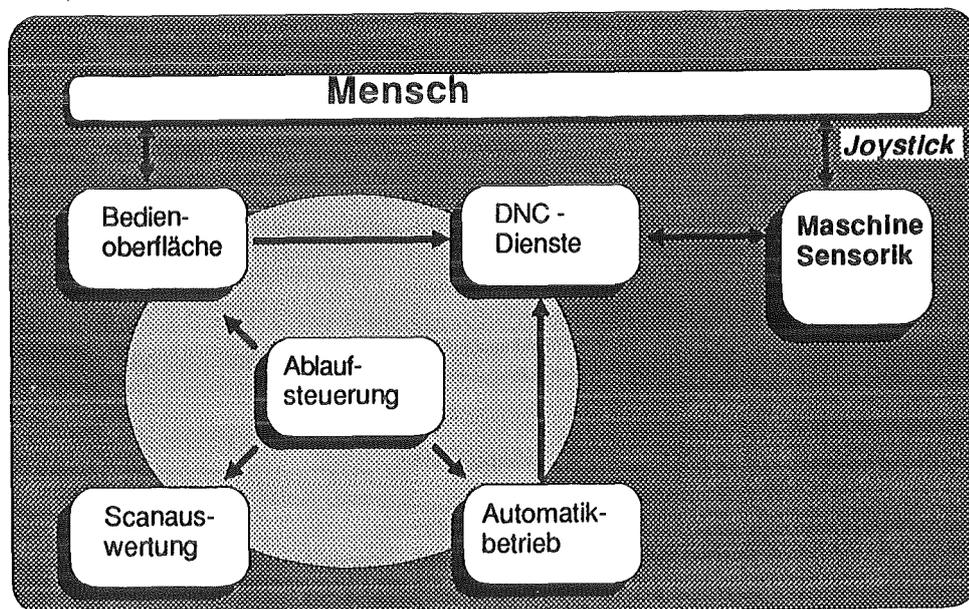


Bild 20 Die Softwarepakete des Fertigungssystems zum Gußputzen (DNC: Direct Numerical Control; Rechnerdirektsteuerung)

Daraus ergibt sich die in **Bild 20** dargestellte Softwarestruktur. Mit der **Ablaufsteuerung** wird ein dezentrales Verwaltungsorgan eingesetzt, das die Aufgaben der verschiedenen Rechner koordiniert. Die **DNC-Dienste** schaffen die Anbindung der Steuerungen und der Sensorik an die übrige Software. Die **Scanauswertung** ist ein selbständiges Programm, das die Sensorwerte interpretiert. Hinter dem Stichwort **Bedienoberfläche** stehen Programme zum Einlernen der Meß- und Putzbahnen, sowie zur Bedienung und zum Einrichten des Fertigungssystems. Der Begriff **Automatikbetrieb** faßt alle Programme für die Steuerung des automatischen Ablaufs und die Übertragung der Meßergebnisse in ein Putzprogramm zusammen.

Im folgenden Kapitel wird das Lösungskonzept diskutiert. Ein Prototyp des Fertigungssystems zum Gußputzen wird beschrieben.

5 Diskussion des Lösungskonzeptes

Das Lösungskonzept wirft einige Fragen auf:

- Wie werden Geometrieabweichungen von Werkzeug und Werkstück kompensiert?
- Wie werden komplizierte Kurvenverläufe auf Werkstücken eingelernt? Wie vollzieht sich die Programmierung von Zusatzinformation?
- Welche Rolle spielt der Menschen in einem Fertigungssystem zum Gußputzen?
- Wie werden Unternehmensziele berührt?

5.1 Geometrieabweichungen

Die Besonderheit des Fertigungsschrittes Gußputzen liegt in den Geometrieabweichungen von Werkzeug und Werkstück. In **Bild 21** sind die Einflußfaktoren aufgelistet.

Für die **Werkstücktoleranzen** des Musterwerkstücks gilt GTA 16 [*DIN 1680.2*]. Bei Nennmaß 1580 mm sind Längenunterschiede von maximal 15.6 mm erlaubt. Hinter dieser Zahl verbirgt sich eine Sicherheitsspanne für die Fertigung und ein systematischer Fehler, der durch Unkorrektheiten der Modelleinrichtung entsteht. Tatsächlich liegt die Maßabweichung beim Musterwerkstück bei 7 mm.

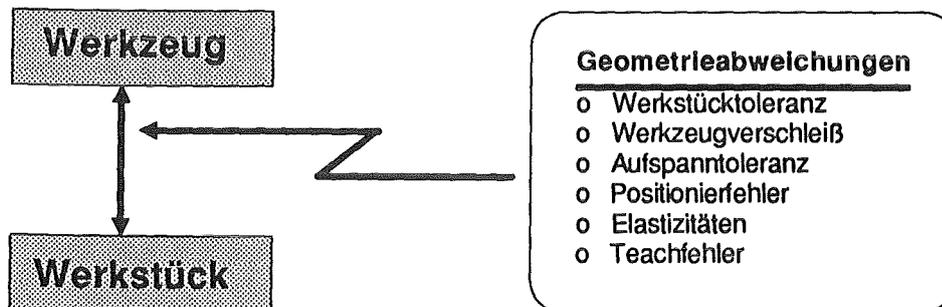


Bild 21 Störgröße des Prozesses: Geometrieabweichungen

Neben verschleißfreien Hämmern werden in Gußputzereien hauptsächlich Schleifscheiben eingesetzt, deren Durchmesser kontinuierlich abnimmt. Der **Werkzeugverschleiß** beträgt mehrere Zentimeter.

Die Höhe der sonstigen Fehler kann vom Gußputzsystem selbst gesteuert werden. Die **Aufspanntoleranz** kann leicht um eine Größenordnung geringer ausfallen als die **Werkstücktoleranz**. Der **Positionierfehler** von Werkzeugmaschinen wird in Mikrometern gemessen. Dasselbe gilt für die Elastizität.

Falsche Geometrieangaben können schon beim Einlernen eingegeben werden. Falsch soll hier nicht als Eingabefehler verstanden sein. Ein **Einlernfehler** könnte beispielsweise auf Differenzen zwischen Werkstück und Zeichnungen zurückzuführen sein. Solche Fehler entstehen zwangsläufig, weil die meisten Zeichnungen am Reißbrett und nicht auf 3D-CAD-Systemen entstehen und von einem Modellschreiner in Handarbeit mit Daumen und Kitt und nicht von einer 5-Achsen Fräsmaschine in ein Modell umgesetzt werden. Ein 3D-CAD-System benötigt eine exakte mathematische Beschreibung jeder einzelnen Fläche. Eine Zeichnung vom Reißbrett muß sich auf einzelne Ansichten und Schnitte beschränken, die Maße wiedergeben, welche für die Funktion des Werkstückes wichtig sind. Einlernfehler treten auf, wenn Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug eingestellt werden muß. Aufgrund schlechter Sichtbedingungen könnte ein Punkt vor dem Kontaktpunkt übernommen werden. Ebenso gut kann der eingelernte Punkt 'unterhalb' der Werkstückoberfläche liegen, wenn die Anpreßkraft nicht berücksichtigt werden kann. Im Extremfall liegt die Toleranz des Werkstücks an dem eingelernt wird am Rande des Toleranzfeldes.

Die geforderte Qualität liegt bei +/- 0,5 mm. Dieses Maß wird in der Praxis nicht benutzt. Dort gelten andere, nur sehr schwer faßbare Kriterien. Die Zahl wurde mit der Gießerei, die das Musterwerkstück herstellt, als Zielgröße ausgehandelt und gilt für das Gußputzsystem.

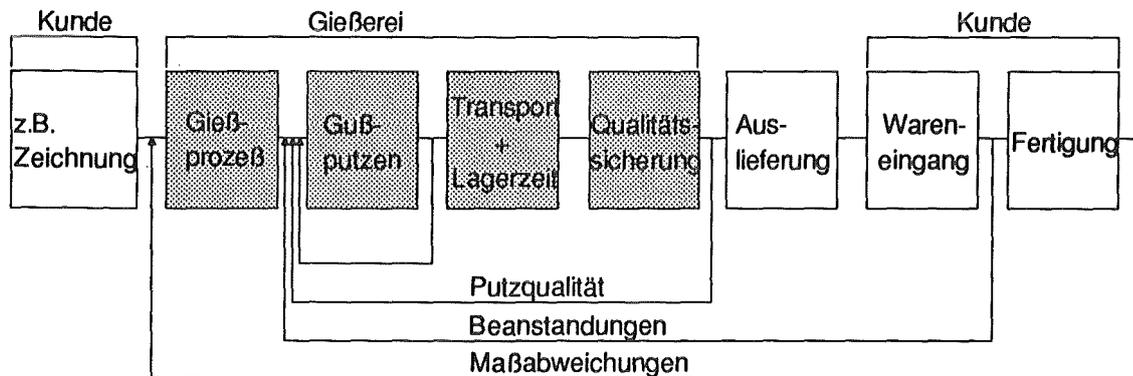


Bild 22 Regelkreis für Putzqualität und Maßhaltigkeit beim manuellen Gußputzen.

Um bei all den genannten Störgrößen ein Toleranzband einhalten zu können, muß ein Regelkreis aufgebaut werden, wie in Bild 22 gezeigt. Dieser Regelkreis hat viele Lücken. Die Maßhaltigkeit wird oft nur am ersten Gußstück überprüft. Unzulässige Maßabweichungen werden erst im weiteren Fertigungsablauf sichtbar. Die Totzeiten sind dann sehr groß. Die Putzqualität wird in der Gießerei kontrolliert, aber auch dort sind die Totzeiten hoch. Unter Akkordlohnbedingungen kann der innerste Regelkreis in der Putzerei nicht optimal funktionieren. Konsequenz daraus ist, daß die interne Qualitätskontrolle häufig ein besseres Putzergebnis verlangt, als vom Kunden gefordert, um Beanstandungen zu vermeiden. Außerdem muß der Kunde Vorsichtsmaßnahmen treffen, um Betriebsstörungen aufgrund zu hoher Maßabweichungen zu verhindern.

Ein automatischer Regelkreis besitzt im Idealfall ein Sensorsystem, das unmittelbar an der Bearbeitungsstelle mißt und die Meßergebnisse ohne Zeitverlust weitergibt. Mit einer hochdynamischen Maschine und kurzen Rechenzeiten in der Steuerung kann dieses System der Gratkontur gut folgen. Dieser Lösungsansatz scheitert bis heute an:

- dem Zeitbedarf für die Datenübertragung,
- dem Zeitbedarf für die Meßwertvorverarbeitung,
- der zu hohen Reaktionszeit der Steuerungen,
- der Maschinendynamik und
- der nach unten begrenzten Mindestvorschubgeschwindigkeit.

Die Vorschubgeschwindigkeit ist nach unten hin durch Erwägungen zur Wirtschaftlichkeit und technologische Aspekte begrenzt. Falls die Grate abgeschliffen werden, muß eine Mindestgeschwindigkeit (ca. 250 mm/sec) erreicht werden, um eine Werkstoffüberhitzung und damit Blaufärbung zu vermeiden. Diese Geschwindigkeit wird auch mit voreilenden Sensoren nicht erreicht, die fest mit dem Werkzeug verbunden sind, aber weit vor der Bearbeitungswirkstelle messen, um Reaktionszeit zu gewinnen. Obwohl die für das verbreitete Bahnschweißen entwickelte Technik lange bekannt ist, wird sie auch dort kaum eingesetzt.

Der Ansatz die Systemdynamik mit zusätzlich zwischen Maschine und Werkzeug angebrachten kurzhubigen schnellen Achsen zu erhöhen, setzt voraus, daß die Maßabweichungen gering sind und sich zumindest in einer Richtung vernachlässigen lassen. Probleme ergeben sich bei großen Winkeländerungen der Kontur. Der apparative Aufwand dabei darf nicht unterschätzt werden.

Bild 23 veranschaulicht, wie der Mensch den Schleifprozeß kontrolliert. Der Mensch verfügt über einen höchst dynamischen Bewegungsapparat und eine Vielzahl von Sensoren, die er einsetzt:

- Sehen
- Tasten
- Fühlen (einer Kraft).

Die Absolutgenauigkeit der menschlichen Meßsysteme ist jedoch schlecht, das betrifft auch die Positioniergenauigkeit. Der Gußputzer geht dreistufig vor:

- Aus dem Gratverlauf sucht er ein Teilstück heraus. Das Bahnteilstück wird klassifiziert: viel Grat, wenig Grat, einzusetzendes Werkzeug, ungefähre Vorschub etc.
- Im nächsten Schritt wird geschliffen. Eine Positionskontrolle findet nur tangential zur Werkstückoberfläche statt. In Normalenrichtung wird die Anpreßkraft geregelt. Dies ist eine angelebte aber unbewußte Vorgehensweise und rührt daher, daß das Werkzeug die Sicht auf die Wirkstelle der Bearbeitung versperrt. Andere Gründe sind die Leistungsgrenzen des Menschen und der Schleifwerkzeuge.

- Das Werkzeug wird zur Seite genommen und das Schleifergebnis wird kontrolliert. Bei dieser Kontrolle wird oft außer dem Sehen der Tastsinn eingesetzt. Der Mensch kann die Beschaffenheit einer Kante weit besser mit 'Fingerspitzengefühl' beurteilen, als durch Sehen. Zuletzt findet ein Rücksprung zum ersten Schritt statt.

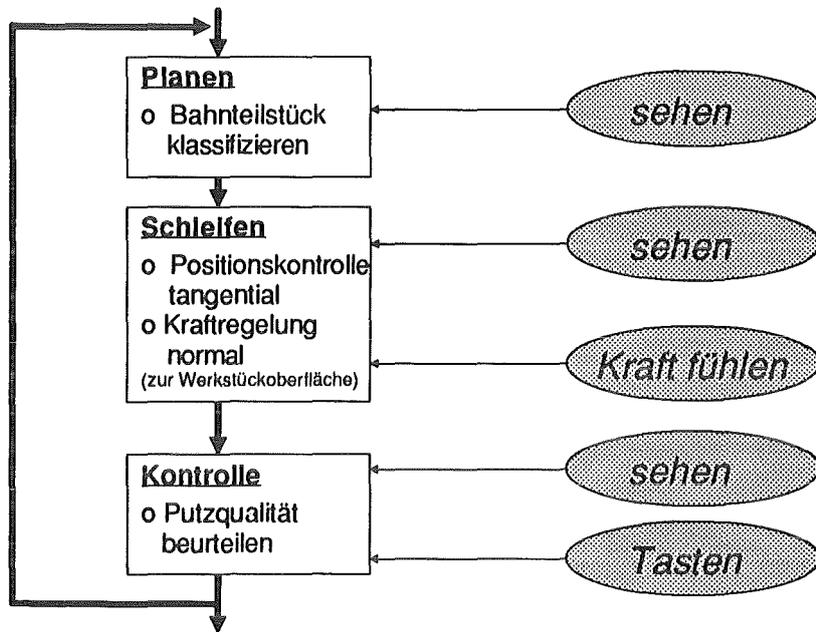


Bild 23 Vorgehensweise des Menschen beim Gußputzen

Trotz seiner hervorragenden sensorischen Fähigkeiten kann der Mensch nicht ohne abzusetzen kontinuierlich schleifen und alle Prozeßparameter fortlaufend adaptieren.

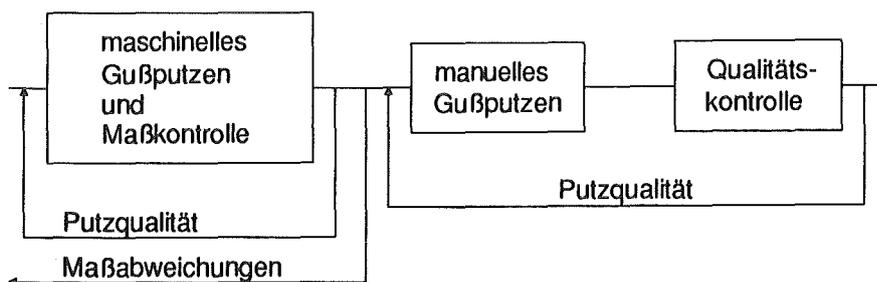


Bild 24 Regelkreischnitt für die Putzqualität und Maßhaltigkeit beim automatischen Gußputzen mit manuellem Nachputzen

Das menschliche Vorgehen läßt sich nicht direkt übertragen. Maschinen verfügen über eine bessere Wiederholgenauigkeit und eine bessere Steuerbarkeit auf absolute Werte. NC-Maschinen sind immer mit Lageregelkreisen ausgestattet, die Weg- bzw. Winkelmeßsysteme voraussetzen. Die Maschine kann deshalb die Koordinaten messen während sie arbeitet. Maßabweichungen im Werkstück können dadurch schon während des Gußputzens erkannt werden. Bild 24 zeigt einen Ausschnitt aus dem veränderten Regelkreis.

Der in Bild 25 dargestellte Lösungsansatz für das flexible Fertigungssystem zum Gußputzen sieht drei Schritte vor:

- Zuerst wird die aktuelle Geometrie des Werkstücks und des Werkzeugs vermessen. Die Planungsphase für die Bearbeitung nutzt gespeichertes Wissen aus dem Einlernprozeß und die aktuellen Geometriewerte.
- Bei der Bearbeitung wird die Kraft von der Nachgiebigkeit begrenzt. Die Nachgiebigkeit besteht aus einer Lineareinheit, die von einer Druckluftfeder gegen einen Anschlag gedrückt wird. Sind die Reaktionskräfte kleiner als die konstante Federkraft, so kann sich aus dieser Nachgiebigkeit kein Positionierfehler ergeben. Wird die Reaktionskraft größer und droht der Werkzeugantrieb stehenzubleiben oder ein Maschinenschaden, dann weicht das System aus, bis sich wieder ein Gleichgewicht einstellt.
- Im dritten Schritt wird kontrolliert, ob die Nachgiebigkeit ausweichen mußte. Dabei ist lediglich ein Endschalter nötig. Falls dieser angesprochen wurde, wird die Bearbeitung wiederholt. Eine neue Planung findet nicht statt. Die Einteilung in Bahnelemente, wie sie beim Einlernen vorgenommen wurde, wird im Automatikbetrieb nicht geändert.

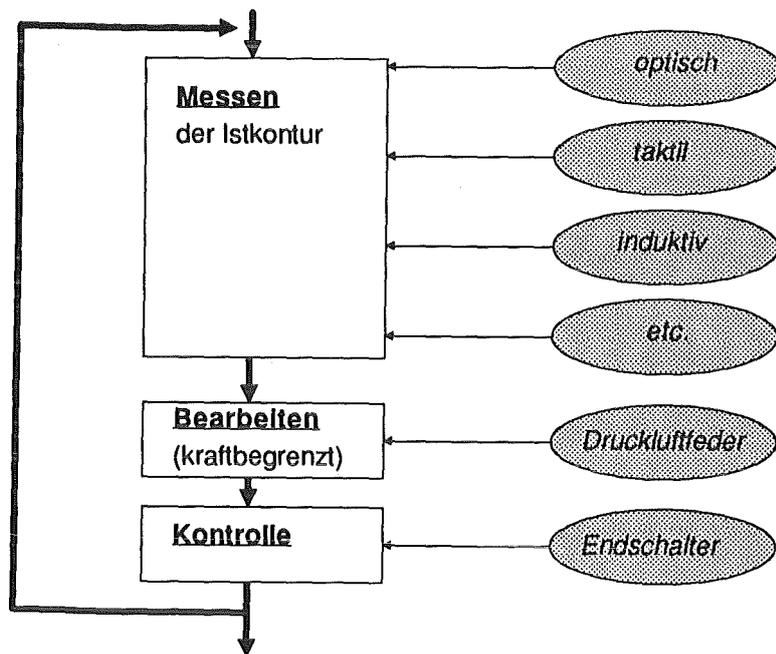


Bild 25 Vorgehensweise des flexiblen Gußputzsystems.

Bild 26 zeigt einige Erweiterungen gegenüber Bild 21:

- einen Verschleißsensor zur Messung des Werkzeugverschleißes,
- eine Nachgiebigkeit zur Kraftbegrenzung beim Bearbeiten,
- einen Endschalter in der Nachgiebigkeit um ein Einfedern der Nachgiebigkeit feststellen zu können und
- einen Geometriesensor zur Erfassung der Istgeometrie.

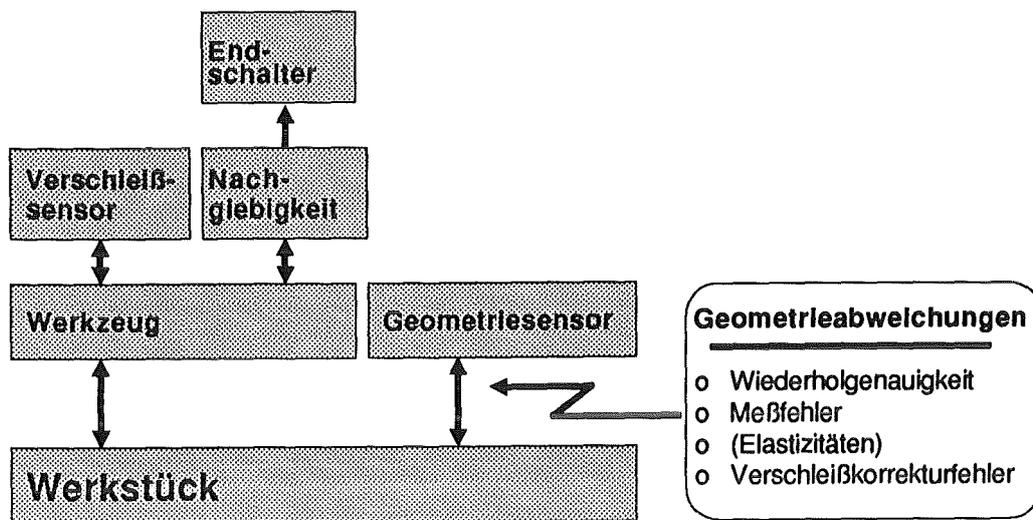


Bild 26 Maßnahmen zur Verringerung der Geometrieabweichung

Die Liste der Geometrieabweichungen verändert sich dadurch stark. Übrig bleibt nur die **Elastizität**, die durch die Kraftbegrenzung der Nachgiebigkeit nach oben begrenzt wird. Der **Meßfehler** des Verschleißsensors und des Geometriesensors ist von den benutzten Sensoren abhängig. Eine Meßgenauigkeit von einem zehntel Millimeter ist ausreichend und erreichbar. Die **Wiederholgenauigkeit** geht ein, weil zum Bearbeiten an den Meßpunkt zurückgekehrt werden muß. Wird auf einer einzigen Maschine gemessen und geputzt, liegt dieser Fehler in der Größenordnung von z.B. zwei zehntel Millimetern bei einem Roboter. Wird mit unterschiedlichen Maschinen gearbeitet, dann gehen in diese Größe auch die Wiederholgenauigkeit der Aufspannung des Werkstückträgers und die Fehler in der absoluten Positioniergenauigkeit beider Maschinen ein. Letzteres ist ein ortsabhängiger aber systematischer Fehler. Er kann von der Software kompensiert werden. Der **Verschleißkorrekturfehler** ist abhängig von der Häufigkeit, mit der der Werkzeugverschleiß gemessen wird. Der Schleifscheibendurchmesser nimmt bei der Bearbeitung kontinuierlich ab. Gemessen wird er nur an programmierten Punkten.

5.2 Programmierung

Die Programmierung kann

- *online* am Zielsystem (werkstattorientiert) oder
- *offline* erfolgen, während die Maschinen arbeiten.

Beide Strategien haben eine Reihe von Vor- und Nachteilen. Die Entscheidung für die eine oder die andere Variante hängt wesentlich von der Frage ab, ob das Fertigungssystem zum Gußputzen in eine heute bestehende Gießerei integriert werden soll, oder ob der Zeitpunkt der Integration weiter weg liegt.

Zweifellos entwickeln sich die Fabriken in Richtung CIM (Computer Integrated Manufacturing). Das in Bild 27 skizzierte CIM-Modell sieht so aus: Konstruktion eines Bauteiles am CAD-System. Mit Hilfe eines Expertensystems wird das Fertigungsverfahren nebst Werkstoff gewählt. Künstliche Intelligenz bringt Aushebeschrägen etc. an. Automatisch und papierlos werden Angebote von Gießereien eingeholt. Das CAD-Modell des Werkstücks wird an die Gießerei weitergegeben. Dort werden Simulationen zum Gießprozeß und zum Erstarrungsprozeß ausgeführt. Aus dem Rechner-Modell wird ein Modell zum Abformen erzeugt, alternativ auf 5-Achsen CNC-Fräsmaschinen oder z.B. durch Stereolithographie¹⁾ [OTT 89]. Außerdem werden die Bearbeitungsprogramme für das Gußputzzentrum, den Lackierroboter, das CNC-Bearbeitungszentrum usw. erstellt. Just-in-time wird ein Fertigungsauftrag gegeben. Die Charge für den Gießereiofen wird vorbereitet. Die Materialflußsysteme erhalten ihre Aufträge usw.. An all diesen Schritten wird gearbeitet [SENDER 91, KANDZIORA 88]. Die Vision ist CIB (Computer Integrated Business).

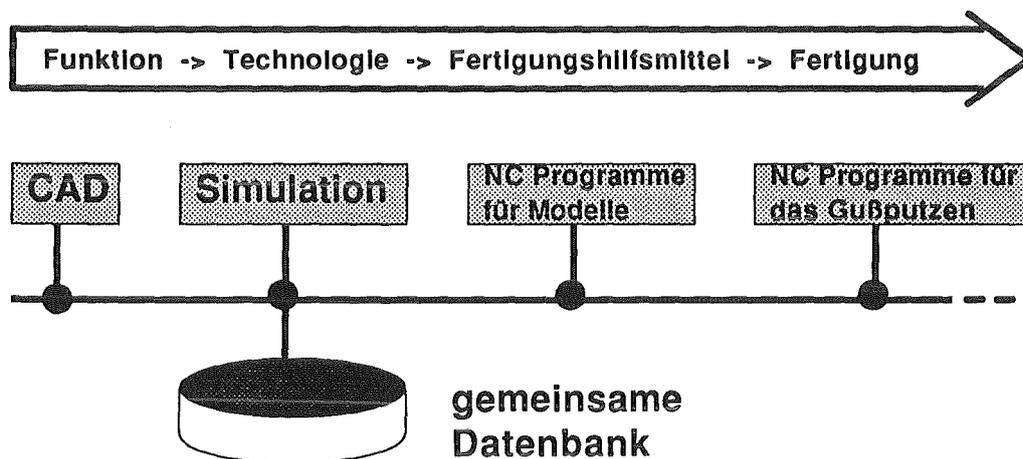


Bild 27 CIM-Modell

Dieses Zukunftsbild ist noch einige Zeit unrealistisch. CIM-Fabriken existieren nur in Forschungseinrichtungen. Ihre Produkte sind bescheiden. Die Wirtschaftlichkeit spielt keine Rolle. Noch ist der Daumen des Modellschreiners und Kitt ein wichtiges Formgebungselement. Die Realität der Gießereien ist oft die, daß nicht einmal Blaupausen existieren, aus denen die Lage der Grate hervorgeht.

Was selbstverständlich immer existiert und was alle Informationen über die Geometrie und die Grate enthält ist das zu putzende Werkstück. Ein System zum Gußputzen muß, um nicht schnell technisch überholt zu sein, sowohl mit dem realen Objekt, als auch mit einem CAD-Modell programmiert werden können. Ein Weg wäre, im ersten Schritt das fehlende

¹⁾ Bei diesem Verfahren wird das Modell schichtweise aus einem Kunststoff aufgebaut der unter Lichteinwirkung aushärtet. Die Schichten werden ähnlich wie bei einem Laserdrucker geschrieben.

CAD-Modell zu erstellen. Der Übergang aus der Gegenwart in die Zukunft wäre trivial. Probleme bereitet die mathematische Beschreibung der Geometrie von Freiformflächen. Nicht zuletzt fehlt das Personal für eine solche Aufgabe.

In der Automobilindustrie wurde ein Verfahren entwickelt, um Karosseriedaten mittels Fotogrammetrie aufzunehmen und anschließend offline Programme für die Lackierroboter zu erstellen [CARDAUN 90]. Der Aufwand an Hard- und Software ist nur in Einzelfällen zu rechtfertigen. Die Erstellung eines kompletten CAD-Modells ist nicht realisierbar und für das Gußputzen unnötig.

Ohne rechnerinternes Modell ist offline-Programmierung am Simulationssystem nicht möglich. Die wirtschaftlichen Erwägungen, die in diesem Zusammenhang häufig angestellt werden (keine Stillstandszeiten durch die Programmierung, optimierte Programme), erübrigen sich vorläufig. Die CAD-Schnittstelle ist an anderer Stelle zu suchen.

Die konventionelle Programmiermethode an der Maschine scheidet aus. Das Anfahren und Abspeichern jedes einzelnen Bahnpunktes ist zu langwierig. Programme können mit Hilfsgestellen werkstückgebunden offline erstellt werden. Solche Hilfsgestelle werden beispielsweise zur Programmierung von Lackierrobotern benutzt. Die Gestelle haben die gleiche Kinematik wie die Roboter, in den Gelenken jedoch lediglich Weg- bzw. Winkelaufnehmer und keine Antriebe. Sie sind leicht zu bewegen und kostengünstig. Solche Einrichtungen auch mit anderer Kinematik als die der Bearbeitungsmaschine könnten benutzt werden, um die Geometrie aufzunehmen. Sie würden mit Muskelkraft über das Werkstück bewegt. Die sensorgestützte Programmierung, bei der die Maschine ihren Weg selbst sucht, erfordert vom Bediener die Eingabe der Suchrichtung, aber auch die explizite Vorgabe aller 'Luftbahnen' ohne Sensorsignal und der Eingabe verschiedener Technologiedaten.

Der einfachste Weg in die Gießerei ist der Weg über 'direktes Vormachen'. Bedienergeführte Manipulatoren wurden in den Gießereien angenommen. Wieso also die Maschinen nicht wie einen Manipulator bedienen und dabei programmieren, um das Programm anschließend im 'play back' ablaufen zu lassen? Dieser Weg wird beschritten. Damit kann das Personal- und das Akzeptanzproblem gelöst werden. Einige Punkte sind zu beachten. Das zweite Werkstück unterscheidet sich in Geometrie, Gratausprägung und Lage vom ersten. Um Geometrieabweichungen zu messen, muß ein Meßprogramm eingelernt werden. Das Bearbeitungsprogramm selbst muß editierbar sein. Einerseits muß die aktuelle Geometrie des zweiten und aller nachfolgenden Werkstücke hineineditiert werden. Andererseits muß die Bahnelementreihenfolge veränderbar und erweiterbar sein.

Die Messung kann auch mit stationären Geräten erfolgen. Die Fotogrammetrie kommt dafür in Frage [LEITZ 87]. Bei einem denkbaren Fotogrammetrieverfahren wird mit einem Laser ein Punkt auf das Werkstück projiziert, von zwei Orten aus aufgenommen und daraus die Position errechnet (Meßunsicherheit ca. 1 mm bei einem Objekt von 5 m Länge;

Meßdauer pro Meßpunkt ca. 500 msec.; Systempreis ca. 0,5 Mio. DM). Eine Alternative ist ein Laserscanner, der nach dem Prinzip der Triangulation mißt. Wegen der Schatten hinter dem Werkstück und der geforderten Auflösung von etwa einem zehntel Millimeter bei Meßlängen von mehreren Metern, scheidet dieses Verfahren aus.

Das Meßsystem muß näher an den Meßort gebracht werden. Dazu ist eine Maschine notwendig, die den Sensor am Grat entlangführt. Diese Maschine muß programmiert werden. Im ersten Schritt muß ein Meßprogramm erstellt werden. Dieses Programm besteht aus Bahnelementen zum Putzen von Teilungsgraten, Kerngraten, Kühleisenflächen usw. und aus Luftbahnen, die die einzelnen Gratbahnen miteinander verbinden. Diese logische Strukturierung, die von Gießereileuten leicht nachvollzogen werden kann, soll erhalten werden. Das Kollisionsproblem muß mangels ausreichender Umgebungsinformation in den Rechnern vom Bediener gelöst werden.

Ein Einlernprozeß in zwei Schritten erleichtert die Arbeit. Beim Werkstück, an dem eingelernt wird, muß der Sensor einen Wert in der Mitte seines Meßbereiches anzeigen. Mit einer automatischen Bahnkorrekturfunktion wird dies erreicht. Die Bahn der Meßmaschine wird grob eingelernt. Die Anlage bestimmt selbständig die Meßorte, mißt die tatsächlichen Werte an diesen Orten und korrigiert die Bahn anschließend. Das hat nichts mit einer online Sensorsignalverarbeitung zu tun. Am Meßort kann die Maschine stillstehen. Die Auswertung der Messung erfolgt erst, nachdem das Meßprogramm zu Ende gelaufen ist.

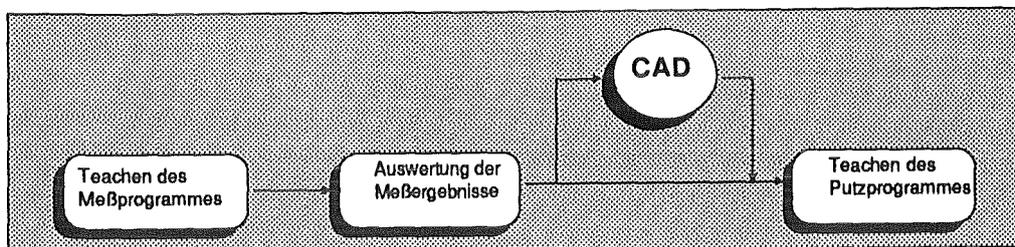


Bild 28 Vorgehensschritte bei der Programmierung und mögliche CAD-Schnittstelle

Resultat des Meßvorganges ist eine Menge von Punkten, die die Werkstückoberfläche in Teilbereichen sehr exakt beschreibt. Die Istgeometrie des Werkstücks ist nach dem Messen bekannt. Die Istgeometrie enthält auch die Grate. In einem Rechenschritt muß der Grat erkannt und die Sollgeometrie vorgegeben werden. Dieser Schritt ist keineswegs trivial. Der Verzicht auf online Sensorsignalverarbeitung erlaubt jedoch an dieser Stelle mächtige Algorithmen einzusetzen [KOHLHEPP 90]. Gratfußpunkt, Grathöhe, Gratbreite, Gratvolumen können so bestimmt werden. Damit ist eine Grundlage geschaffen, um ein von Beginn an adaptiertes Putzprogramm zu generieren.

Das Programmierkonzept, gezeigt in Bild 28, für das Fertigungssystem zum Gußputzen sieht drei Schritte vor. Zuerst wird ein Meßprogramm eingelernt. Aus den Meßwerten wird im zweiten Schritt die Sollkontur berechnet. Diese Information wird im dritten Schritt

durch Angaben zur Putztechnologie ergänzt. Die Gratfußpunktinformation kann als CAD-Schnittstelle betrachtet werden. Die Programmierung des Putzprogrammes kann hierauf aufzusetzen. Der Weg vom CAD-Modell zum Meßprogramm ist jederzeit möglich. Durch den Meßschritt werden Ungenauigkeiten zwischen realer Welt und Rechnermodell kompensiert [HÄFELE 90].

Schleifen ist beim Gußputzen ein weit verbreitetes Verfahren. Das Verfahren muß für eine Maschine nicht notwendigerweise übernommen werden. In vielen Fällen sind andere Verfahren wirtschaftlicher. Ohne Schleifscheiben ist ein Fertigungssystem zum Gußputzen allerdings kaum denkbar. Schleifscheiben verschleifen. Während große Scheiben an gut zugänglichen Stellen so geführt werden können, daß die zylindrische Form erhalten bleibt, gelingt dies bei Schleifstiften nicht. Für eine Maschine sind Schleifstifte unbrauchbar. Eine Durchmesserabnahme einer Schleifscheibe muß das System aber kompensieren können. Bei der Bearbeitung eines Werkstücks muß mehrfach eine Verschleißkorrektur vorgenommen werden. Dies könnte bedeuten, daß die Programme der Putzmaschine während der Bearbeitung geändert werden müßten. Mathematisch lösbar ist das Problem. Beim 'Kopierfräsen' existiert ein ähnliches Problem, die Fräserradienkorrektur [ARETZ 88]. Der Rechenaufwand ist aber erheblich.

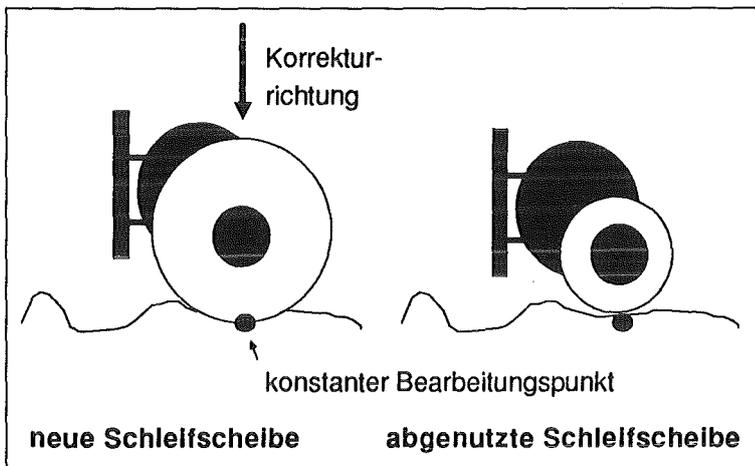


Bild 29 Verschleißkorrektur bei konstantem Bearbeitungspunkt

Bei einer Bearbeitungsmaschine mit sechs Freiheitsgraden läßt sich dieses Problem dadurch vereinfachen, daß der Bearbeitungspunkt relativ zur Schleifspindel konstant bleibt, also nicht um den Schleifscheibenumfang herumwandert (s. Bild 29). Die Korrekturrichtung ist dann bekannt und muß nicht aus der Geometrie oder aus Kraftsensordaten bestimmt werden. In Einzelfällen könnte der Verschleiß über eine 7. Achse mechanisch kompensiert werden. CNC-Steuerungen lassen Werkzeugdefinitionen zu. Damit kann die Verschleißkompensation über eine Anpassung der Werkzeugdaten erfolgen. Das Bearbeitungsprogramm bleibt davon unberührt.

Beim Programmieren muß sichergestellt werden, daß das Werkzeug normal zur Werkstückoberfläche steht. Mit anderen Worten, die Werkstücknormale muß mit dem Verschleißkompensationsvektor übereinstimmen. Bei bekanntem Gratverlauf ließe sich die Normale rechnerisch bestimmen. Das Programm könnte automatisch angepaßt werden. Darauf wird verzichtet. Der entstehende Fehler ist weit weniger schlimm, als dadurch möglicherweise verursachte Kollisionen.

Während mit konventionellen Einlernverfahren nur am geputzten Werkstück programmiert werden könnte, weil der Programmpunkt von der Maschine angefahren werden muß, ist hier der Grat geradezu notwendig, um die Gratfußpunkte bestimmen zu können. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich. Ein Werkstück konventionell vorzuputzen erübrigt sich, was das Organisationsproblem bei kleineren Losgrößen und häufiger Programmierphase erheblich vereinfacht. Das Kollisionsproblem im Automatikbetrieb wird entschärft, weil der Bediener schon beim Einlernen den Grat berücksichtigen muß. Das Einlernen wird dadurch erleichtert, daß der Grat sichtbar ist. Die Schleifspuren werden bei manueller Bearbeitung einige Zentimeter breit. Die Gratfußpunktlinie ist an einem geputzten Teil nicht genau erkennbar. Außerdem wird der Bediener (unbewußt) die Programme den Besonderheiten des Werkstücks (z.B. eines Kernlagers mit großer Lagerluft) anpassen, wenn er diese Besonderheiten noch sehen kann.

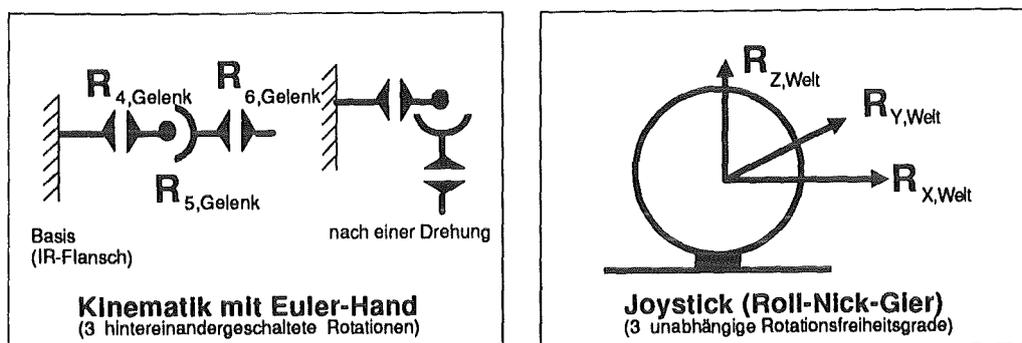


Bild 30 Zum Orientierungsproblem

Manipulatoren werden mit einem einzigen Joystick mit Kraftreflexion bedient. Meist sind die Geräte hydraulisch betrieben. Elektrische Master-Slave-Manipulatoren [BREITWIESER 86] sind in der in Frage kommenden Größe und Belastbarkeit nicht verfügbar. Die Regelung solcher Geräte ist wegen der erforderlichen Dynamik äußerst kompliziert [WEBER 89] und mit industriell verfügbaren Steuerungen nicht realisierbar. Deshalb wird ein sechssachsiger Joystick zur Vorgabe des Geschwindigkeitssollwertes verwendet. Dieser vereinfacht die Bedienung. Richtungen werden im kartesischen System intuitiv vorgegeben. Für Geschwindigkeitssollwerte existiert praktisch eine de facto Standardschnittstelle. Der Geschwindigkeitssollwert wird vom digitalen Teil der NC-Steuerungen als Signal zwischen +/- 10 Volt dem analogen Steuerungsteil vorgegeben. Schwierigkeiten ergeben sich, wenn die Maschine nicht kartesisch aufgebaut ist und bei den Orientierungen. Bei einer Maschine sind Ori-

entierungsachsen 'in Reihe' aufgebaut, d.h. eine Winkeländerung in einer Achse wird die Lage der Achsen, die der Basis abgewandt sind, verändern (s. Bild 30). Dies entspricht der Logik der sogenannten EULER-Winkel [PAUL 81, CRAIG 89, FU 87]. Dort werden die Winkel in mitgedrehten Koordinatensystemen angegeben. Ein Joystick ist ein sehr einfaches, mitunter vollkommen starres 'kinematisches' System. Die Achsen drehen nicht mit. Die Winkelvorgaben erfolgen um ortsfeste Achsen, im sogenannten Roll-Nick-Gier-System. Werden diese Vorgaben nicht automatisch umgerechnet, ist die Orientierungsvorgabe fast unmöglich.¹⁾

¹⁾ Die Vielzahl der nur leicht unterschiedlichen Orientierungsdefinitionen, es existieren allein ein Dutzend Euler-Winkel-Definitionen [CRAIG 89], erschwert die Einsicht in die Zusammenhänge. Ein Roboter mit Euler-Hand kann aus der Grundstellung heraus mit drei Drehungen um die Weltkoordinatenachsen in jede Orientierung gebracht werden. Dabei entsprechen die Drehachsen bei kartesischen Robotern den Roboterachsen. Zuerst wird um die X-Achse, dann um die Y-Achse und schließlich um die Z-Achse gedreht. Die Reihenfolge ist wichtig. Zurück drehen sich die Vorzeichen der Winkel und die Reihenfolge der Drehungen um. Schwer nachvollziehbar ist der Zusammenhang, daß eine Euler-Hand aus einer Richtung betrachtet um feste Achsen dreht, aus der anderen Richtung jedoch um Achsen die mitgeführt werden. Dabei wird eine Drehung ausgeführt und danach um eine Achse, die bei der Drehung entstand weitergedreht.

Vorwärts: $L = R_Z(\chi) R_Y(\beta) R_X(\alpha) E$ [1]

Zurück: $E = R_X(-\alpha) R_Y(-\beta) R_Z(-\chi) L$ [2]

bzw.: $E = R_X(\alpha)^T R_Y(\beta)^T R_Z(\chi)^T L$ [3]

E ist die Einheitsmatrix, bzw. die Matrix der Einheitsvektoren, wenn ein lokales Koordinatensystem in Koordinaten eines deckungsgleichen Systems ausgedrückt wird. L ist das lokale Koordinatensystem nach der Drehung um α, β, χ um die Weltkoordinatenachsen.

Wird die rechte Seite der Gleichung [1] ausmultipliziert so ergibt sich für L:

$$L = \begin{bmatrix} c\chi c\beta & c\chi s\beta s\alpha - s\chi c\alpha & c\chi s\beta c\alpha + s\chi s\alpha \\ s\chi c\beta & s\chi s\beta s\alpha + c\chi c\alpha & s\chi s\beta c\alpha - c\chi s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad [4]$$

In Gleichung 4 gelten die Abkürzungen $c\alpha = \cos \alpha$, $s\alpha = \sin \alpha$ etc.

Werden wie in Robotersteuerungen üblich, die Orientierungsvorgaben des Joysticks auf die eingestellten Winkel aufaddiert, so verhält sich der Roboter so, als ob um die mitgedrehten Achsen gedreht werden sollte. Deshalb muß im allgemeinen Fall, die Vorgabe aus Roll-Nick-Gier-Winkeln in Euler-Winkel umgerechnet werden.

Die Istwinkel beschreiben ein lokales Koordinatensystem L. Die Joystickorientierungsvorgaben werden als Roll-Nick-Gier-Winkel interpretiert. Sie ergeben eine Matrix S. S entsteht wie L in Gleichung 4, aber mit den Winkeln δ, ϵ, ϕ , die am Joystick gemessen werden.

$$S = \begin{bmatrix} c\delta c\epsilon & c\delta s\epsilon s\phi - s\delta c\phi & c\delta s\epsilon c\phi + s\delta s\phi \\ s\delta c\epsilon & s\delta s\epsilon s\phi + c\delta c\phi & s\delta s\epsilon c\phi - c\delta s\phi \\ -s\epsilon & c\epsilon s\phi & c\epsilon c\phi \end{bmatrix} \quad [5]$$

Ist der Joystick in der Roboterhand montiert, dann kann S die Verdrehung der Einheitsmatrix aus Sicht des Werkzeugkoordinatensystems angeben. Mit L kann S in das Weltkoordinatensystem gedreht werden. Das Ziel-Koordinatensystem Z_T ergibt sich demnach aus:

$$Z_T = L S E \quad [6]$$

Die Vorgabe an die Robotersteuerung ergibt sich aus der Differenz der Sollorientierung im Zielpunkt und der Roboter-Istorientierung. Dazu müssen die Orientierungen des Zielpunktes aus Z_T bestimmt werden. [z.B. CRAIG 89] Mehrdeutigkeiten können hier leicht ausgeschlossen werden, weil die vom Joystick vorgegebenen Verdrehungen im Vergleich zum Definitionsbereich der Arcustangens-Funktion klein sind. Die Abtastintervalle müssen klein genug gegenüber den gewünschten Geschwindigkeiten sein.

Technologiedaten und andere Eingaben können nicht durch Führen des Roboters erfolgen. Es bedarf weiterer Eingabemöglichkeiten. Maschinelle Spracherkennung wäre ideal. Der Bediener braucht seine Hände schon zum Führen der Maschinen. Die Spracherkennung ist nicht industriereif [RIGOLL 86]. Ein anderes Eingabeverfahren, das sehr direkt wäre, sind Touch Screens. Der Bediener zeigt mit dem Finger auf ein Bildschirmfeld, das mit einem bestimmten Text oder Symbol hinterlegt ist. Schmutzige Finger sind im Putzereibetrieb unvermeidbar. Die Bildschirmausgaben wären schnell unlesbar. Was bleibt sind Funktionstasten und Menütechnik. In Ausnahmefällen, in denen beispielsweise ein Name oder eine Zahl erfragt werden, müssen die Eingaben über Masken erfolgen.

5.3 Die Rolle des Menschen

In zahlreichen Automatisierungsansätzen hat der Mensch die Rolle eines 'Lückenbüßers'. Automatische Fertigungssysteme setzen Arbeitskräfte frei. Das hat für die Betroffenen manchmal persönlich schwere Folgen, die hier nicht weiter diskutiert werden.

Menschen werden weiterhin benötigt als:

- Bedienpersonal,
- Wartungspersonal und als
- Personal zum Fertigputzen der Werkstücke.

Ein wichtiges Ziel der Entwicklung muß darin bestehen vorhandenes Personal durch Qualifizierungsmaßnahmen zu **Bedienpersonal** schulen zu können. Die Bedienung soll auch die Programmierung beinhalten.

Das **Personal zum Fertigputzen** muß verschiedene Restarbeiten übernehmen:

- Putzen an schwer zugänglichen Stellen,
- Beseitigen des 'ungeplanten Putzaufwands' und
- Putzen der Stellen, an denen sich der Einsatz der Maschine nicht lohnt.

Das Fertigungssystem zum Gußputzen wird mit leistungsfähigen Werkzeugen die großen Grate beseitigen. Die Arbeitsplätze werden menschenfreundlicher, weil:

- körperlich schwere Arbeit abgenommen wird,
- kleine Werkzeuge für das Fertigputzen eine geringere Unfallgefahr bedeuten,
- kleinere Werkzeuge weniger Staub und Lärm produzieren und weil
- geeignete Werkstückträger die Arbeitshaltung verbessern können.

Die Arbeitsplätze zum Fertigputzen müssen vom Maschinentakt über Puffer entkoppelt werden. Das ist auch im Sinne der Auslastung der Maschinen.

5.4 Unternehmensziele

Die Ziele für ein Gießereiunternehmen sind:

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Gußputzerei und
- Humanisierung der Arbeitsplätze in der Gußputzerei.

Humanisierung bedeutet für das Unternehmen:

- weniger Fluktuation und damit verbundener Kosten,
- geringerer Krankenstand,
- höhere Zufriedenheit des Personals u.s.w.

Die **Wirtschaftlichkeit** steht für die Unternehmen im Vordergrund. Sie wird überschlägig berechnet nach der Formel:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionsvolumen}}{\text{eingespartes Personal} * \text{durchschnittlicher Jahreslohn}}$$

Diese Faustformel vernachlässigt beispielsweise alle laufenden Kosten. Soll ein zulässiges Investitionsvolumen berechnet werden, kann fast willkürlich eine Zahl zwischen 1 und 10 für die Amortisationszeit eingesetzt werden. Zwei Jahre Amortisationszeit ist eine gängige Vorgabe. Auch die Personaleinsparung ist schwer abzuschätzen, weil sich die Qualifikationen und damit die Gehälter verschieben.

Einige Punkte müssen bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden:

- Programmierkosten sind Investitionskosten. Kurze Programmierzeiten wirken sich positiv aus.
- Aufspannvorrichtungen kosten viel Geld. Die Möglichkeit einfache universelle Vorrichtungen zu benutzen spart auch laufende Kosten der Lagerhaltung etc.
- Die einfache Programmierung erlaubt den Einsatz von Personal niedrigerer Lohngruppen.
- Der frühe Einstieg in eine neue Technologie verschafft mittelfristig Marktvorteile.
- Durch die Messungen an jedem Werkstück können gegenüber den Kunden engere Maßgarantien gegeben werden.

Die tatsächliche Höhe der Investitionskosten kann nach den folgenden Kapiteln, die die Hardware und die Programme beschreiben, ermittelt werden. Die Kenntnis der erreichbaren Putzergebnisse erleichtert die Einschätzung der Personaleinsparung.

6 Hardware Systembausteine

6.1 Übersicht

Die Hardware für das Fertigungssystem zum Gußputzen besteht aus den in Bild 31 dargestellten Blöcken: Meßsystem, Bearbeitungssystem und Transportsystem, die von einer gemeinsamen Steuerung koordiniert werden.

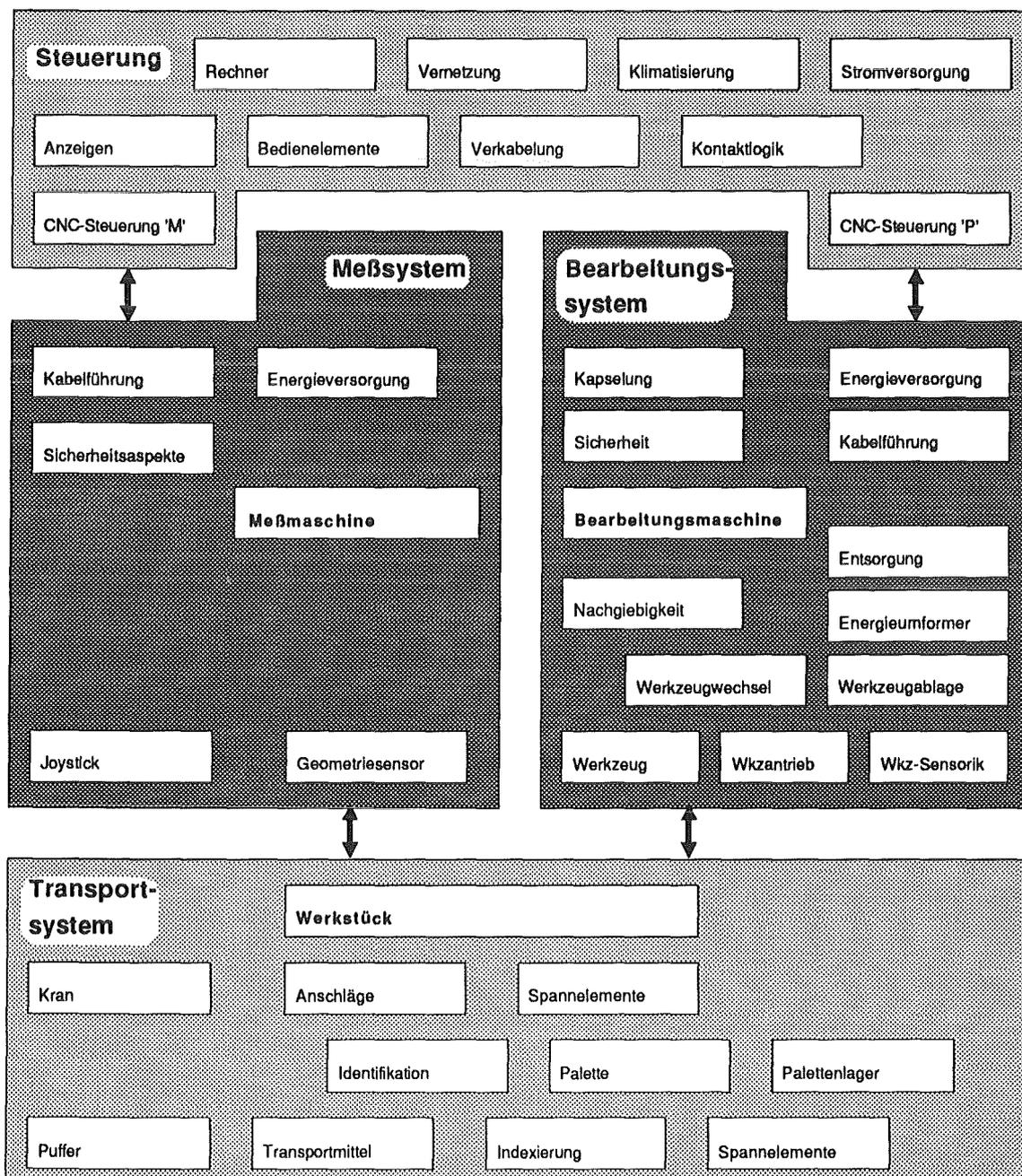


Bild 31 Übersicht über die Hardware Systembausteine

6.2 Werkstück Transportsystem

Innerhalb der Gießereien stehen die Putzereien am Ende der Wertschöpfungskette. Lagerzeiten durch Fertigungsengpässe und Organisationsmißstände sind teuer. Auch Gießereien profitieren von kurzen Durchlaufzeiten, die sich mit einem ausgeklügelten Werkstücktransportsystem erzielen lassen. Gabelstapler sind flexibel, aber schwer organisierbar und kontrollierbar.

Die Werkstücke werden in eine Form gegossen. Die Teileposition innerhalb der Form ist bekannt. Diese Ordnung wird aufgegeben, sobald das Material erstarrt ist. Die Form wird zerstört, das Werkstück in einer Durchlaufstrahlanlage gedreht und gewendet, wobei die Werkstücke starken Belastungen ausgesetzt werden.

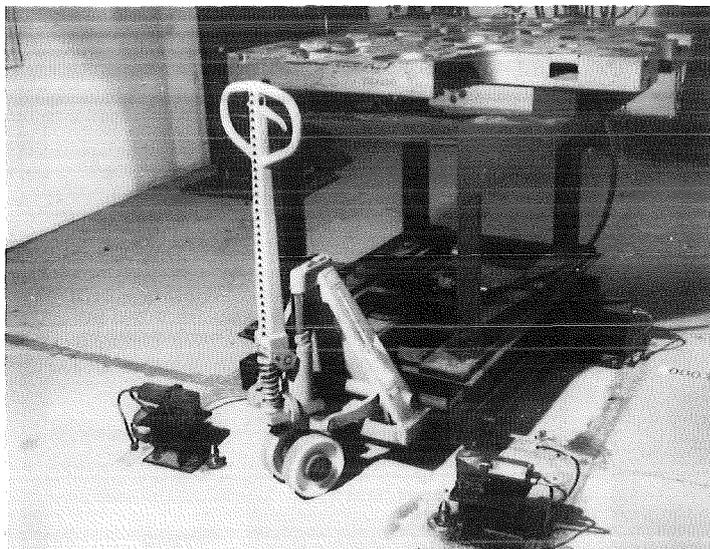


Bild 32 Realisierte Materialflußlösung

Ein Industrieroboter könnte die Gußwerkstücke aus der Sandform entnehmen und ganz gezielt Werkzeuge einsetzen, um die Teile zu entkernen und vom Sand zu befreien. Das würde die Werkstücke schonen und Strahlmittel einsparen. Am Ende könnten die Teile geordnet übergeben werden.

Gegenwärtig werden die Gußwerkstücke ungeordnet in der Putzerei angeliefert. Ein Bediener muß die Teile wieder ordnen. Für das automatische Gußputzsystem werden die Werkstücke unter Zuhilfenahme eines Krans auf eine Palette gelegt, gegen Anschläge grob justiert und mit Spannelementen fixiert. Die Lage des Werkstücks relativ zur Palette wird danach aufrecht erhalten. In den automatischen Stationen werden die Paletten selbst aufgespannt. Diese Aufspannung muß, um Meßwerte einer Meßmaschine auf eine Bearbeitungsmaschine übertragen zu können, genügend genau reproduziert werden. Sonst würde sich die Transformation zwischen Palette und Maschine ändern. Mit Indexiereinrich-

tungen und geeigneten Spannelementen ist eine Wiederholgenauigkeit erreichbar, die für die Aufgabenstellung ausreicht. Im **Bild 32** ist die realisierte Lösung gezeigt.

Bei der Konstruktion der **Palette** ist zu beachten, daß in der damit geschaffenen Aufspannung auch manuell geputzt werden soll. Das Werkstück muß nicht nur für die Maschine zugänglich sein, sondern auch für den Menschen. Beispielsweise sollte der Palettengrundrahmen nicht größer sein, als die durchschnittlichen Werkstücke, weil sonst der Bediener nicht richtig stehen kann. Die Arbeitshöhe sollte stimmen. Möglicherweise muß die gesamte Einrichtung gekippt werden, um Zugänglichkeit zu gewährleisten. Dies stellt Anforderungen an die Spannelemente.

Das Materialflußsystem sollte **Puffer** vor der Meßstation und hinter der Putzstation vorsehen, um den Bediener vom Maschinentakt zu entkoppeln. Zwischen den Maschinen verringert ein Puffer die Stillstandszeiten bei Störungen und die Wartezeiten bei unterschiedlichen, eventuell zeitvarianten Taktzeiten beider Maschinen. Außerdem steigt mit der Größe des Puffers die zulässige Rechenzeit, wobei dazu allerdings ein Puffer für ein Werkzeug ausreicht (genügt dies nicht, werden leistungsfähigere Rechner benötigt).

Als **Transportmittel** kommt eine Vielzahl von Systemen in Betracht. Schienengebundene Fahrzeuge sind in der schmutzigen Umgebung bei langen Strecken und geringem Werkstückaufkommen eine wirtschaftliche Lösung. Ein Rollenbahnsystem verbunden mit einem fahrerlosen Flurförderfahrzeug für den sauberen Bereich kann eine flexible Lösung sein. Schon wegen der Ersatzteilhaltung wird sich das Transportmittel an den andernorts im Betrieb eingesetzten Systemen orientieren.

Für den automatischen Ablauf ist wichtig, jederzeit zu wissen, welches Werkstück sich an welchem Ort befindet. Die Palettensnummer muß sich in jeder Bearbeitungsstation lesen lassen. Geeignete **Identifikationssysteme** sind Stand der Technik.

6.3 Werkzeugsystem

Das Werkzeugsystem besteht aus dem eigentlichen Werkzeug, z.B. einer Schleifscheibe oder einem Meißel, und den nötigen Hilfsmitteln um diese Werkzeuge einzusetzen.

6.3.1 Werkzeug

Dem Werkzeug fällt eine ganz entscheidende Rolle zu. In der Gießerei dominieren schlagende Werkzeuge und Schleifwerkzeuge. Schlagende Werkzeuge verursachen Schwingungen. Schleifwerkzeuge erfordern hohe Andruckkräfte. Es gibt sehr leistungsfähige Verfahren, die solche Probleme nicht bereiten. **Laserstrahlschneiden** wird in der Blechbear-

beitung mit Erfolg eingesetzt. Viele Beispiele zeigen, daß sich die Strahlführung auch mit Maschinen mit fünf Freiheitsgraden technisch lösen läßt. Laserstrahlschneiden eignet sich jedoch nicht zum flächigen Bearbeiten. Die Investitionskosten sind sehr hoch. Außerdem macht das abtropfende oder wegspritzende aufgeschmolzene Material Schwierigkeiten. Dieses Material klebt mitunter an anderer Stelle fest, was eine Nacharbeit erfordert. Dies ist auch das Haupthindernis für den Einsatz des **Plasmaschneidens**, eines kostengünstigen und leistungsfähigen Verfahrens. Ein anderes gemeinsames Problem besteht in der Gefügebeeinflussung. Die Werkstückoberfläche nimmt Wärme auf und kühlt danach ab. Speiser werden manchmal mit **Schneidbrennern** abgetrennt. Danach ist eine gezielte Wärmebehandlung des Werkstücks notwendig, um die gewünschten Werkstoffeigenschaften einzustellen.

Gußeisen mit Lamellengraphit ist sehr spröde. Ein gezielter Schlag mit einem Hammer läßt große Gratstücke im Gratfuß abbrechen. Dort entstehen die Spannungsspitzen. In vielen Ansätzen wird der Hammer durch einen pneumatisch betriebenen **Meißel** ersetzt. Das gezielte Zuschlagen wird ersetzt durch ein kontinuierliches Entlangfahren am Grat. Um ein Verhaken zu vermeiden, werden Meißel benutzt, die ständig schlagen. Die dauernde Schwingungsbelastung zwingt zu vorbeugender Wartung oder verursacht Maschinenausfälle. Für den manuellen Betrieb werden Meißelhämmer eingesetzt, die nur bei Widerstand schlagen. Dies ist nicht nur für die menschlichen Gelenke gesünder. Bei Verwendung solcher Werkzeuge kann aber nicht am Grat entlang gefahren werden. Vielmehr muß der Meißel senkrecht zum Grat zugestellt werden, um abzuschlagen, danach zurückgezogen und neu positioniert werden. Diese Prozedur ist zeitaufwendig. Mit Meißel lassen sich schwer zugängliche Stellen und Ecken erreichen. Für die Hubbewegung in Meißellängsrichtung wird der Freiheitsgrad der Nachgiebigkeit benutzt. Die Pneumatikfeder wird als Antrieb eingesetzt. Es entsteht eine schnelle Achse. Die Funktion der Nachgiebigkeit wird nicht beeinträchtigt. Der Bearbeitungserfolg wird mit einem Endschalter in der Nachgiebigkeit gemessen. Dadurch wird dem Verfahren ein Stück Unsicherheit genommen. Größere Grate sind günstiger als ein ausgefranster niedriger Gratverlauf. Die Restgrathöhe ist abhängig vom Spiel des Meißels in der Aufnahme und der Punktedichte.

Trennschleifen läßt sich an geraden Außenkonturen auch an Liniengraten einsetzen. Die Bearbeitungszeit ist unabhängig von der Grathöhe. Die Qualität des Schliffs und des Restgrates ist besser als beim Meißeln. Wie dort sind auch hier höhere Grate günstiger, weil dünne Trennscheiben mit geringer Seitenstabilität von niedrigen Graten eher abgedrängt werden, als von höheren Graten, bei denen die Passivkräfte des Schnittes in der Scheibenebene liegen.

Ein rundum mit Diamantstaub besetzter Draht einer **Diamantdrahtsäge** kann in alle Richtungen schneiden. Wegen der Aushebeschrägen liegen die Grate meist auf konvexen Oberflächen. Die Zugänglichkeit wäre gegeben. Die in Gußeisen erzielbaren Vorschübe sind bescheiden.

Mit **Bandsägen** lassen sich nahezu beliebig große Querschnitte trennen. Wenn dieses Werkzeug aber gehandhabt werden muß, erweist es sich als etwas sperrig wegen der Umlenkrollen.

Kreissägen für die Metallbearbeitung sind oft mit Hartmetallschneiden bestückt. Die Leistungsfähigkeit wird nur erreicht, wenn Rattern vermieden wird. Das setzt entsprechende Maschinen voraus, die das Werkzeug führen.

Die harte Gußhaut ist das klassische Schreckgespenst für die **Fräsbearbeitung**. Fräsen bedeutet üblicherweise sehr hohe Passivkräfte und niedrigfrequente Anregung. Hochgeschwindigkeitsfräsen mit **Hartmetallfrässtiften** eignet sich nicht zum Abtragen großer Volumina oder für große Vorschübe. In engen Radien sind die Frässtifte aber die weit bessere Alternative zu Schleifstiften.

Neben dem Problem des hohen Verschleißes an **Schleifscheiben** entsteht beim Schleifen sehr viel Staub. Die Entsorgung ist nur über große Gebläse mit Staubabscheidern realisierbar, was große Kosten verursacht. Naßschliff scheidet aus. Gußeisen rostet sofort. Bei der Werkzeughandhabung an großen Gußteilen entstünde ein Abwasserproblem.



Bild 33 Fräsmeißel, abgeschlagene Gratstücke und 'Schnittbild'

Ein Werkzeug bei dem mehrere 'Drehmeißel' gelenkig auf einer Scheibe befestigt sind, wie in **Bild 33** links angedeutet, nimmt bei großer Drehzahl die Gestalt eines Fräasers an. Von diesem sogenannten **Fräsmeißel** werden hohe Grate abgeschlagen und niedrige Grate bzw. die Gratreste weggefräst. Durch die Gelenke im Werkzeug werden Schläge abgefangen. Sollte der Gratfußpunkt zu breit sein, um abgeschlagen zu werden, oder die Energie im Meißel nicht ausreichen, um den Grat abzuschneiden, dann kann der Meißel ausweichen. Die werkzeugführende Maschine wird geschont. Bei Grauguß werden Vorschubgeschwindigkeiten erzielt, die mindestens Faktor 5 über denen liegen, die mit Schleifscheiben, Fräsern oder Trennscheiben zu erreichen sind. Hinzu kommt, daß dieses Werkzeug sehr stabil ausgeführt werden kann, und daß der 'Freiheitsgrad in der Schneide' das System unempfindlicher macht.

Das Werkzeugproblem ist nicht global zu lösen. Je nach Werkstoff und Werkstückgeometrie versagen manche Verfahren ganz. Andere Werkzeuge werden zu sperrig für die Werkzeughandhabung. Ein einzelnes Verfahren kann nicht alle Probleme wirtschaftlich lösen. Eine Maschine zum Einsatz eines großen Fräasers ist anders konstruiert als die Maschine zur Handhabung eines Schneidbrenners. Die Bearbeitungsmaschine muß ein Kompromiß zu den einzusetzenden Werkzeugen sein und umgekehrt müssen die Werkzeuge der Maschine angepaßt werden. Bild 34 zeigt einen Teil der eingesetzten Werkzeuge in der Werkzeugablage (von links nach rechts):

- Trennscheibe,
- Schlagmeißel und
- Fräsmeißel.

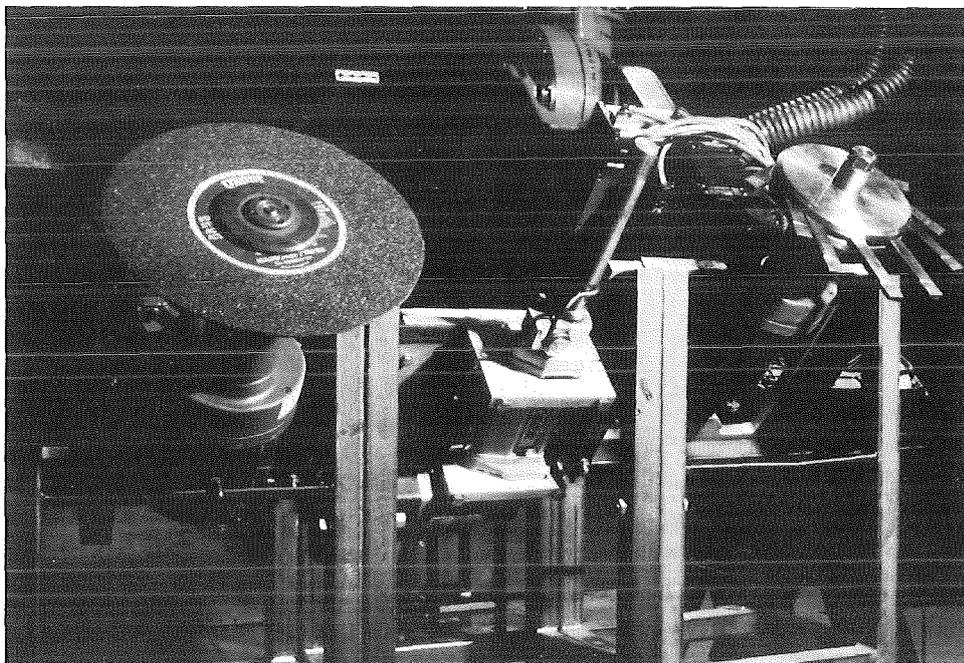


Bild 34 Eingesetzte Werkzeuge in der Werkzeugablage

6.3.2 Werkzeugantrieb

Mit steigender Leistung des Werkzeugantriebs steigt tendenziell das Abtragsvolumen. Dies gilt zumindest in weiten Bereichen für das Schleifen. Mit der Leistungsfähigkeit steigt jedoch auch das Gewicht des Antriebs. Wenn hohe Geschwindigkeiten erreicht werden sollen, ist diese Last bedeutsam. In Werkzeugmaschinen sind die Antriebe für das Werkzeug integriert. Bei Robotern wird der Werkzeugantrieb an der Roboterhand angeflanscht. Vor- und Nachteile beider Lösungen stehen sich gegenüber. Die Gewichtsverteilung ist im ersten Fall günstiger. Der Antrieb kann mitunter weiter nach hinten versetzt werden. Dann muß aber ein Getriebezug durch die Gelenke führen. Wird der Antrieb ganz vorne ange-

flanscht, kann er leicht ausgetauscht werden. Leistungsvermögen und Drehzahl können leichter an die Erfordernisse angepaßt werden.

Grundsätzlich kommen Pneumatik-, Hydraulik- und Elektromotoren in Betracht. Mit **Pneumatikantrieben** können hochtourige unempfindliche und überlastsichere Werkzeuge gebaut werden. Der Preis dafür sind hohe Energiekosten. Deshalb sind Pneumatikantriebe nur in den unteren Leistungsklassen anzutreffen. **Hydraulikmotoren** bieten ein gutes Verhältnis zwischen Eigengewicht und Leistung. Die Drehzahlen sind niedrig. Hydrauliköl muß in Schläuchen zum Verbraucher hin- und zurückgeführt werden. Lecks sind erfahrungsgemäß unvermeidbar. Auch für Hydraulikantriebe sind die Energiekosten hoch.

Durch statische oder dynamische Frequenzumrichter kann die Netzfrequenz des öffentlichen Stromnetzes in eine höhere Frequenz gewandelt werden. **Asynchronmotoren** laufen damit schneller und geben eine größere Leistung ab. Solche Hochfrequenzantriebe erreichen bei vertretbarem Gewicht einen interessanten Leistungsbereich. Stromzuführungen können in einem Werkzeugwechselsystem leicht gesteckt werden. Die Energiekosten sind geringer als bei Pneumatikmotoren und der Umgang ist einfacher als bei Hydraulikantrieben.

Als sehr zuverlässig haben sich **Hochfrequenzantriebe** erwiesen, die für den Robotereinsatz konzipiert wurden (Fabrikat FEIN Robot). Mit diesem Antrieb lassen sich zufriedenstellende Vorschubgeschwindigkeiten und Abtragsleistungen erreichen¹⁾.

Als Antrieb für einen Schlagmeißel hat sich ein **Meißelhammer** (Fabrikat WACKER) bewährt, der praktisch ohne Änderung an der Maschine eingesetzt wird, obwohl er für den Handbetrieb konstruiert wurde. Eine Leistungssteigerung im Meißelantrieb wird kaum Zeitersparnis bringen.

6.3.3 Werkzeugwechsel

Bearbeitungszentren verfügen über große Werkzeugvorräte. Jeder Bohrungsdurchmesser benötigt ein eigenes Werkzeug. Die Schnittstelle ist dort ein genormter Spannschaft. Die Werkzeugmagazine verfügen über Freiheitsgrade um einen schnellen Werkzeugwechsel zu ermöglichen. Die Span zu Span Zeit wird durch einen Doppelgreifer sehr kurz (< 10 sec). In manchen Roboteranwendungen werden in den Roboterhänden Vorrichtungen montiert, die Revolverköpfen von Drehmaschinen gleichen. Damit können verschiedene Werkzeuge oder Greifer sehr schnell bereitgestellt werden (< 2 sec). Dieses Vorgehen funktioniert

¹⁾ Zahlen sind hier nur schwer zu nennen, zu umfangreich sind die Randbedingungen, die gleichzeitig genannt werden müßten. Mit dem Fräsmeißel werden Vorschübe von 800 mm/sec erreicht. Dieser Wert ist die Maximalgeschwindigkeit des eingesetzten Roboters. Mit Trennscheiben lassen sich Geschwindigkeiten von ca. 5 mm/sec erreichen. Dabei kann ein Querschnitt von 50 x 50 mm getrennt werden. [Häfele 89]

allerdings nur bei Leistungsreserven des Roboters. Sonst wird das Werkzeug in einer Werkzeugablage abgelegt und ein neues Werkzeug angekoppelt. Dabei sind Energie- und Signalleitungen mit ab- und anzudocken. Die Werkzeugwechselsysteme müssen bei Energieausfall die Werkzeuge weiterhin zuverlässig festhalten. In den Ablagestationen müssen die abgelegten Werkzeuge sicher liegen. Eine Ablage in Arbeitshöhe erleichtert einen Scheibenwechsel für den Bediener.

Bei der Systemauswahl (Fabrikat Walther Präzision) war die niedrige Bauart wichtig, um den Hebelarm vom Eingriffspunkt des Werkzeugs zum Roboterflansch nicht zu groß werden zu lassen (s. Bild 35). Die Span zu Span Zeit liegt mit diesem System bei ca. 30 sec.

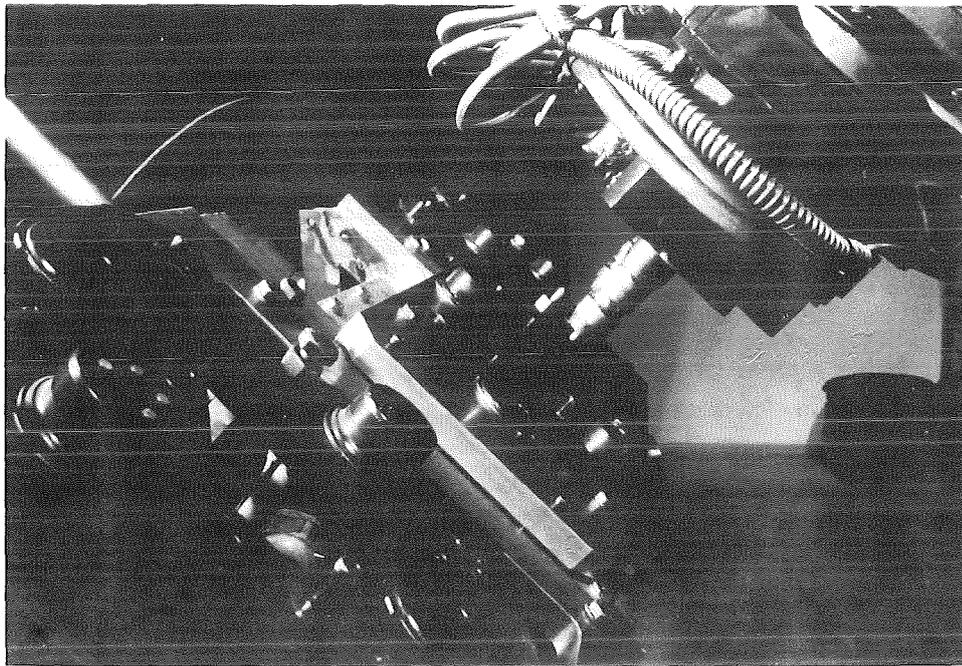


Bild 35 Werkzeugwechseinrichtung

6.3.4 Werkzeugsensorik

Das Fertigungssystem zum Gußputzen kommt während des Putzens ohne aufwendige und empfindliche Sensorik aus. Die Sensorik an der Bearbeitungsmaschine steckt in der Nachgiebigkeit. Weitere Sensorik wäre nützlich, ist aber nicht verfügbar:

- Verfügbare **Kraft-Momenten-Sensoren** haben ein ungeeignetes Verhältnis zwischen Kraft- und Momentenmeßbereich. Sie lassen praktisch keinen Hebelarm für den Kraftangriffspunkt zu. Erforderlich wären Sensoren, die die zulässigen Kräfte in etwa einem Meter Abstand vom Sensor messen können, ohne den Momentenmeßbereich zu überschreiten. Bei Überlastungen wie im Fall von Kollisionen entstehen an ihnen plastische Verformungen, die eine Erneuerung erzwingen. Diese Sensoren sind mechanisch und elektronisch anfällig. Die Meßbereiche sind nur in geringem

Maß anpassbar. Ließen sich diese Nachteile ausschalten, könnten sie als Einlernhilfe implementiert werden.

- In vielen Ansätzen zum automatischen Gußputzen wird mit einfachen Mitteln die Stromaufnahme des Werkzeugantriebs gemessen. Das läßt Rückschlüsse auf die Leistung zu. Bei erhöhter Stromaufnahme wird versucht, die Vorschubgeschwindigkeit zu verlangsamen. Dabei entstehen mehrere Probleme. Um unerwünschte Gefügeveränderungen im Werkstück zu vermeiden, muß eine Mindestgeschwindigkeit eingehalten werden. Eine Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit aufgrund eines Sensorsignals ist keine Standardfunktion von CNC-Steuerungen. Gelingt es, einen derartigen Regelkreis aufzubauen, so müssen Regelparameter gefunden werden. Ist das System zu langsam, bleibt der Antrieb trotz der Regelung stehen; ist es zu schnell, wird die Maschine ständigen Belastungen durch Geschwindigkeitsprünge ausgesetzt. Der Sensor ist zwar einfach und preisgünstig, die Anwendung jedoch schwierig.
- Bei den eingesetzten Hochfrequenzantrieben läßt sich die Drehzahl regeln. Ein induktiver Näherungsschalter 'zählt' die Schaufeln des Lüfterrads am Rotor. Damit kann der **Schlupf** des Asynchronmotors bestimmt werden, da die Erregerfrequenz bekannt ist. Der Frequenzumrichter gibt ein Warnsignal aus, wenn ein voreingestellter Schlupf überschritten wird. Die Zeitreserve ist aber zu gering, um die Roboterbewegung zu beeinflussen. Steht dieses Signal an, wird das Roboterprogramm abgebrochen. Danach ist eine Fehlerbehandlung durchzuführen.

Zur Werkzeugsensorik gehört außerdem ein Meßsystem, das den Werkzeugverschleiß mißt. Eine Möglichkeit den Verschleiß zu messen, besteht darin, die Nachgiebigkeit als tastenden Sensor zu benutzen, d.h. gegen eine bekannte Oberfläche zu fahren, bis der Endschalter anspricht und die Roboterkoordinaten mit einem Referenzwert zu vergleichen. Das Verfahren funktioniert, ist jedoch zeitaufwendig (> 30 sec).

6.3.5 Nachgiebigkeit

Ein wesentliches Element der Systemlösung ist die Nachgiebigkeit (s. **Bild 36**), die zwischen Roboterflansch und Werkzeugwechseinrichtung eingebaut ist. Sie besteht aus einer Linearführung, einem Druckluftzylinder als Feder, drei hintereinander liegenden Endschaltern und einer Versorgungseinheit über die sich der Luftdruck im Zylinder regeln läßt, im **Bild 36** unten rechts dargestellt. Die Einrichtung hat eine ganze Reihe von Aufgaben zu erfüllen.

Die Nachgiebigkeit kann als zusätzlicher Freiheitsgrad benutzt werden. Die zu bewegenden Massen vor dieser Achse sind vergleichsweise gering und Pneumatikantriebe sind schnell. Deshalb kann die Achse als Hubachse z.B. beim Meißeln eingesetzt werden. Die Sollstel-

lung der Achse liegt immer an einem der mechanischen Anschläge. Kurz vor diesen Anschlägen werden sehr robuste Endschalter betätigt. Die Stellung läßt sich so leicht abfragen. Beim Meißeln kann einer der Endschalter signalisieren, daß der Meißel den Grat durchbrochen hat. Außerdem wirkt das Druckluftpolster in Schlagrichtung dämpfend. Voraussetzung ist, daß die Meißellängsachse parallel zur Bewegungsrichtung der Nachgiebigkeit liegt.

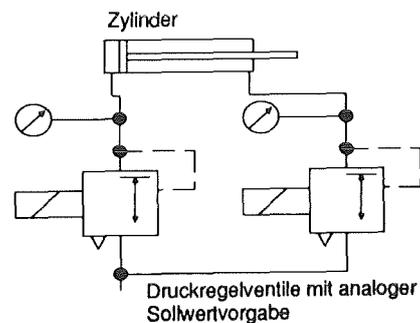
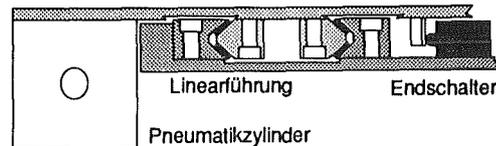
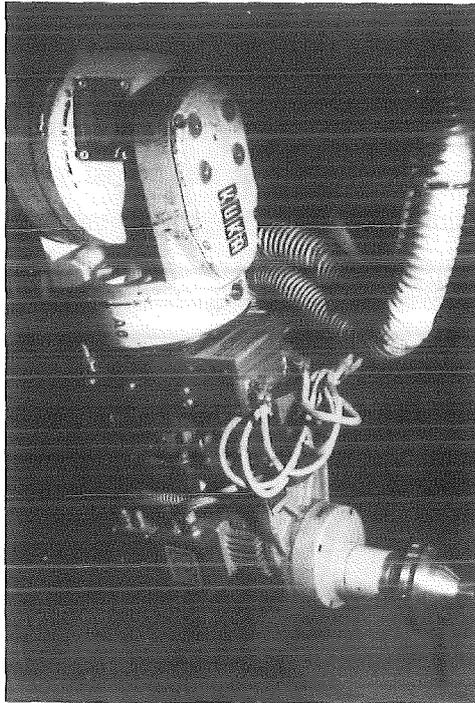


Bild 36 Nachgiebigkeit in der Roboterhand
rechts oben: Schnitt senkrecht zur Bewegungsrichtung
rechts unten: Prinzipschaltbild der Versorgungseinheit

Eine wichtige Funktion übernimmt die Nachgiebigkeit beim Schleifen. Mit hohem meßtechnischen Aufwand kann die Grathöhe und das Gratvolumen bestimmt werden. Theoretisch könnte daraus eine Schnittaufteilung abgeleitet werden, um günstige Schnittbedingungen zu erzielen. Mit der Nachgiebigkeit erübrigt sich dieser Schritt. Die Unsicherheiten und Kollisionsgefahren der automatischen Schnittaufteilung entfallen. Das Prinzip ist sehr einfach. Sollvorgabe für die Position des Bearbeitungspunktes ist der zuvor gemessene Gratfußpunkt. Beim Schleifen entstehen Passivkräfte, die das Werkzeug abdrängen. Senkrecht zur Werkstückoberfläche kann das Werkzeug ausweichen, wenn eine bestimmte Kraft überschritten wird. Diese 'Vergleichskraft' wird durch eine Pneumatikfeder aufgebracht. Pneumatikfedern gehorchen nicht dem Hooke'schen Gesetz, d.h. die Einfederung ist nicht proportional zur angreifenden Kraft. Vielmehr bleibt die Federkraft über den gesamten Federweg konstant, vorausgesetzt der Luftdruck wird nachgeregelt. Auf diese Weise läßt sich eine gewünschte maximale Passivkraft einstellen. Die Werkzeugleistung kann weitgehend ausgenutzt werden, ohne die Gefahr des Stillstands. Der Federweg ist begrenzt. Sollte im

Extremfall der rückwärtige Anschlag erreicht werden, wird dies als Fehler behandelt. Durch die Schlupfüberwachung und den Endschalter ist die Situation zu erkennen.

Hat der Grat weniger Volumen, als das Werkzeug abtragen kann, so wird die Nachgiebigkeit gegen ihren mechanischen Anschlag gedrückt. Darin liegt der Unterschied zu den oft benutzten nachgiebig gelagerten Werkzeugen. Jene Werkzeuge werden mehr oder weniger gleichmäßig am Grat bzw. Gratfußpunkt eines Musterwerkstücks entlang geführt. Die nachfolgenden Teile werden nicht vermessen. Die Nachgiebigkeit muß dort auch die Toleranzen 'kleinerer Werkstücke' auffangen. Die Sollbahn muß zwangsläufig unterhalb der Werkstückoberfläche verlaufen. Die Nachgiebigkeit muß (fast) immer eingefedert sein. Bei 'großen Werkstücken' birgt dies die Gefahr, daß das Werkzeug zu tief in das Werkstück eindringt.

Mit der Nachgiebigkeit wird, während eine Bahn abgefahren wird, ständig ein Endschalter kontrolliert, der schaltet, wenn die zulässige Restgrathöhe überschritten wird, also die Nachgiebigkeit um diesen Betrag eingefedert hat. Am Bahnende wird diese Information ausgewertet. Hat der Schalter nicht angesprochen, so ist die geforderte Qualität erreicht. Sonst wird die Bahn mit gleichen Sollwerten wiederholt. Dabei entsteht die Notwendigkeit zum Startpunkt der Bahn zurückzukehren. Ist die Nachgiebigkeit entsprechend ausgelegt, so kann dazu das Werkzeug - wie der Meißel - zurückgezogen werden. Eine kollisionsfreie Bahn ergibt sich aus der Umkehrung der Bahn in Vorwärtsrichtung. Für diese Strategie sind keine Erweiterungen der CNC-Steuerung notwendig. Reaktionen auf binäre Ereignisse sind Standard. Die Bahnen liegen von vornherein fest. Eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren dieser Strategie ist, daß das Werkzeug immer im gleichen Punkt am Umfang im Eingriff ist und die Achse der Nachgiebigkeit immer nahezu senkrecht auf der Werkstückoberfläche steht.

Die Nachgiebigkeit übernimmt die 'Kraftregelung' senkrecht zur Werkstückoberfläche. Das System ahmt das menschliche Verhalten nach. In der Theorie könnte dieses Verhalten auch regelungstechnisch erzielt werden. In der Praxis ergeben sich Stabilitätsprobleme bei hybriden Regelungen, die ohne elastische Elemente nicht lösbar sind [BROOKS]. Bei hybriden Regelungen wird z.B. versucht, auf herkömmlichen Steuerungen aufsetzend in wählbarer Richtung die Kraft zu regeln, während in den anderen Richtungen die Position geregelt wird.

[ASADA 88] untersuchte die Frage, in welchem Winkel die Nachgiebigkeit stehen sollte, und kam zum Ergebnis, daß die Bearbeitungsqualität am besten sei, wenn die Nachgiebigkeit tangential zur Werkstückoberfläche einfedert. Das trifft nur zu, wenn die Einfederung nicht beobachtet wird und das System nicht reagiert. Die Gefahr des Versagens und einer Kollision wird bei tangentialer Anstellung größer. Die gleichzeitige Verwendung als schnelle Hubeinrichtung ist nicht mehr möglich.

Ein Problem besteht darin, daß das Eigengewicht der Werkzeugantriebe mitunter höher ist, als die gewünschte Anpreßkraft. Außerdem ändert sich ständig die Orientierung der Nachgiebigkeit und damit der Anteil des zu berücksichtigenden Eigengewichtes. Deshalb muß der Luftdruck in der Pneumatikfeder nachgeführt werden. Mit vertretbarem Softwareaufwand ist ein System realisierbar, das am Startpunkt jedes neuen Bahnelements mit der dort eingestellten Orientierung, die Eigengewichtskompensation vornimmt, d.h. die passende Druckdifferenz im Zylinder bestimmt und einstellt.

Keine Maschine ist absolut steif. Bei Robotern ist die Elastizität sichtbar, wenn man kräftig an der Roboterhand rüttelt. Folglich wird die Pneumatikfeder der Nachgiebigkeit durch die Elastizität der Bearbeitungsmaschine überlagert. Diese Elastizität ist nichtlinear wegen der vielen beteiligten Bauteile, aber der Federweg steigt kontinuierlich mit steigender Kraft. Der Effekt fällt nicht ins Gewicht, wenn dieser Federweg bei gegebener Anpreßkraft deutlich unterhalb der zulässigen Restgrathöhe liegt. Ansonsten besteht bei hohen Qualitätsanforderungen die Möglichkeit, mehrstufig vorzugehen. Nachdem der Endschalter der Nachgiebigkeit nicht mehr anspricht, wird die Anpreßkraft erniedrigt und die Bearbeitung wiederholt. Spätestens wenn der Endschalter auch beim Anpreßdruck Null nicht mehr reagiert, sollte die Qualität ausreichen. In der Praxis ist diese Prozedur sehr langwierig. Fehler in der Transformation der Meßergebnisse und der Genauigkeit der Meß- und Bearbeitungsmaschinen werden dennoch zu Abweichungen führen. Günstiger ist es daher, den Startpunkt unter realen Bedingungen, d.h. mit laufendem Werkzeug, automatisch anzufahren und dem Bediener beim Einlernen die Möglichkeit zu geben, ein individuelles Zustellmaß zu definieren. Darin sind alle Fehler enthalten, auch ein Teil der Roboterelastizität. Ganz exakt läßt sich dieser Effekt nicht kompensieren, da die Zeitverhältnisse beim Einlernen andere sind als im Automatikbetrieb. Der Nachteil besteht in der Notwendigkeit einer weiteren Eingabe beim Einlernen. Eventuell muß das Programm mehrfach editiert werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Immerhin muß mit der Vermessung der Werkstücke und der Nachgiebigkeit nicht gleichzeitig die Grattoleranz, die Werkstücktoleranz und die Aufspanntoleranz über elastische Elemente kompensiert werden. Das Bearbeitungsergebnis wird deutlich besser sein, als bei den nachgiebig aufgehängten Werkzeugen.

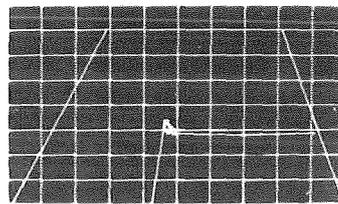
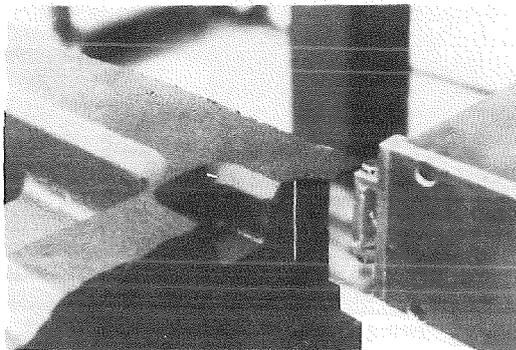
6.4 Geometriesensor

Mit dem Geometriesensor wird die Lage der Gratfußpunkte des aktuell zu putzenden Werkstückes bestimmt.

In der Koordinatenmeßtechnik werden bei hohen Genauigkeitsansprüchen messende oder schaltende Meßtaster an schweren massiven Maschinen eingesetzt. Typisch für diese Maschinen sind die roten Rubin-Tastkugeln und der schwarze Granit der Führungsbahnen. Solche Maschinen sind genau, teuer und langsam.

Am Prototyp des Fertigungssystems zum Gußputzen wird ein Laserscanner (Fabrikat OLDELFT Seampilot) eingesetzt, der über den Grat hinwegbewegt wird. Das System wurde zum Verfolgen von Schweißnähten entwickelt. Die Hardware ist robust. Die Software muß angepaßt werden. Bild 37 zeigt in der linken Bildhälfte rechts das Schutzgehäuse um den Scanner. Auf dem Werkstück ist die Scanlinie deutlich zu sehen. In der rechten Bildhälfte wird dargestellt, was der Sensor gemessen hat. Das Dreieck in der Mitte des Bildes umrandet den Grat.

Der Scanner mißt nach dem Triangulationsprinzip den Abstand vieler auf einer Linie quer zum Grat nebeneinanderliegender Punkte. Daraus kann ein Auswertalgorithmus den Gratfuß, die Gratbreite und die Grathöhe bestimmen [KOHLHEPP 90]. Randbedingung dabei ist, daß die erwartete Gratform bekannt ist. Diese Information erhält das System, wenn beim Einlernen beispielsweise mitgeteilt wird, daß ein Teilungsgrat eingelernt wird. Teilungsgrate haben ein typisches Aussehen. Dasselbe gilt für ebene Flächengrate usw.. Die Auswertung nimmt zunächst eine Datenreduktion vor, sucht verdächtige Spitzen und vergleicht die vermeintlichen Grate mit voreingestellten Vergleichswerten, wie z.B. einer maximal zulässigen Gratbreite.



Auswertung

Bild 37 Laserscanner mit aufgezeichnetem Profil und Gratfußpunkt

Der Laserscanner hat verschiedene Vorteile. Er mißt berührungslos. Die Gefahr mit dem Sensor an einem Grat hängen-zubleiben ist gemindert. Außerdem steckt in einem Scan sehr viel Information. Ein Kastenversatz zwischen unterem und oberem Formkasten kann egalisiert werden. Sandabbrüche werden erkannt. Der Gratfußpunkt kann bestimmt werden, ohne ihn direkt zu vermessen. Ein Nachteil liegt im hohen Preis und der Komplexität der Erfassungshardware und der Auswertesoftware.

Eine Alternative zum Laserscanner ist unter anderem ein eindimensional messender Taster. Insbesondere dann, wenn der Meßschritt auf der gleichen Maschine wie der Bearbeitungsschritt ausgeführt werden soll, muß diese Möglichkeit bedacht werden. Die Dichte der

Meßpunkte muß wegen des größeren Zeitaufwandes pro Punkt (ca. 2 sec) verringert werden. Beim Einlernen muß berücksichtigt werden, daß der Taster nur neben dem Grat messen kann. Ein deutlicher Vorteil eines Tasters ist die einfache Adaption an das später einzusetzende Werkzeug. Die Werkzeugbreite kann dadurch beim Messen berücksichtigt werden. Im Extremfall kann der Taster ein Dummy-Werkzeug sein, mit dem alle Kollision- und Orientierungsprobleme schnell und anschaulich gelöst werden können.

Das Fertigungssystem ist durch klar definierte Schnittstellen flexibel in Bezug auf die verwendete Geometrieerfassungssensorik.

6.5 Handhabungsmaschinen

Der Begriff Handhabungsmaschine steht als Oberbegriff für die:

- *Meßmaschine*, die den Geometriesensor über den Grat führt und die
- *Bearbeitungsmaschine*, die Werkzeuge handhaben muß.

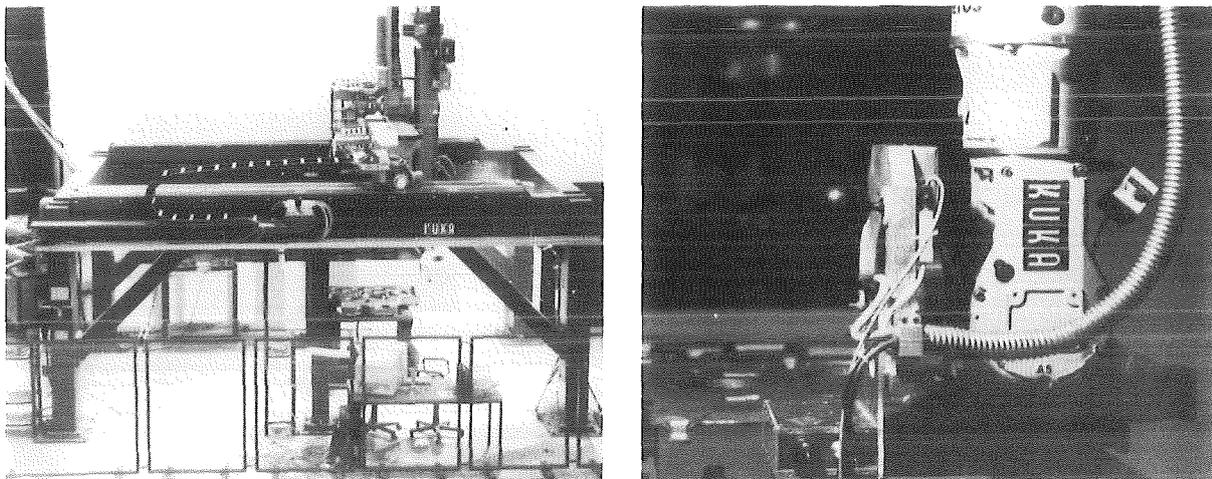


Bild 38 Der Meßroboter: Gesamtansicht und Meßroboterhand

6.5.1 Meßmaschine

Bild 38 zeigt links den ausgewählten Industrieroboter in Portalbauweise (KUKA IR 461/60.1). Die rechte Bildhälfte zeigt die Hand des Meßroboters. Am unteren Bildrand ist der Geometriesensor zu erkennen. Darüber liegt die sogenannte Sensorkugel, die zum Führen der Maschine benutzt wird. Rechts davon ist ein kleines Gehäuse mit einem Totmannschalter als Sicherheitseinrichtung zu erkennen.

Koordinatenmeßmaschinen im üblichen Sinn verfügen meist nur über drei Positionierachsen, können also ein Meßsystem nicht frei orientieren. Dieses Problem wird in der Praxis durch eine Reihe verschiedener Meßtaster kompensiert. Sie sind für den Einsatz in klimatisierten Meßräumen konstruiert. Industrieroboter können in gleicher Weise wie eine Meßmaschine eingesetzt werden. Sie sind deutlich schneller, aber auch ungenauer. Absolute Maßangaben sind mit einer größeren Meßunsicherheit zu versehen. Die Wiederholgenauigkeit von Robotern ist besser als die zulässige Restgrathöhe. Da das Problem auf eine Vergleichs- bzw. Differenzmessung reduziert werden kann, ist die Genauigkeit ausreichend.

Das Gewicht des Meßsystems und des Joysticks an der Hand des Meßroboters ist gering. Gleiches gilt für die Kraft, die der Bediener auf den Joystick ausübt. Auswahlkriterium ist der Arbeitsbereich. Bei sehr großen Werkstücken bietet der Markt keine Alternative zu Portalrobotern. Die Vorteile dieser Bauweise sind:

- Die Auswahl ist groß.
- Die Achslängen können individuell angepaßt werden.
- Ein Portal ist leicht überschaubar. Die kartesische Bauweise entspricht den menschlichen Denkmustern. Dies ist ein wichtiger passiver Sicherheitsaspekt.
- Die Bauart vermeidet Schereneffekte und die Umklammerungsgefahr anderer Roboterkinematiken. Dies ist bei der angestrebten Programmiermethode von großer Bedeutung.
- Der Fußboden bleibt frei.

6.5.2 Bearbeitungsmaschine

Das Problem der unsicheren Absolutgenauigkeit des Meßroboters läßt sich am einfachsten umgehen, wenn Meß- und Bearbeitungsmaschine identische Maschinen sind. Dies spricht für einen Roboter als Bearbeitungsmaschine. Dagegen stehen Aussagen, daß die Roboter nicht steif genug seien. Im Bild 39 ist links der Aufbau der Bearbeitungsmaschine zu erkennen.¹⁾ Die rechte Bildhälfte zeigt die Hand des Putzroboters beim Bearbeiten eines Achsgehäuses.

Die Wahl fällt beim Bearbeitungsroboter nicht allein wegen des Arbeitsbereiches und der Sicherheitsaspekte für den Bediener auf ein Portal. Das Bearbeitungsprogramm muß immer neu an die aktuelle Istgeometrie adaptiert werden. Dabei kann nicht ausgeschlossen werden, daß das n-te Werkstück so verdreht ist, daß die Roboterstellung in einem Punkt einer Singularität nahekommt. Singularitäten sind Roboterstellungen, in denen zwei Achsen aufeinander fallen. Die Transformationen sind in der Nähe dieser Punkte mehrdeutig. Die Ro-

¹⁾Auf dem Foto sind die oben liegenden Führungsschienen und Zahnstangen noch zu erkennen. Im fertig montierten Zustand sind die meisten Führungen gekapselt.

boter führen dort mitunter unkontrollierte oder schwer vorhersehbare Bewegungen aus, obwohl bzw. weil Robotersteuerungen zur Überwindung dieser Problemstelle eine Sonderbehandlung einführen. Das Problem existiert abgeschwächt auch bei Roboterportalen mit Eulerhand.

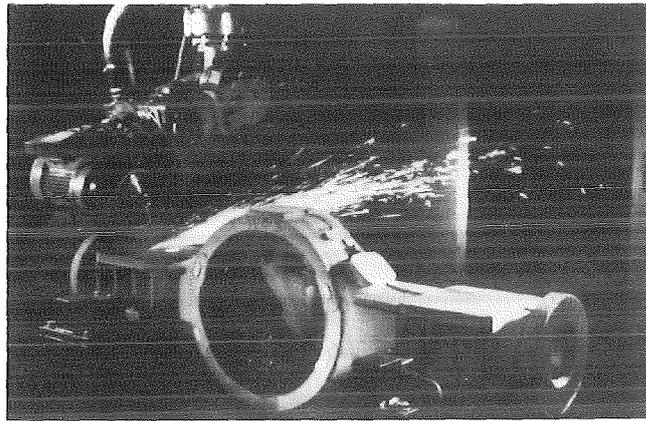
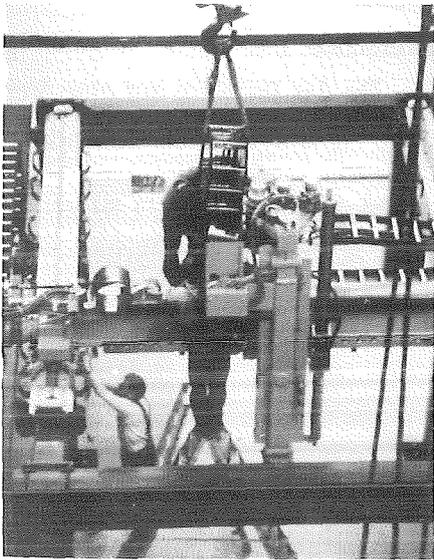


Bild 39 Die Bearbeitungsmaschine während des Aufbaus und beim Putzen eines Achsgehäuses

Die Suche nach Alternativen zum Industrieroboter ergibt, daß eine wirtschaftliche Lösung nur schwer zu erreichen ist. Eine Neukonstruktion für die Bearbeitungsmaschine ist nicht sinnvoll, dazu ist der Markt zu klein. Da die Kastenformate der Gießereien unterschiedlich sind, müßte die optimale Maschine immer angepaßt werden. Die Entwicklungskosten wären sehr hoch.

Eine Fräsmaschine entsprechender Größe ist für das Gußputzen allein, ohne Erweiterung der Aufgabenstellung zu teuer. Den Beweis erbringen alle Gießereien, die das eigene Haus beliefern. Dort fehlen nicht die Bearbeitungsmaschinen und die NC-Programmierer. Die Gründe liegen teilweise in den Organisationsstrukturen und in Kommunikationsmängeln. Aber auch technische Probleme behindern die Verlagerung des Problems. Nicht immer hilft beispielsweise das Ausmessen der Aufspanntoleranz weiter, weil die Bearbeitungsmaschinen aus Gründen der Steifigkeit meist nur wenige Freiheitsgrade haben (≤ 5 Achsen) und Verdrehungen gar nicht kompensieren können. Also muß die Aufspannung stimmen. Die Werkstücke müssen in einem vorgeschalteten Bearbeitungsschritt geputzt werden. In dem Fertigungssystem zum Gußputzen ist der Bearbeitungsroboter gegen eine sechssachsig Fräsmaschine austauschbar, falls eine solche Maschine existiert.

6.6 Steuerungen

Beide Roboter werden mit einer Robotersteuerung (Fabrikat AEG robot-control r500) betrieben.¹⁾ Die Steuerung muß Schnittstellen zu anderen Rechnern, Sensorschnittstellen und interne Steuerungsfunktionen bieten.

Die Steuerung muß **binäre Signale** (Ein/Ausgänge) lesen und setzen können. Als Reaktion auf ein binäres Ereignis muß an vorgegebener Stelle im Programm ein Sprung möglich sein. Ein Interrupt ist nicht nötig. Die Endschalter der Nachgiebigkeit werden beispielsweise im Roboterprogramm ausgewertet.

Die Steuerung muß über eine **DNC-Schnittstelle** mit folgenden Optionen verfügen:

- Programme laden,
- Programme starten, (Die Programme müssen außerhalb der Steuerung generierbar sein)
- Istposition des Roboters erfragen,
- Umschalten zwischen Hand- und Automatikbetrieb,
- Auswahl des Koordinatensystems,
- Fehlerreset und das
- Umsetzen des TCP (Tool Center Points) auf den aktuellen Wert.

Das Verfahren mit dem Joystick erfordert eine Schnittstelle, die zyklisch neue Positions- und Orientierungswerte übergibt, denen der Roboter in einer Schleife folgt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Handverfahrtasten zu emulieren. Dort wird ein Geschwindigkeitssollwert vorgegeben. Die verwendete Steuerung verfügt über eine sogenannte **Sensorkugelschnittstelle**, eine serielle Schnittstelle mit entsprechendem Protokoll. Um mit dem Joystick bzw. der Sensorkugel auch Orientierungen intuitiv vorgeben zu können, muß die Bahnplanung in Werkzeug-Koordinaten verfahren können. Das sind Positionsbeschreibungen in einem in der Roboterhand befestigten 'Werkzeugkoordinatensystem'. Außerdem muß sich der Roboter im Roll-Nick-Gier-System orientieren lassen.

Um flexibel auch bezüglich der Steuerung zu bleiben, ist die Software zur Bedienung dieser Schnittstellen streng getrennt von der Bedienoberfläche.

6.7 Zellenrechner und Kommunikation

Jeder Steuerung ist ein Rechner übergeordnet, der die Kommunikation abwickelt. Das System benötigt einen Server für das Rechnernetz. Während des Einlernens läuft das Oberflä-

¹⁾KUKA-Roboter werden mit SIEMENS-Steuerungen ausgeliefert. Der Einsatz von AEG-Steuerungen hat nichts mit fehlenden Optionen der SIEMENS-Steuerung zu tun.

chenprogramm zur Kommunikation mit dem Bediener auf dem Teach-PC. Während des Automatikbetriebs kann dieser Rechner beispielsweise Meßdaten auswerten oder Putzprogramme generieren.

Das Rechnernetz ist leicht ausbaufähig. Erweiterungen sind problemlos möglich. Die Rechner sind allesamt IBM kompatible PCs mit 80386-Prozessor und 80387-Koprozessor. Der benutzte Bildschirmmodus entspricht dem EGA-Standard. Speichererweiterungen werden benutzt, um die Netztreiber in das sogenannte 'upper memory' zu laden. Damit entsteht im direkt adressierbaren Bereich Speicherplatz für den Debugger.

Geschwindigkeitssteigerungen lassen sich durch einen Massenspeicher mit kürzeren Zugriffszeiten im Server erreichen. Das 'normale' Kommunikationsmedium für alle Rechner ist ein 3COM Netzwerk mit 3+Open Treibersoftware. Die Kommunikation erfolgt über global zugängliche Dateien, die vom Server verwaltet werden. Nachrichten werden wie normale Schreib-Lese-Operationen ausgetauscht [*3COMa*].

Zum Fahren des Putzroboters über den Joystick am Meßroboter wird eine realzeitfähige Schnittstelle zwischen Meß-PC und Putz-PC benötigt. Die schnelle Kopplung erfolgt auf Netbios Ebene, ohne Umweg über den Server [*3COMb*, *HOGAN 88*, *MELLEIN 90*].

6.8 Weitere Komponenten

Für den industriellen Einsatz müssen eine Reihe von Details gelöst werden.

Die Sicherheitseinrichtungen bestehen aus einer Kapselung des Bearbeitungsroboters aus kugelsicherem Glas und einer stabilen Wandkonstruktion. Berstende Schleifscheiben und herumfliegende Gratstücke müssen von dieser Umhausung zurückgehalten werden [*DSA 201*]. Außerdem werden die Zutrittstüren mit Endschaltern versehen. Das Öffnen der Türen bei laufendem Betrieb löst einen Notstop aus [*VDI 2853*].

Der Meßroboter muß im Automatikbetrieb ebenfalls unzugänglich sein. Dazu genügen Gitter. In einer Gußputzerei, in der weiterhin manuell geputzt wird, ist jedoch auch für den Meßroboter eine komplette Kapselung vorzusehen.

Die Maschinen müssen versorgt und entsorgt werden. Die Versorgung mit Druckluft stellt keine allzu hohen Anforderungen. Bei Störungen des Stromnetzes fallen manchmal die Rechner aus. Deshalb sind unterbrechungsfreie Stromversorgungen für die Rechner erforderlich. Das Abluftproblem ist gegenüber den Handarbeitsplätzen entschärft. Die Lüfter für die Elektronik müssen saubere Luft ansaugen und regelmäßig gewartet werden. Schwierig ist die Entsorgung des abgetrennten Materials. Kleinere Stücke werden überall herumfliegen. Nur bei Serienteilen ist der Aufwand für Fangbleche und ähnliches gerechtfertigt. Bei wechselndem Putzprogramm dürfen solche Teile weder beim Roboter noch beim Trans-

portsystem zu Störungen führen. Die Werkzeuge in der Ablage müssen abgedeckt werden. Abgetrennte Speiser und Anschchnittsysteme müssen zuverlässig weggeräumt werden. Eine Lösung ist eine in die Aufspannvorrichtung integrierte Blechwanne, die solche Teile auf fängt. Von dort müssen sie von einem Bediener weggeräumt werden. Eine solche Wanne gefährdet jedoch die Zugänglichkeit in der Nacharbeitsstation. Diese Problematik läßt sich nur individuell lösen.

Erhebliche Detailarbeit steckt in der Verkabelung und den Systemen auf der Ebene der Kontaktlogik. Notausschalter, Schlüsselschalter für Verriegelungen der Betriebsarten, Bedienelemente zum manuellen Werkzeugstart, Totmannschalter und vieles mehr muß verkabelt werden. Alle diese Leitungen sind in einem zentralen Schaltschrank zusammengefaßt. Die Verbindung für den Totmannschalter an der Hand des Meßroboters wird beispielsweise über rund ein Dutzend Stecker geführt, bevor das Totmannsignal an beiden Steuerungen anliegt.

Ein Element, das die Verfügbarkeit der Anlage negativ beeinflußt ist die Kabelführung entlang der Freiheitsgrade in der Roboterhand. Zuverlässige Lösungen ohne Einschränkung der Bewegungsmöglichkeiten existieren nicht. Der einzige Ausweg ist eine vorbeugende Wartung und ein Kabelsystem, das sich im Falle einer Störung schnell auswechseln läßt.

Zum Einlernen wird ein Joystick (BASYS-Sensorkugel) benutzt, der in sechs Freiheitsgraden Kräfte und Momente bzw. Verschiebungen und Verdrehungen mißt. Zwischen Joystick und Robotersteuerung werden die Signale im Meß-PC vorverarbeitet. Die Hard- und Software des PC's kann auf unterschiedliche Joysticks angepaßt werden.

Wegen der Größe des Arbeitsbereiches ist ein sinnvolles Arbeiten mit der Bedienoberfläche des Teach-PC nur möglich, wenn Monitor und Tastatur zum Standort des Bedieners gebracht werden können.

Rechenprogramme steuern, benutzen und koordinieren diese Hardware Systembausteine. Sie vereinfachen und ermöglichen die Bedienung dieses umfangreichen Fertigungssystems. Nach der Beschreibung der Software-Realisierung wird die Frage nach dem Leistungsvermögen des Fertigungssystems beantwortet.

7 Software-Realisierung

Die Software umfaßt circa 50000 Zeilen Programm-Quelltext. Die Grundsätze der Software-Realisierung waren:

- einheitliche Programmiersprache: PASCAL
- einheitliches Betriebssystem: DOS
- Strukturierung der Software: Programmbibliotheken.

Dadurch wird das System:

- besser überschaubar,
- erweiterbar und
- wartungsfreundlich.

Hier können nicht alle Programme beschrieben werden. Einige Aspekte werden herausgegriffen:

- die Ablaufsteuerung,
- ein Beispiel für das Einlernen eines 'ebenen Teilungsgrates',
- einige Beispiele für Softwarebibliotheken.

7.1 Ablaufsteuerung

In einem Fertigungssystem können Werkstücke unterschiedlichen Bearbeitungsschritten unterzogen werden. Das erfolgt in loser Reihenfolge. Es entsteht ein Chaos an kleinen Teilaufträgen, das von der Ablaufsteuerung organisiert werden muß.

Die Ablaufsteuerung hat eine Reihe von Aufgaben:

- Verwaltung der Werkstücke,
- Verwaltung der Ablaufpläne,
- Verwaltung der Teilaufträge und
- Verwaltung der Warteschlangen.

Jedes Werkstück, das in die Anlage eingeschleust wird, muß identifizierbar sein. Wenn die Werkstücke auf Umlaufpaletten aufgespannt werden, existiert eine bekannte Anzahl von Paletten, die durchnummeriert wird. Nach dem Aufspannen des Werkstücks wird die Werkstücknummer einer Palettennummer zugeordnet. Diese Zuordnung wird nach vollendeter Bearbeitung wieder aufgehoben. Damit wird aus einem Werkstück, das einem Los angehört, ein Individuum. Die Daten, die einem Werkstücktyp zuzuordnen sind und sich zwischen den einzelnen Individuen nicht unterscheiden, werden nach Werkstücktypgesichtspunkten geordnet. Individuelle Daten können der Palettennummer zugeordnet werden. Sie

haben nur temporären Charakter und werden am Ende gelöscht. Erhaltungswürdige Daten werden in Dateien des Werkstücktyps gesammelt.

Mit jedem neuen Werkstück muß dem Fertigungssystem ein Auftrag gegeben werden. Dieser ist in Teilaufträge unterteilbar. Die Ablaufsteuerung hat die Aufgabe, diese Aufträge zum richtigen Zeitpunkt von den richtigen Instanzen ausführen zu lassen. Als Informationsgrundlagen dienen zwei Dateien, die einer Palette zugeordnet sind. Der Ablaufplan enthält die Liste der Teilaufträge.

Es existieren zwei Klassen von Aufgaben. Bevor ein Werkstück nicht in die Meßstation transportiert wurde, kann nicht gemessen werden. Manche Aufträge sind seriell auszuführen. Beim Abtransport des Werkstücks aus der Meßstation kann hingegen mit der Auswertung der Meßergebnisse begonnen werden. Solche Aufträge können parallel bearbeitet werden. Die Aufträge sind im Ablaufplan entsprechend markiert. Es gibt die Möglichkeit, auf die Abarbeitung paralleler Aufträge zu warten. Die Aufträge werden entsprechend mit Marken gekennzeichnet.

Manche Ablaufschritte müssen auf bestimmten Rechnern abgearbeitet werden, weil sie z.B. bestimmte Schnittstellen voraussetzen. Andere können überall gerechnet werden. Während der Meßvorgang des Meßroboters mit dem Geometriesensor nur vom Meß-PC ausführbar ist, kann die Auswertung der Meßergebnisse auf jedem Rechner laufen. Also müssen die Aufträge im Ablaufplan gekennzeichnet werden. Schließlich müssen für die Programme oft Parameter bereitgestellt werden, die der Ablaufplan ebenfalls enthalten kann.

```
REPEAT
# Probelauf des Rohmeßprogrammes
L r:\v2\R_Probel.exe %W\split.use %W\ U:\init\redukt2.ini
# Scanauswertung
L r:\v2\sc_au_s_k.exe %W\split.use U:\init\is_std.req U:\init\is_std.par
# Scanaddition
L r:\v2\sc_add_k.exe %W\split.use %W\Statis.tik NOT_Vorsicht not_Ble...
# Luftpunkte am Beginn von Liniengratelelementen beseitigen
L r:\v2\aufsitz.exe %W\split.use %W\
# Toleranzschläuche um Punkte legen
L r:\v2\s_Redukt.exe %W\split.use red11.ini red22.ini %W\
# Grafikeditor
L r:\v2\manipuli.exe %W\split.use
# Code erzeugen
L r:\v2\d_scan_a.exe %W\split.use
# Probelauf des Automatikbetriebes
L r:\v2\M_Auto.exe %W\split.use %W\ &P\
UNTIL $1 <> 55
# Schleifen-Ende
```

Bild 40 Auszug aus einem Ablaufplan

Die zweite Datei enthält die Verwaltungsdaten. Dazu gehört ein Zeiger, der auf die Stelle im Ablaufplan zeigt, die gerade bearbeitet wird. Andere Verwaltungsdaten werden benö-

tigt, um auf das Ende paralleler Aufträge warten zu können oder zur Realisierung von FOR-Schleifen und IF-THEN- ELSE-Konstruktionen.

In **Bild 40** ist ein Ausschnitt aus einem Ablaufplan gezeigt. Mit diesem Ablaufplan kann ein Meßprogramm verändert werden. Das 'L' in der ersten Spalte steht als Symbol für den Teach-PC. Dort müssen alle Aufträge des Beispiels nacheinander bearbeitet werden. Dem 'L' folgt der Name des Programms, das gestartet werden soll. Nur dem letzten Auftrag wird mit der '1' eine Marke zugeteilt. Hinter den Programmnamen stehen optional Parameter, die von den Programmen eingelesen werden. '%W' und '%P' sind Platzhalter für Verzeichnisnamen. Sie werden bei der Auftragserteilung ersetzt. Die Programme übergeben am Schluß eine Endekennung an die Ablaufsteuerung. Normalerweise wird die Endekennung benutzt um Laufzeitfehler anzuzeigen. Im Beispiel wird die Schleife solange wiederholt, bis das Programm mit der Marke '1' nicht mehr mit der Endekennung '55' beendet wird. Das ist dann der Fall, wenn der Anlagenbediener den Automatikbetrieb freigibt. Das Zeichen '#' leitet einen Kommentar ein.

Insbesondere beim Einlernen neuer Programme ist a priori nicht klar, welche Schritte in welcher Reihenfolge und wie oft auszuführen sind. Die Bedienoberfläche benötigt beispielsweise häufig die aktuelle Position des Meß- und des Bearbeitungsroboters. In diesem Fall sind drei verschiedene Rechner in Aktion. Vom Teach-PC, an dem der Bediener durch entsprechende Eingaben eine bestimmte Aktion auslöst, werden dynamisch Aufträge generiert. Diese Aufträge müssen von den Adressaten empfangen werden. Dazu werden Warteschlangen eingerichtet. Bei den Warteschlangen handelt es sich um jeweils ein Unterverzeichnis pro Warteschlange mit jeweils einer Datei pro Auftrag. Beim Eintrag eines Auftrags erhält der Auftrag eine eindeutige Kennung und eine Priorität. Dies spiegelt sich im Dateinamen wieder (Kennung.Priorität). Nach Beendigung eines Auftrags wird in der sogenannten 'ok-Warteschlange' eine Datei (Kennung.ok) erzeugt, die dem Auftraggeber das Ende des Auftrags anzeigt. Diese Fertigmeldung enthält gegebenenfalls auch Fehlernachrichten.

Neben den eben beschriebenen 'Privaten-Warteschlangen', die einem bestimmten Rechner zugeordnet sind, dient die sogenannte 'Allgemeine-Warteschlange' allen Rechnern. Hier können Aufträge eingetragen werden, die keine besonderen Hardwareansprüche stellen, oder die ganz niedrige Priorität besitzen. Alle parallelen Aufträge der Ablaufpläne werden über diesen Umweg gestartet. Die Auftragsnummern werden dabei in der Verwaltungsdatei gesichert, um in Wartepositionen die 'ok-Warteschlange' abfragen zu können.

Die Daten werden zentral gespeichert. Alle Rechner am Netz haben Zugriff auf diese Daten. Um eine Aktion auszulösen, ein Programm zu starten, wird auf jedem Rechner ein Programm installiert, das den Systemkern bildet (s. **Bild 41**).

Dieses Programm sieht zuerst in der 'Privaten-Warteschlange' nach, ob ein Auftrag vorhanden ist; danach wird geprüft, ob der dem betreffenden Rechner zugeordnete Ablaufplan¹⁾ im nächsten Schritt einen ausführbaren Auftrag enthält. Ist auch dies nicht der Fall, wird in der 'Allgemeinen-Warteschlange' weitergesucht. Schließlich wird der Tastaturpuffer abgefragt. Ist der Puffer nicht leer, wird die Schleife unterbrochen. Sonst wird zurückgesprungen, um erneut die 'Private-Warteschlange' zu prüfen.

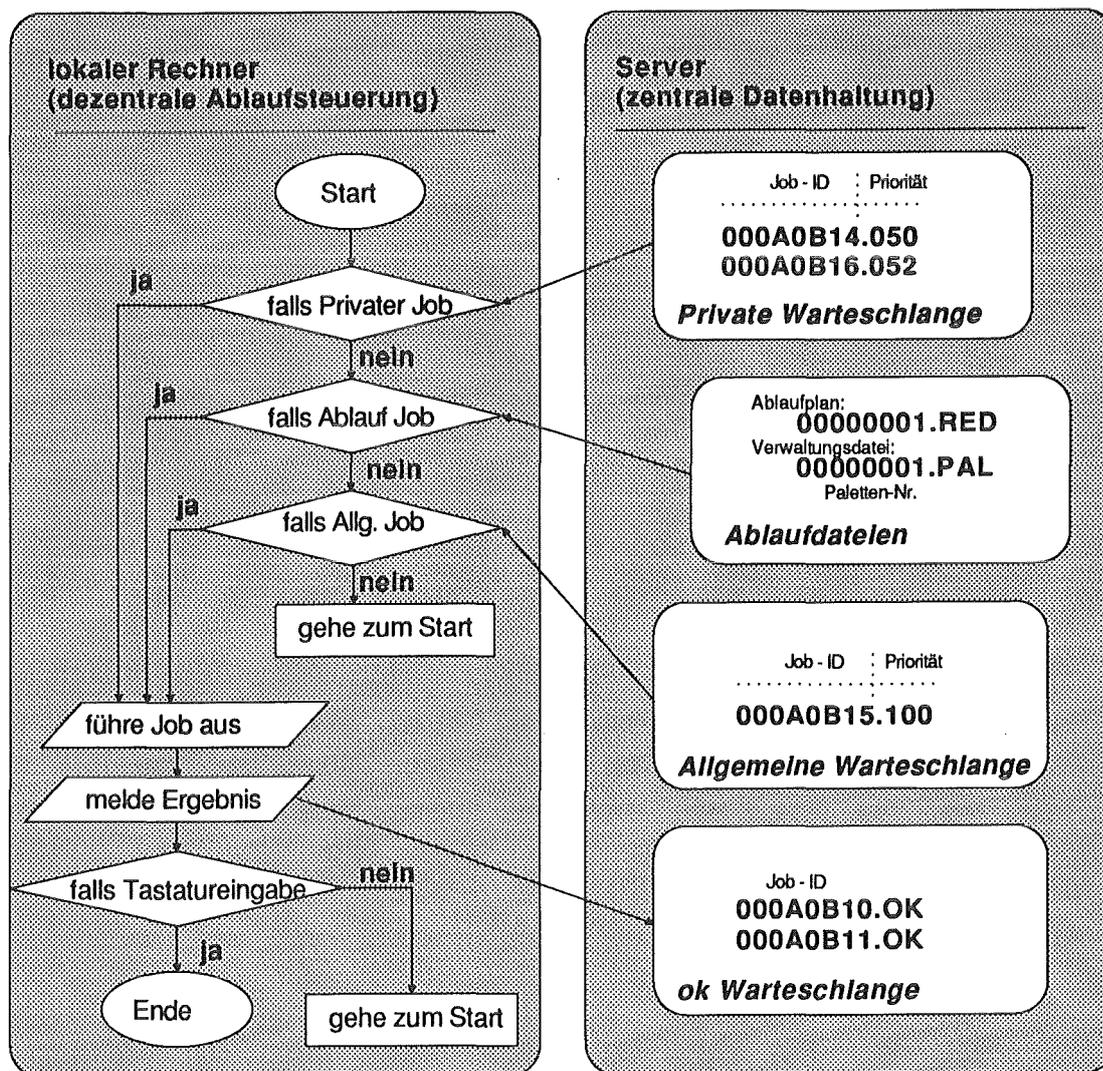


Bild 41 Systemkern: dezentrale Ablaufsteuerung mit zentraler Datenhaltung

Sobald ein Auftrag gefunden ist, wird dieser gestartet. Erst wenn der Auftrag abgearbeitet, das Ergebnis abgespeichert ist, wird die Suchaktion wieder in der 'Privaten-Warteschlange' begonnen. Mit der 'Endekennung' der aufgerufenen Programme kann der Ablauf gesteuert

¹⁾Der Ablaufplan wird dem Rechner zugeordnet, wenn eine Palette in der entsprechenden Arbeitsstation identifiziert wurde.

werden. Ein Schritt kann wiederholt ablaufen. Im Fehlerfall kann die Ablaufdatei abgebrochen werden. Das Werkstück wird dann aus der Anlage ausgeschleust.

Dieses System verarbeitet keine Unterbrechungen (Interrupts), d.h. ein anderes Programm kann nur gestartet werden, nachdem das vorherige beendet wurde. Das kann zu langen Wartezeiten führen, wenn z.B. die Bedienoberfläche eine Istposition abfragt, der beauftragte Rechner aber noch beschäftigt ist. Dem kann begegnet werden, indem die einzelnen Aufträge kurzgehalten werden. Sehr zeitkritische Kommunikation läßt sich nicht realisieren. Das System ist sehr ausfallsicher, weil alle Daten in Dateien abgelegt werden. Das kostet Zeit, Massenspeicher sind langsam.

Die Vorteile überwiegen. Die Gliederung des Softwaresystems in kleine eigenständige Module schafft klare Schnittstellen. Einzelne Teile können in den Ablaufplan aufgenommen oder gestrichen werden, ohne das Gesamtsystem zu gefährden. Das Rechnernetz kann erweitert werden. Die Rechnerkapazität läßt sich fast beliebig ausbauen und durch die parallelen Schritte in den Ablaufplänen auch nutzen. Durch die dezentrale Steuerung erhalten die Stationen ein hohes Maß an Eigenständigkeit. Das Konzept ist einfach und es ist leicht realisierbar.

7.2 Aufgabenorientierte Programmierung

Die aufgabenorientierte Programmierung läßt sich am einfachsten an einem Beispiel erklären. Am ebenen Teilungsgrat wird untersucht und gezeigt, wie der Gußputzprozeß abläuft, welche Daten benötigt werden und wie diese Daten und Informationen bei der aufgabenorientierten Programmierung gesammelt und verwaltet werden.

7.2.1 Einlernen und Bearbeiten eines Putz-Bahnelements

Im **Automatikbetrieb** entspricht ein Teilungsgrat-Bahnelement einer Bahn entlang den Gratfußpunkten eines Teilungsgratabschnitts, der mit einem Werkzeug bearbeitet wird. Die Kollisionsverhältnisse sind beim Messen andere als beim Bearbeiten. Im allgemeinen wird der Bediener beim Einlernen des Meßprogrammes die Frage, welche Werkzeuge später eingesetzt werden, nur unzureichend berücksichtigen. Ausgangspunkt für ein Bahnelement des Putzprogrammes sind die Bahnelemente des Meßprogrammes, allerdings nicht in einer Eins zu Eins Abbildung, sondern häufig stark verändert. Diese Änderungen und die Einfügungen von Werkzeugwechseln etc. in das gesamte Putzprogramm müssen im Betrieb der Anlage ständig automatisch nachvollzogen werden. Von der Vermessung der Werkstücke wird im Einlern- und im Automatikbetrieb die gleiche Informationsbasis zur Verfügung

gestellt. Deshalb müssen alle Bedieneingaben abgespeichert werden, die während der Einlernphase die Datenstrukturen verändern.

Wird Grat abgeschliffen und spricht dabei der Endschalter der Nachgiebigkeit an, dann soll das Bahnelement ein weiteres Mal überschliffen werden. Außer der Vorwärtsbahn wird dazu ein Rückzugsweg benötigt, der den Roboter wieder zur Startposition zurückbringt (s. Bild 42). Um günstige Eingriffsbedingungen des Werkzeugs zu gewährleisten, wird beim Rückzug nicht bearbeitet. Die Start- und Endpunkte des Bahnelements müssen oberhalb der Werkstückoberfläche liegen, damit die Werkzeuge problemlos ein- und ausgeschaltet werden können. Dies könnte durch Umsteuern der Nachgiebigkeit erreicht werden. Zusätzliche Bahnpunkte sind jedoch flexibler. Auch der Rückzugsweg wird durch unabhängige Bahnpunkte beschrieben und kann einen beliebigen Pfad einschlagen.

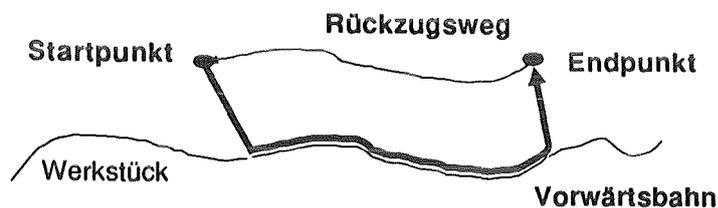


Bild 42 Die Elemente eines Putz-Bahnelements

Bild 43 zeigt den Ablauf im Automatikbetrieb. Aus Sicherheitsgründen wird vor der Abarbeitung geprüft, ob die Startvoraussetzungen erfüllt sind, ob z.B. der Roboter wirklich da steht, wo ihn die Software erwartet. Nach jeder Bahn wird kontrolliert, ob das Bahnende erreicht wurde. Das Werkzeug wird ein- und ausgeschaltet. Bevor der erste Schliff ausgeführt werden kann, ist der Druck in der Nachgiebigkeit einzustellen und der TCP des aktuellen Werkzeugs unter Berücksichtigung des Verschleißzustands zu aktivieren.

Zunächst wird im Einlernprozeß dafür gesorgt, daß der Bearbeitungsroboter das richtige Werkzeug in der Hand hält. Die Anlage soll verschiedene Werkstücke in beliebiger Reihenfolge bearbeiten können. Daher ist unklar, ob das zuletzt benutzte Werkzeug beim folgenden Werkstück zuerst eingesetzt werden soll. Zu Beginn der Einlernphase wählt der Bediener das erste Werkzeug. Auch wenn das bereits angeflanschte Werkzeug gewählt wird, wird der Werkzeugwechsel eingelernt. Im Automatikbetrieb wird in diesem Sonderfall der Werkzeugwechsel übersprungen.

Für den Werkzeugwechsel wird der Menüpunkt 'Werkzeugwechsel' ausgewählt. Bild 44 gibt den Ablauf des Werkzeugwechsels wieder. In der Liste der vorhandenen Werkzeuge wird mit den Cursor-Tasten ein Werkzeug ausgesucht. Der Bediener drückt den Totmannschalter, ohne den sich der Roboter nicht bewegen läßt und der Roboter fährt senkrecht nach oben. In sicherer Position oberhalb des Werkstücks fährt er zur Werkzeugablage, legt das Werkzeug ab, holt das neue Werkzeug und kehrt in gleicher Weise zum Ausgangspunkt

zurück. Nur wenn Kollision droht, läßt der Bediener den Totmannschalter los. Der Roboter bleibt stehen. Danach kann der Bediener eine beliebige Bahn einlernen. Er bedient sich des Joysticks am Meßroboter, der zuvor automatisch in die Orientierung des Putzroboters gefahren wird. Am Ende der eingelernten Bahn wird die Prozedur im Automatikbetrieb fortgesetzt.

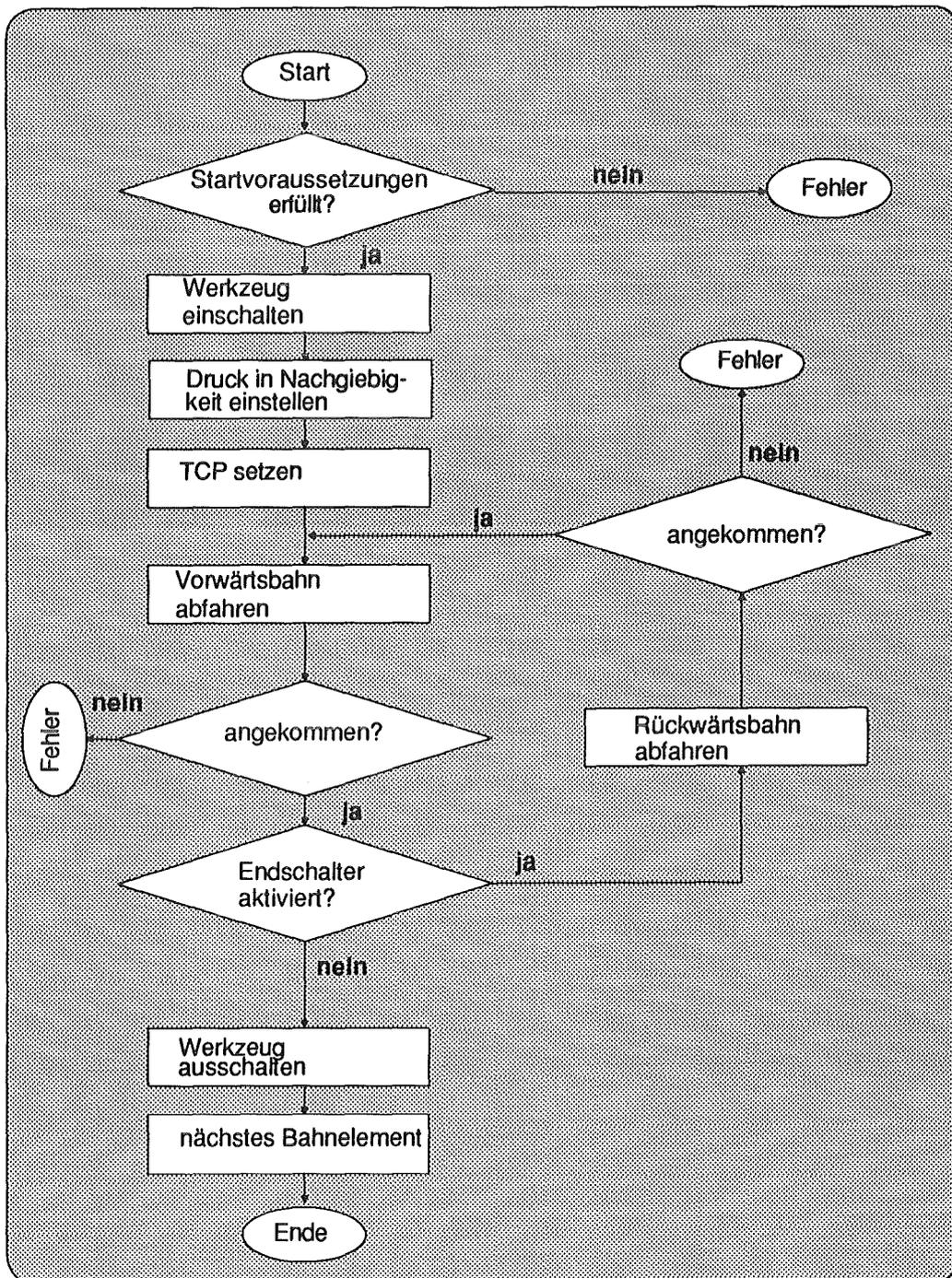


Bild 43 Ablauf des Automatikbetriebs beim Putzen eines Teilungsgrat-Bahnelementes

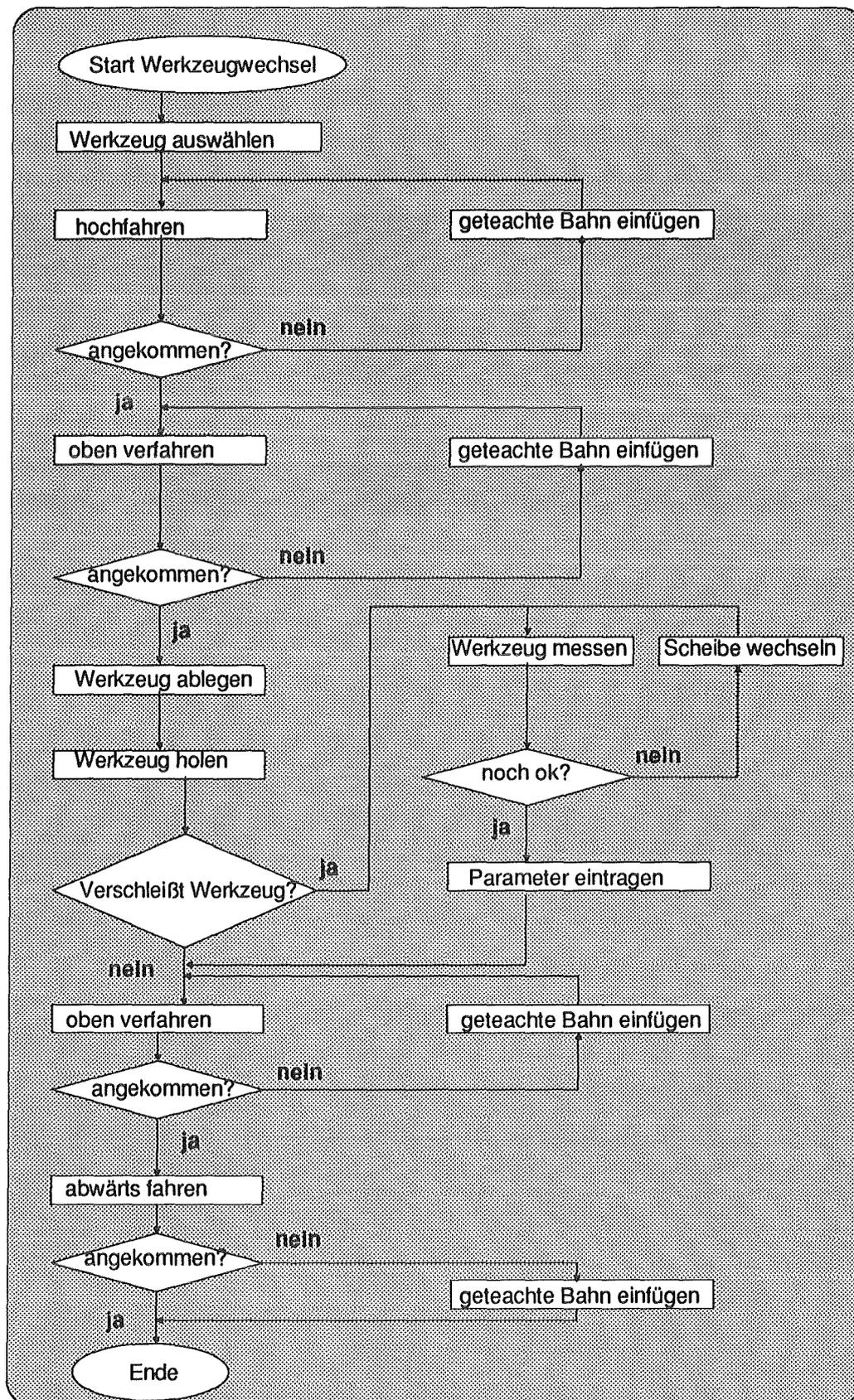


Bild 44 Ablauf eines Werkzeugwechsels

Mit der Menüoption 'Programm (weiter) ausführen' fährt der Roboter auf den Bahnen des Meßprogramms, die zuvor in den Koordinatenraum des Putzroboters transformiert und vorbereitet wurden. Die Teilungsgrat-Bahnelemente des Meßprogramms beginnen und enden nicht unbedingt oberhalb der Werkstückoberfläche. Deshalb werden die Start- und Endpunkte der Bahnelemente eingefügt. Der sicherste und einfachste Weg ist der, eine zweite Bahn oberhalb des Werkstücks zu berechnen, indem die Meßwerte des Geometriesensors um einen vorzugebenden Betrag verschoben werden. Der erste und der letzte dieser Punkte wird als Start- und Endpunkt benutzt. Die Bahn insgesamt umgedreht wird als Vorschlag für die Rückzugsbahn benutzt. Nach dieser Aktion enthält die Bahn Sprünge in den Übergängen. Sogenannte Luftbahnen, das sind Bahnen auf denen per Definitionem nicht gemessen und nicht bearbeitet wird, werden um die neuen Punkte erweitert, wobei mitunter zuvor Punkte gestrichen wurden, um die Übergänge zu glätten.

Ein Teilungsgrat-Bahnelement wird in mehreren Schritten eingelesen (s. Bild 45):

- Die Werkzeuge haben eine voreingestellte Standardorientierung. Normalerweise soll der Geometriesensor senkrecht zur Oberfläche messen. Die Werkzeugeinstellung verknüpft mit der Orientierung aus dem Meßprogramm sollte übernommen werden können¹⁾. In Ausnahmefällen kann der Bediener im ersten Schritt die Orientierung ändern, die danach beibehalten wird, d.h. die Orientierung folgt nicht mehr der Normalen zur Werkstückoberfläche.
- Im zweiten Schritt fährt der Putzroboter mit eingeschaltetem Werkzeug und eingestelltem Druck in der Nachgiebigkeit vom Startpunkt auf die Werkstückoberfläche. Wird der Totmannschalter vorzeitig losgelassen, bleibt der Roboter stehen. Der Bediener wird gefragt, ob die Zustellung geändert werden soll. Es besteht damit die Möglichkeit, die Bahn insgesamt zu verschieben. Macht der Bediener davon Gebrauch, so wird der Meßroboter in die Orientierung des Putzroboters gebracht. Der Putzroboter läßt sich über den Joystick in der Position verändern. Dieser Positionsverschiebungsvektor wird auf alle Punkte der Vorwärtsbahn aufaddiert.
- Im dritten Schritt wird die Bahn abgefahren. Im Endpunkt bleibt die Maschine stehen.
- Der Bediener kann im vierten Schritt entweder den automatisch generierten Rückzugsweg benutzen, oder den Pfad neu einlernen.
- Zurück im Startpunkt kann diese Prozedur wiederholt werden, um z.B. weiter zuzustellen. Ansonsten wird die Vorwärtsbahn vom Start- bis zum Endpunkt abgefahren.

¹⁾Vorzugsweise werden die Werkzeuge so an den Putzroboter montiert, daß sich die Orientierungen beim Messen und beim Putzen entsprechen. Dies gelingt nicht immer. Deshalb werden die Koordinaten einer werkzeugspezifischen Transformation unterzogen. Wenn ein Werkzeug, z.B. eine Trennscheibe, auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden soll, ist es notwendig weitere Unterscheidungsmerkmale einzuführen und mit verschiedenen Transformationen zu arbeiten.

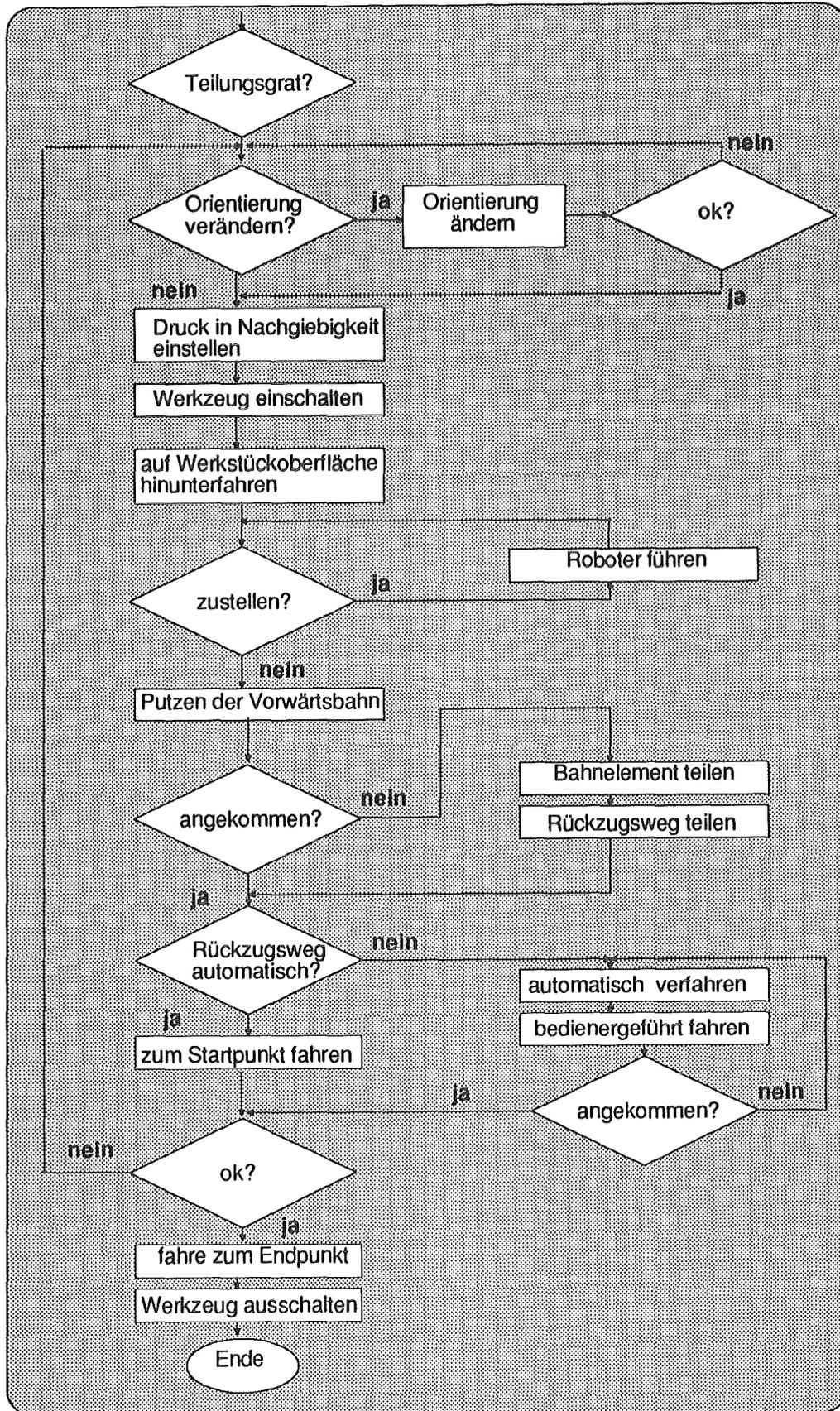


Bild 45 Einlernen eines Teilungsgrat-Bahnelements

Wird auf der Vorwärtsbahn der Totmannschalter losgelassen um beispielsweise das Werkzeug zu wechseln, wird das Bahnelement geteilt. Das Originalelement wird abgeschnitten. Ein neues Bahnelement mit dem Rest der Bahn wird angelegt. Als Ursprung des neuen Bahnelementes wird die Nummer des Originalelements und die Nummer des Punktes gespeichert, vor dem geteilt wurde. So läßt sich eine Teilung mehrfach durchführen. Die Position des Teilungspunktes wird hierzu in die Datenbasis aufgenommen. Der Teilungspunkt wird nur in Ausnahmen mit einem Sollpunkt des Bahnelementes übereinstimmen. Um die Punktnummern des Meßprogrammes zu erhalten, werden die Startpunkte, Endpunkte und Teilungspunkte in eigenen Listen abgelegt.

Im Automatikbetrieb werden alle Editierschritte aus Sicherheitsgründen nachvollzogen. Die Bahnelemente werden geteilt und die Punkte eingefügt. Die Orientierungen werden gegebenenfalls überschrieben und die Zustellung aufaddiert. Schließlich wird der Pfad für den Rückweg ausgewählt. Luftbahnen werden zusammengefaßt, um Zeit bei der Ausführung zu sparen. Nach dem ersten Einlerndurchgang wird ein Probelauf mit den Schritten des Automatikbetriebes absolviert. Im Unterschied zum echten Automatikbetrieb ist der Zustimmungsschalter aktiviert. Bei Unterbrechung wird die Einlernumgebung restauriert.

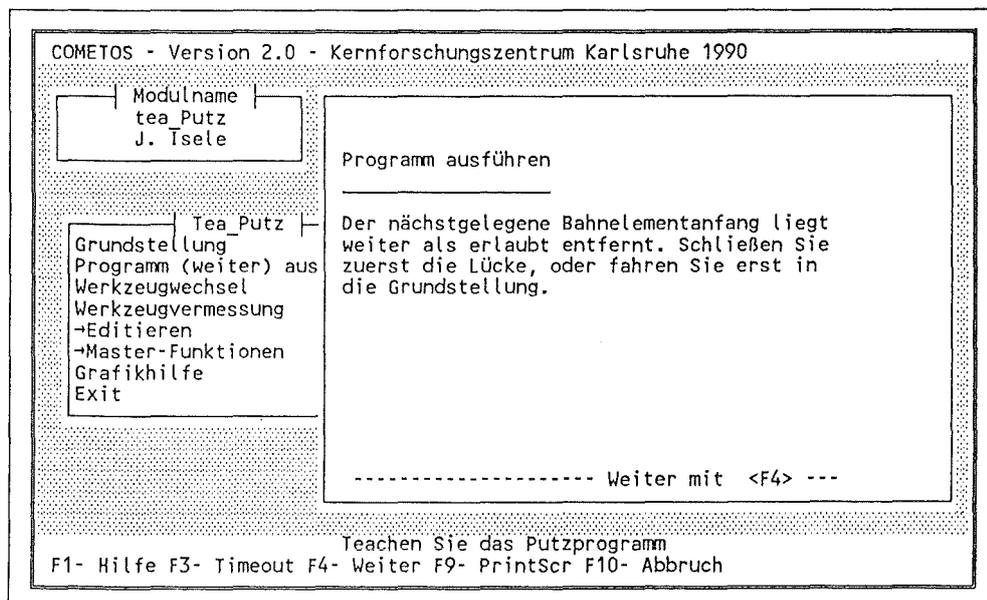


Bild 46 Beispiel für die Bedienerführung

Der Bediener wird während des Einlernens grundsätzlich über den nächsten Schritt informiert (vgl. Bild 46). Im Beispiel sind die Startvoraussetzungen verletzt. Weitere Hilfe ist über die Funktionstaste 'F1' erhältlich.

7.2.2 Einlernen und Abarbeiten eines Meß-Bahnelements

Die Editiervorgänge beim Einlernen des Meßprogrammes müssen nicht nachvollziehbar sein, da es für den **Automatikbetrieb** bedeutungslos ist, ob ein Bahnelement als Ganzes eingelernt wurde, oder aus einer Bahnelementteilung hervorging.

Bei kleinen Aufspanntoleranzen kann das Meßprogramm bei allen Werkstücken unverändert ablaufen. Muß die Aufspanntoleranz kompensiert werden, so werden individuelle Meßprogramme generiert, indem jeder Punkt der gleichen Transformation unterzogen wird.

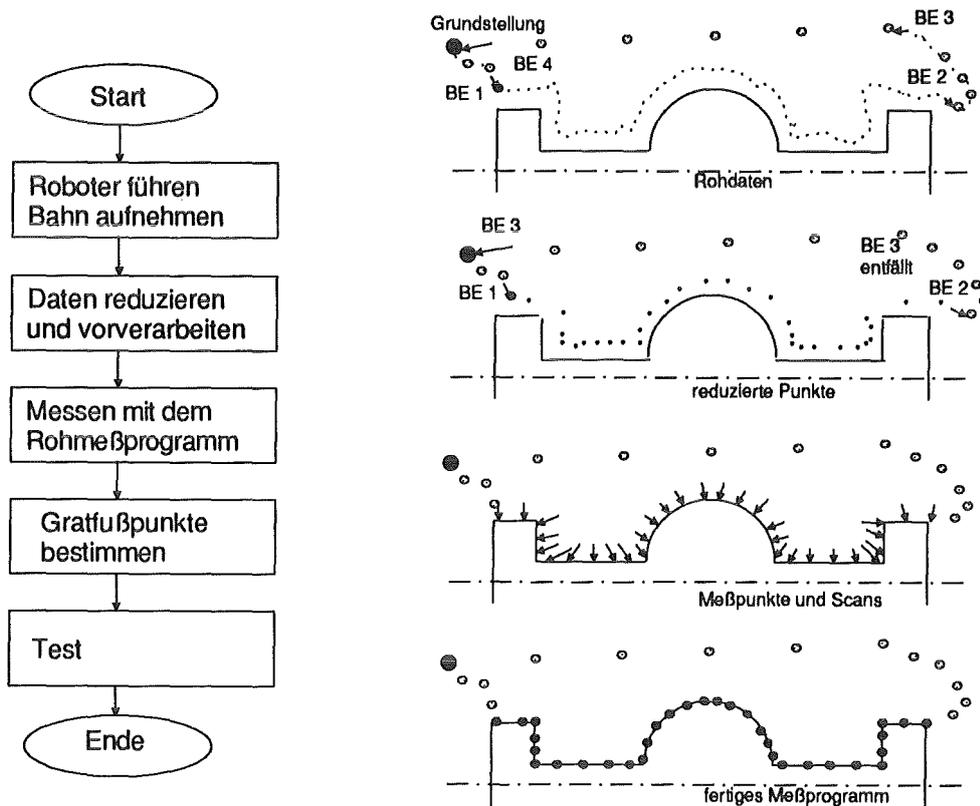


Bild 47 Grundprinzip beim Einlernen des Meßprogramms
(BE : Bahnelement)

An jedem Meßpunkt werden neben dem Meßwert des Geometriesensors die Istkoordinaten der Meßmaschine benötigt. Genaue Messungen sind nur möglich, wenn diese Koordinaten zur selben Zeit am selben Ort aufgenommen werden. Dies ist nur sicherzustellen, wenn die Meßmaschine bei der Messung steht. Deshalb wird im 'Stop and Go'-Verkehr gemessen, d.h. die Maschine fährt einen Meßpunkt an und stoppt. Nun werden die Meßwerte angefordert, übertragen und aufgezeichnet. Danach wird der nächste Punkt angefahren. Ein derartiger Bewegungsablauf ist dem Bediener beim Führen des Gerätes nicht zuzumuten. Der Vorgang wird wie in **Bild 47** strukturiert. Während der Bediener den Meßroboter mit dem Joystick führt, werden in zeitlichem Abstand die Istpositionen des Roboters abgefragt und

gespeichert. Diese Datenflut wird reduziert. Die verbleibenden Bahnpunkte bilden das Rohmeßprogramm. Die Meßwerte des Geometriesensors und die Istkoordinaten des Meßroboters werden addiert. Daraus ergibt sich das Meßprogramm, das mit konstantem Abstand zur Werkstückoberfläche an dem zum Einlernen benutzten Werkstück entlangfährt. Das fertige Meßprogramm wird wie das Putzprogramm nochmals überprüft, bevor das Einlernen abgeschlossen wird.

Bestünde das Meßprogramm aus einer einzigen Bahn, wäre der Einlernprozeß für das Putzprogramm sehr aufwendig. Weit besser ist es, das Meßprogramm so zu strukturieren, wie es beim Bearbeiten benötigt wird. Eine Unterteilung nach Grattypen ist erwünscht, hilfreich und logische Konsequenz aus der aufgabenorientierten Programmieroberfläche. Dem Bediener werden schon beim Einlernen des Meßprogramms Hilfen angeboten, die die Aufgabe vereinfachen. Teilungsgrate verlaufen häufig am ganzen Umfang oder zumindest stückweise in einer Ebene. Die Einlernoberfläche bietet eine Funktion an, mit der eine Ebene bestimmt werden kann, und den Meßroboter mit der richtigen Orientierung in die Ebene hineinfährt. Der Roboter wird mit dem Joystick geführt, der in seiner Hand montiert ist. Das Koordinatensystem des Joysticks entspricht dem Werkzeugkoordinatensystem. Die Bewegungsbefehle werden dem Roboter in diesen Koordinaten übermittelt. Es ist trivial drei Komponenten dieses Koordinatenvektors zu Null zu setzen. So wird erreicht, daß sich die Maschine nur noch in der definierten Ebene bewegen läßt und nur einen Orientierungsfreiheitsgrad der Ebene kennt. Diese Funktion beschleunigt den Einlernvorgang und verbessert gleichzeitig die Bahn. Die Information, daß es sich bei der Bahn um die Gratfußpunkte eines Teilungsgrades handelt, wird vielfach ausgenutzt. Sie erleichtert unter anderem die Auswertung der Daten des Geometriesensors und wird beim Einlernen des Putzprogrammes wieder gebraucht.

In allen Programmen sind Sicherheitsfunktionen eingebaut. Die wichtigsten sind:

- Jedes Programm muß in einer global vereinbarten Grundstellung starten und dort enden.
- Bevor Einlern- und Editierprogramme verlassen werden können, wird die Kontinuität der Bahn geprüft. Damit wird sichergestellt, daß zwischen dem Endpunkt eines Bahnelements und dem Startpunkt des nächsten ein zulässiger Abstand von einigen Zentimetern nicht überschritten wird.
- Beim Einfügen neuer Bahnen wird kontrolliert, ob nachfolgend ein Anschluß existiert und ob der Endpunkt des Vorgängerelements dem Istpunkt des Roboters nahekommt.

Die Möglichkeit, das Meßprogramm zu ändern und die Änderungen automatisch an das Putzprogramm weiterzugeben, ist nicht realisiert. Dazu wäre sicherzustellen, daß die automatisch ablaufenden Algorithmen die neue Situation erkennen. Im ersten Schritt wird im Automatikbetrieb die Bahnelementreihenfolge des Meßprogramms für das Putzprogramm

übernommen. Danach werden die Punkte umsortiert. Dabei könnte es zu Verwechslungen kommen. Ein neues Bahnelement im Meßprogramm könnte von einem geteilten Bahnelementstück überschrieben werden. Schwieriger wird das Problem, wenn ein Bahnelement zum Putzen an einer Punktnummer geteilt werden soll, die nach dem Editieren des Meßprogramms nicht mehr existiert. Für eine solche Option wäre ein neues zusätzliches Programm notwendig. Bisher stellt das Putzprogramm für jeden Meßwert einen 'Platz' bereit und merkt sich, welcher Meßwert diesen 'Platz' einnehmen soll. Leere 'Plätze' müßten erkannt werden. Die 'Platzhalter' müßten gelöscht, oder mit anderen Werten besetzt werden. - Wird das Meßprogramm editiert, muß das Putzprogramm neu eingelernt werden.

7.2.3 Übertragen von Meßergebnissen

Eine Reihe von Transformationen ist auszuführen, bevor das Meßergebnis eines Geometriesensors, der von einem Roboter geführt wird, benutzt werden kann, um einen zweiten Roboter an die Meßstelle auf dem Werkstück zu führen, das zwischenzeitlich weiter transportiert wurde. In Bild 48 sind die Transformationen angedeutet.

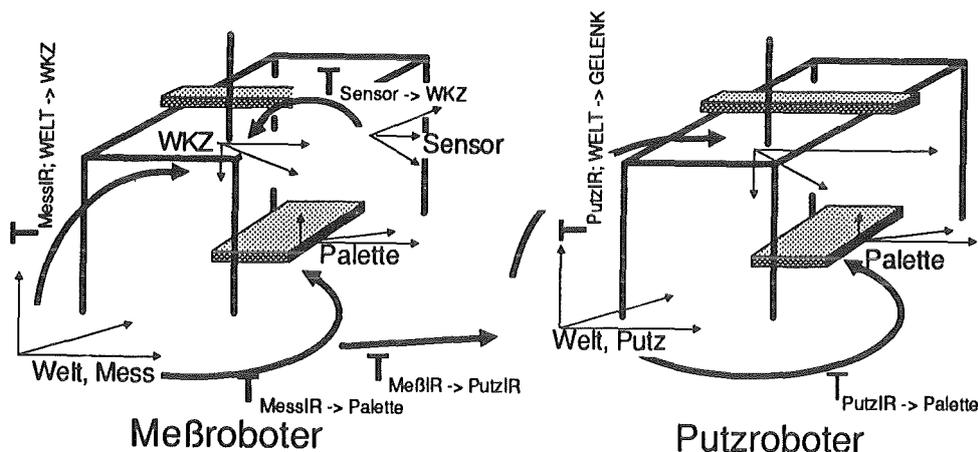


Bild 48 Koordinatentransformationen

Das Meßergebnis liegt in Koordinaten des Sensors vor. Das Sensorkoordinatensystem ist normalerweise gegenüber dem Werkzeugkoordinatensystem des Roboters verdreht und verschoben. Diese Transformation $T_{\text{Sensor} \rightarrow \text{WKZ}}$ ist durch die Montage festgeschrieben. Die Transformation $T_{\text{MessIR:WKZ} \rightarrow \text{Welt}}$ des korrigierten Meßwertes von Werkzeug- zu Weltkoordinaten ändert sich mit der Bewegung des Roboters. Die benötigte Information steckt in den Istkoordinaten des Roboters. Dabei muß der TCP des Meßroboters im Gratfußpunkt liegen, wenn der Sensor den Wert Null anzeigt.

Auch bei großer Sorgfalt, ist es nicht zu schaffen, daß die Indexiereinrichtungen im Bezug zu den Robotern exakt positioniert und orientiert sind. Die Transformation $T_{\text{MessIR} \rightarrow \text{PutzIR}}^{1)}$ ist keine Einheitsmatrix. Die Meßergebnisse müssen deshalb mit der Transformation $T_{\text{MessIR} \rightarrow \text{Palette}}$ in Palettenkoordinaten umgesetzt werden. Die Palettenkoordinaten ändern sich beim Transport nicht, das ist eine wichtige Bedingung. Beim Putzroboter müssen die Palettenkoordinaten wieder mit $T_{\text{Palette} \rightarrow \text{PutzIR}}$ in Weltkoordinaten zurückgerechnet werden. Die Umrechnung mit $T_{\text{PutzIR:Welt} \rightarrow \text{Gelenk}}$ auf den Bearbeitungspunkt des Werkzeugs erledigt die Bahnplanung der Robotersteuerung.

Die Fehlerquellen liegen in der Genauigkeit der TCP-Koordinaten, der Genauigkeit der Transformationen zwischen Roboter- und Palettenkoordinaten und in den Fehlern der Roboterkoordinaten. Der TCP kann nicht ohne weiteres gemessen werden. In der Praxis ist er nur schrittweise erreichbar, falls die Werte nicht aus Konstruktionszeichnungen hervorgehen.

Für die Transformation im Zusammenhang mit den Paletten wurden aufwendige Messungen durchgeführt [LEHR 90, SCHYGULLA 91]. Auf einer eigens gebauten Palette wurden drei sehr genaue Kugeln angebracht. Mit einem schaltenden taktilen Sensor wurden diese Kugeln in vielen Punkten angetastet. Eine Ausgleichsrechnung führt zu den Mittelpunkten der Kugeln, aus denen ein Koordinatensystem bestimmt werden kann.

Durch die Verwendung zweier nahezu baugleicher Roboter sollten sich die sonstigen Fehler weitgehend kompensieren. Zumindest im statischen Fall ohne Bearbeitungskraft sollte beispielsweise die Durchbiegung beider Geräte in gleichen Positionen sehr ähnlich sein. Die Fehler in der Skalierung der Geber sollten gleich sein. Die Messungen ergaben erstaunliche Ergebnisse:

- Auf einer Meßpalette wurde ein Laserentfernungsmesssystem montiert. Die Roboter verfahren entlang dem Laserstrahl auf einer Diagonalen durch den Arbeitsraum. Die programmierte Bahnlänge betrug ein Meter. Dabei verfuhr der Meßroboter 0,81 mm kürzer und der Putzroboter 1,22 mm länger. Der Fehler zwischen Meß- und Putzroboter liegt in der Größenordnung von 2 mm pro Meter.
- Werden die Abstände der Kugelmittelpunkte auf der Meßpalette verglichen ergeben sich ähnliche Fehler. Bei dieser Messung wird das Ergebnis allerdings durch Verbiegung der Palette und der Aufbauten und durch eine ungenaue Definition des TCP beeinflusst.

Die auftretenden Fehler könnten teilweise rechnerisch kompensiert werden. Ein pragmatischer Ansatz, um solche und andere Fehler auszugleichen ist die Addition eines Zustellvektors, der beim Einlernen des Putzprogrammes angegeben wird.

¹⁾Lies: Matrix, die Koordinaten vom Meßroboter zum Putzroboter transformiert.

7.2.4 Datenreduktion und Koordinatentransformation

Auf die Verfahren der:

- *Datenreduktion* und der
- *Transformationen* muß kurz eingegangen werden.

Die Datenreduktion erfolgt in zwei Schritten, in denen aus der Liste der Originalpunkte alle diejenigen Punkte in die Liste der reduzierten Bahnpunkte übernommen werden, die zur Beschreibung der Bahn unbedingt notwendig sind. Zunächst wird die Bahn nach einem Positionskriterium auf wenige Stützpunkte reduziert. Danach werden eventuell weitere Stützpunkte übernommen, um einem Orientierungskriterium zu genügen. Ausgehend vom absoluten Minimum, dem Anfangs- und dem Endpunkt der Originalbahn, wird iterativ vorgegangen. Zwei benachbarte Stützpunkte werden durch eine Gerade verbunden. Die Abstände der dazwischenliegenden Roboteristkoordinaten von dieser Geraden werden mit folgender Formel aus [BRONSTEIN] berechnet (s. Bild 49):

$$a^2 = \frac{(p_x g_y - p_y g_x)^2 + (p_y g_z - p_z g_y)^2 + (p_z g_x - p_x g_z)^2}{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \quad [1]$$

a : Abstand

g : Vektor vom Anfangs- zum Endpunkt

p : Vektor vom Anfangspunkt zum untersuchten Bahnpunkt

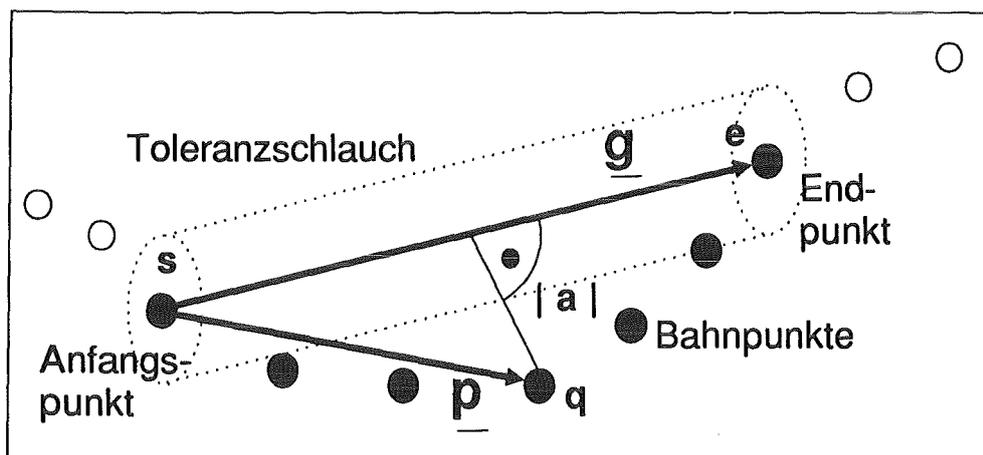


Bild 49 Zum Verfahren der Datenreduktion

Der Punkt mit dem größten Abstand wird als neuer Stützpunkt übernommen, falls der Abstand den Radius des Toleranzschlauches überschreitet. Mit diesem Stützpunkt wird das Verfahren fortgesetzt, bis alle Abstände innerhalb des Toleranzschlauches liegen.

Bei der Betrachtung der Orientierung wird berücksichtigt, daß bei der Bewegung die Orientierung kontinuierlich verdreht wird. Auch wenn um große Winkel gedreht wird, müssen nicht notwendigerweise viele Stützpunkte eingefügt werden.

Bei einem engen Toleranzschlauch ist die Länge der Schlauch-Seele ungefähr gleich dem Verfahrensweg des Roboters innerhalb des Schlauches. Dann kann ein Längenverhältnis errechnet werden:

$$Q^2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \quad [2]$$

Unter der Randbedingung der kontinuierlichen Drehung zwischen den Stützpunkten ergibt sich für die einzelnen Koordinaten ein Orientierungsvergleichswert:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= q_\alpha - (s_\alpha + (e_\alpha - s_\alpha) Q) \\ v_\beta &= q_\beta - (s_\beta + (e_\beta - s_\beta) Q) \\ v_\chi &= q_\chi - (s_\chi + (e_\chi - s_\chi) Q) \end{aligned} \quad [3]$$

v : Vergleichsvektor

q : untersuchter Bahnpunkt

s : Anfangspunkt

e : Endpunkt

Zwischen den Stützpunkten wird der maximale Vergleichsvektor gesucht. Bei Überschreitung des Toleranzmaßes für die Orientierung wird der zugehörige Bahnpunkt als weiterer Stützpunkt eingefügt.

Bezüglich der Transformationen sei kurz auf die Transformation der Meßergebnisse vom Sensor- ins Weltkoordinatensystem eingegangen. Zu jedem Sensorwert werden beim Messen die Roboterkoordinaten aufgezeichnet. Werden die Orientierungen in Euler-Winkeln dargestellt, ergibt sich die Transformationsmatrix zu:

$$T_{\text{Sensor} \rightarrow \text{Welt}} = R(z, \alpha) R(y, \beta) R(x, \chi) \quad [4]$$

mit

T : (3x3)-Transformationsmatrix, von Sensor- zu Weltkoordinaten

R(z, α) : Rotationsmatrix, beschreibt die Drehung um die Achse z um den Winkel α

und:

$$R(x, \chi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\chi & -\sin\chi \\ 0 & \sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix} \quad [5]$$

$$\mathbf{R}(y,\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad [6]$$

$$\mathbf{R}(z,\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [7]$$

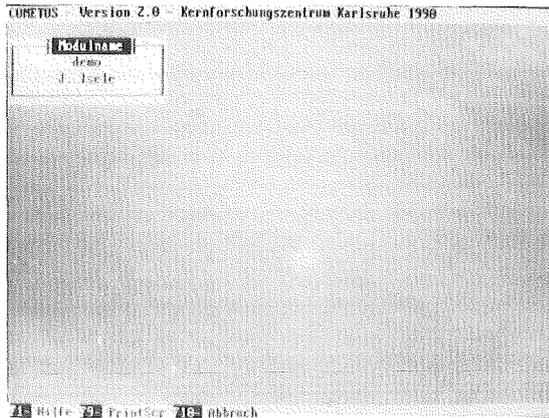
Mit dieser Transformation läßt sich auch die TCP-Verschiebung vom Werkzeug- ins Weltkoordinatensystem umrechnen. Damit wird die Rückwärtstransformation für die Portalroboter sehr einfach. Die Hände sind als Euler-Hände [CRAIG 89] gestaltet. Die Orientierungen unterscheiden sich zwischen dem Werkzeug- und dem Weltkoordinatensystem nur durch einen Offset. Die Position, in Gelenkkordinaten ausgedrückt, ergibt sich aus der Position, dargestellt in Weltkoordinaten, durch Subtraktion der umgerechneten TCP-Verschiebung.

7.3 Softwarebausteine

In den vorigen Kapiteln wurde beschrieben, was nötig ist, um ein Teilungsgrat-Bahnelement zu putzen. Nachfolgend werden einige Softwarebausteine erläutert.

7.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Das Fertigungssystem zum Gußputzen soll in der Gußputzerei programmiert und bedient werden. Durch Qualifizierungsmaßnahmen muß erreicht werden können, daß diese Aufgaben vom vorhandenen Personal wahrgenommen werden können. Das System muß der Gußputzerei möglichst weit entgegenkommen. Dies wird durch die enge Benutzerführung der aufgabenorientierten Programmierung gewährleistet. In vielen Fällen genügen Ja/Nein Entscheidungen. Die Bedienerführung sollte möglichst die Sprache der Putzerei benutzen. Die Grundregeln der Softwareergonomie sollen eingehalten werden [LÄUBLI 89]. Menüs sollen nicht mehr als fünf Optionen enthalten. Eingabefehler müssen abgefangen werden. Wenn der Bediener Fragen hat, muß ihm schnelle Hilfe geboten werden. Die Software muß ein einheitliches Bild bieten trotz Unterteilung in verschiedene Programme. Der Bediener soll sich in allen Programmen sofort zurechtfinden. Mit dieser Zielsetzung wurde die Software entwickelt.



```

program demo(input,output);
{ ***** }
{ Filename   : demo.pas }
{ Programmname : demo }
{ }
{ erstellt von : J. Isele }
{ Datum      : Mittwoch, den 28.8.1991 }
{ Zeit       : 21:04:25 }
{ }
{ Aufgabe    : }
{ Demo Programm }
{ ***** }
{ Vereinbahrungen: }
{ }
USES win;
VAR name          : string;

begin
win_init;
name := 'demo';
stdnames( name );
modulwin( 'J. Isele' );
fertig;
end. { of demo }
{ ***** EOF ***** }

```

Bild 50 Bildschirmaufbau nach der Initialisierung und dazugehöriges Programm

Um diese Grundsätze einhalten zu können, wurde eine Programmbibliothek entwickelt, die alles Notwendige zur Verfügung stellt. Ein Grundmodul enthält Routinen für Dateizugriffe über das Netz. Darauf setzt ein Modul auf, das Fenster verwaltet. Ein Modul der nächsten Ebene stellt spezielle Fenster und Funktionen bereit. Es schafft das einheitliche Bild. Bild 50 zeigt links die Ausgabe des kurzen Programms auf der rechten Seite. Oben links auf dem Bildschirm wird angezeigt, welches Programm gerade aktiv ist. In der untersten Bildschirmzeile wird die Funktionstastenbelegung angezeigt. Die Hilfetaste ist immer 'F1'. Die Zeile darüber wird benutzt, um Kurzerklärungen auszugeben.

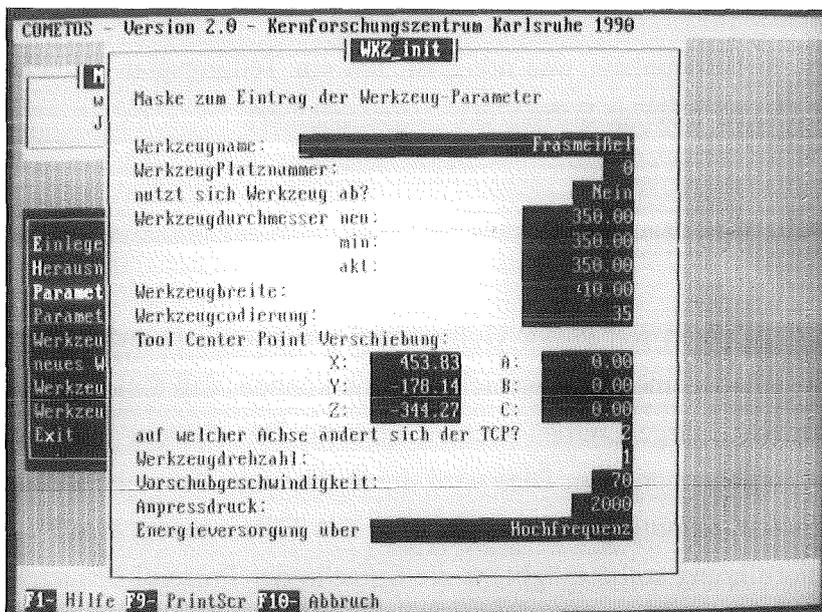


Bild 51 Bildschirmmaske zur Werkzeugdefinition

Es werden Module bereitgestellt zur einheitlichen:

- Ausgabe von Fehlermeldungen,
- Ausgabe von Hilfetexten

- Darstellung von Menüs,
- Darstellung von Bildschirmmasken (s. Bild 51) etc..

Die Gestaltung der eigentlichen Anwendungsprogramme wird durch diese Hilfsmittel erleichtert. Das Aussehen und die Bedienung wird vereinheitlicht. Die Verwaltung von Fehlertexten, Hilfetexten usw. wird von diesen Prozeduren übernommen¹⁾. Mit Hilfe von Menüs und mit Defaultwerten vorbelegten Masken wird die Bedieneringabe auf ein Minimum reduziert.

7.3.2 Grafik

Grafikunterstützung wird geboten:

- zur Darstellung der Bahnpunkte (s. Bild 52),
- zum graphischen Editieren der Bahnen,
- als Funktion, die beim Einlernen den Roboter simulieren kann und
- zu Schulungszwecken.

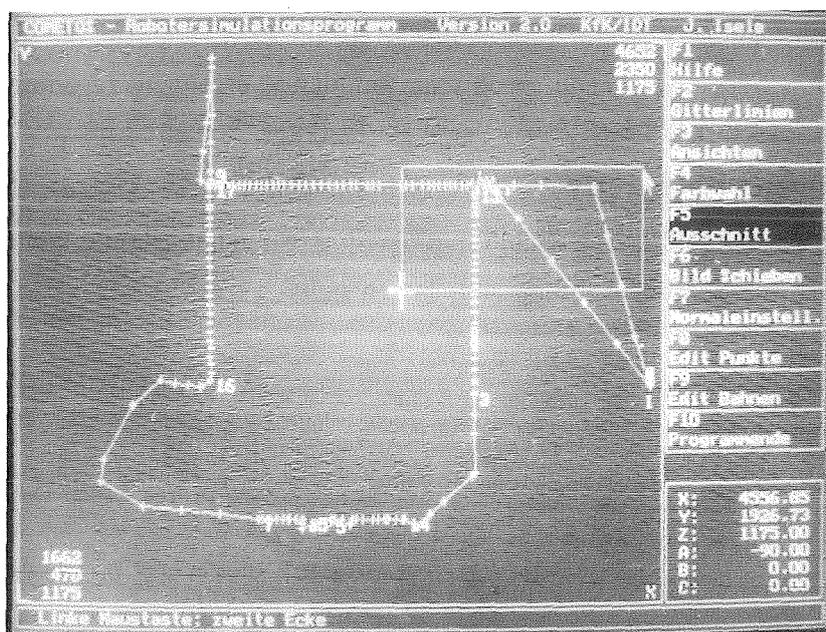


Bild 52 Der Standard-Grafikbildschirm

¹⁾Fenstertechnik, Menüs etc. werden von vielen Standardprodukten unterstützt. Neuerdings wird TurboPascal für die MS Windows Umgebung angeboten. Diese Produkte haben im Vergleich zur hier verwendeten Technik den entscheidenden Nachteil, daß sie sehr mächtig sind, aber viel Speicher brauchen und die Anwendung verlangsamen.

Die eingesetzte Rechnerhardware ist in ihrer Leistungsfähigkeit nicht mit einer Grafikworkstation vergleichbar. Die Grafik stellt nur Bahnpunkte, nicht den Roboter oder Werkzeuge etc. dar.

Die Grafikfunktionen sind in drei Modulen untergebracht:

- Ein Modul stellt die Funktionen für die Maus (Microsoft Mouse kompatibel) bereit.
- Ein zweites Modul bietet Grafik-Grundfunktionen (EGA, oder EGA-Mode bei VGA), z.B. eine 'Funktionstastenleiste' rechts im **Bild 52**.
- Ein weiteres Modul enthält die Schnittstelle zum Prozeß.

Beim Einlernen der Programme wird die Grafik eingesetzt. Längere Programme sind schwer überschaubar. Bevor ein bestehendes Programm editiert werden kann, muß ungefähr klar sein, wie das Programm aussieht. Ein Blick auf die grafische Darstellung der Bahnen hilft weiter. Zum Editieren werden Fangfunktionen angeboten. Insbesondere dann, wenn die Aufsetzpunkte auf die Bahn weit weg liegen, hilft es dem Bediener, Kollisionen zu vermeiden, wenn angezeigt wird, wohin sich der Roboter bewegen wird.

Die Grafik gestattet die Simulation des Gußputzprozesses. In der Simulation wird der Roboter durch die Maus ersetzt. Eine Maustaste simuliert den Totmannschalter. Für die Simulation und für die reale Umgebung wird ein und dieselbe Software gestartet. Der Unterschied besteht im Wert einer Variablen auf Betriebssystemebene, die bei Programmstart abgefragt wird. Wird der Roboter simuliert, werden die Aufträge für die DNC-Dienste, die in einem Modul zusammengefaßt sind, ersetzt. Die graphische Simulation erfolgt nicht unter Echtzeitbedingungen und ist wesentlich schneller als der reale Roboter. Sensorwerte werden in der Simulation mit einem Zufallsgenerator erzeugt.

Die Grafikfunktionen bilden die Grundlage für einen Graphikeditor. Er erlaubt umfangreiche Manipulationen der eingelernten Bahnen. Bahnpunkte lassen sich:

- löschen,
- verschieben und
- einfügen.

Bahnelemente können:

- verschmolzen oder
- geteilt werden.
- Die Attribute (z.B. Luftbahn) lassen sich umsetzen.

Ein geübter Bediener kann mit Hilfe dieses Editors durch Löschen und Verschieben von Punkten in wenigen Minuten ein optimiertes Programm herstellen, das auch hohen Ansprüchen in Bezug auf die Bearbeitungszeit gerecht wird. Für den (normalen) Anlagenbediener ist das Werkzeug wegen des hohen Risikos ungeeignet.

7.3.3 Bahnverwaltung

Das Programm zum Putzen eines Werkstücks besteht aus drei größeren Blöcken:

- dem Vermessen,
- der Auswertung der Ergebnisse und
- dem Putzen.

Putzbahnelement

```

Elementnummer      :      1
Vorgaengernr      :      12
Nachfolgernr      :      19
Ursprung           :      P
PktQuelle          :      1
ab                 :      1
bis                :      1
StartPkt           : 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
EndPkt             : 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
firstpkt          : 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
lastpkt           : 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Art                :      2
RohFileName        : Z:\000043CB\putz\1.PRO
SolFileName        : Z:\000043CB\putz\1.PSO
DorFileName        : Z:\000043CB\putz\1.PDO
RueckzugName       : Z:\000043CB\putz\1.RUE
Helprueck          : Z:\000043CB\putz\1.HRU
okFlag            : FALSE
Sortierhilfe       : FALSE
Ref trans          : TRUE
maxX               :      0.00
minX               :      0.00
maxY               :      0.00
minY               :      0.00
maxZ               :      0.00
minZ               :      0.00
Schranken          : FALSE
Zustell            :      0.000 0.000 0.000
Ori                : 99999.000 99999.000 99999.000
Werkzeug           : WKZPAR.001
Werkzeugdruck      : 10000
Normale            :      0.00 0.00 0.00
Programmnummer     :      0
Rueckzug           :      0
Teached_vor       : TRUE
Teached_rueck     : FALSE

```

DOROB-Programme (*DOR,*PDO)

```

WAIT I51
SPEED 20
ACCELERATION 50
MOVE P 1
VIA 1/JOINT
      X +03765.55  A -0
      Y +02544.78  B -0
      Z +01274.27  C +0
VIA 2/JOINT
      X +03835.17  A -0
      Y +02512.58  B -0
      Z +01286.97  C +0
VIA 3/JOINT
      X +03904.70  A -0
      Y +02480.28  B -0
      Z +01215.86  C +0
TO 10/JOINT
      X +04780.00  A -0
      Y +01537.00  B -0
      Z +01175.00  C +0
END
RESET M66
END

```

Meßbahnelement

```

Elementnummer      :      1
Vorgaengernr      :      11
Nachfolgernr      :      2
Ursprung           :      M
art                :      2
RohFileName        : Z:\000043CB\mess\1.ROH
SolFileName        : Z:\000043CB\mess\1.SOL
ScannIstFileName   : Z:\000043CB\mess\1.IST
ScannRohFileName   : Z:\000043CB\mess\1.SEN
ScannAusFileName   : Z:\000043CB\mess\1.SCA
DorFileName        : Z:\000043CB\mess\1.DOR
okFlag            : FALSE
Sortierhilfe       : FALSE
Ref trans          : TRUE
maxX               :      0.00
minX               :      0.00
maxY               :      0.00
minY               :      0.00
maxZ               :      0.00
minZ               :      0.00
Schranken          : FALSE
Normale-x          :      0.00
Normale-y          :      0.00
Normale-z          :      0.00

```

Roboterkoordinaten (*PRO,*PSO,*RUE,*HRU - *ROH,*SOL,*IST)

```

> 3678.153 2177.292 1177.091 -89.5
> 3677.722 2177.215 1177.300 -87.4
> 3677.656 2177.409 1176.856 -86.7
> 3677.667 2177.313 1176.869 -86.0
> 3677.808 2177.260 1177.268 -82.6

```

Bild 53 Datensätze für die Bahnelementverwaltung

Die Auswertung erfolgt in mehreren Schritten. Die Ablaufsteuerung kontrolliert die Programmfolge auf dem Meß- und Putz-PC. Meß- und Putzprogramm bestehen aus vielen einzelnen Bahnelementen, die von den Programmen des Meß- und Putz-PC abschnittsweise

bearbeitet werden. Der Meß- bzw. der Putz-PC schickt der Robotersteuerung Aufträge und versorgt sie mit den benötigten Roboter-Programmen. Die Modularisierung in einzelne Bahnelemente erlaubt, zu bestimmten Zwecken, z.B. beim Werkzeugwechsel, auch Programme aufzurufen, die nicht übertragen werden müssen, weil sie in der Robotersteuerung ständig gespeichert werden.

Die Bahnverwaltung wird in Form verketteter Listen realisiert. Für jedes Bahnelement wird ein Datensatz angelegt (s. Bild 53). Die Datensätze sind numeriert. Sie enthalten Zeiger auf das Vorgänger- und das Nachfolgerelement und die Information zum Bahnelement. Die zeitliche Entstehungsgeschichte des Gesamtprogramms ist durch die feste Folge von Elementnummern gegeben. Neue Elemente überschreiben alte Elemente selbst dann nicht, wenn sie nicht mehr gebraucht werden.

Die Abfolge wird durch die Verzeigerung beschrieben. - Nach dem Datenelement 'n' kann durchaus das Datenelement 'n-m' abgefahren werden. - Die Datensätze enthalten auch die Namen der Dateien, in denen die Koordinaten, Meßwerte usw. abgespeichert sind.

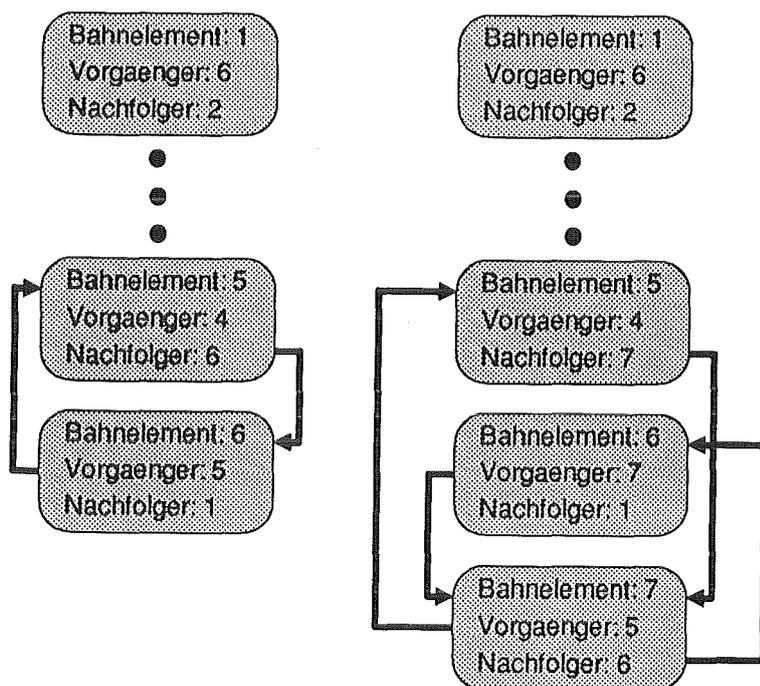


Bild 54 Einfügen eines neuen Bahnelements

Neue Bahnelemente werden eingefügt, indem ein Datensatz angehängt und die Verzeigerung geändert wird (s. Bild 54). Die Verzeigerung weist den Weg beim Verfolgen der Bahn. Wird der Editiervorgang nachvollzogen, werden die Bahnelemente entsprechend ihrer Numerierung verarbeitet. Das ist sehr wichtig beim Teilen von Bahnelementen für das Putzprogramm: Wird ein Bahnelement geteilt, so entsteht ein neues Element. Das Element mit der größten Nummer ist das zuletzt angelegt Element. Das neue Element merkt sich, daß es aus dem Original Nummer 'n' aus allen Punkten ab dem Punkt mit der laufenden

Nummer 'm' entstand. Die Teilungsreihenfolge wird immer, d.h. auch im Automatikbetrieb, eingehalten.

Das Putzprogramm enthält Bahnen, die das Meßprogramm nicht kennt. Ein Bahnelement des Meßprogramms kann im Putzprogramm in mehrere kleinere Bahnelemente unterteilt sein. Deshalb existieren zwei Listen. Weil die Listeninhalte unterschiedlich sind, werden die Listen von zwei sehr ähnlichen, aber unterschiedlichen Modulen verwaltet. Derartige Listen werden sinnvollerweise mit dynamischen Datenstrukturen aufgebaut. Der Hauptspeicherplatz ist aber sehr beschränkt. Ein Auslagern der Daten in Speichererweiterungen führt zu Zwängen bei der Wahl des Rechners. Die Verwaltung auf dem Massenspeicher verlangsamt die Programme. Der realisierte Kompromiß besteht darin, die Dateien mit der Liste auf eine virtuelle Platte zu kopieren, falls diese ausreichend Platz bietet. Hier wird der Nachteil des begrenzten Hauptspeichers unter dem gewählten Betriebssystem besonders deutlich.

7.3.4 Editierfunktionen

Änderungen an eingelernten Programmen bleiben nicht aus. Das Einlernen des Putzprogramms ist eine Änderung am Meßprogramm. Meß- und Putzprogramme setzen sich aus einer Anzahl von Bahnen, repräsentiert durch Roboterkoordinaten und einer Menge technologischer Information zusammen. Unmöglich für einen Bediener diese Informationsbasis zusammenzutragen oder etwas an diesen Daten zu ändern ohne Unterstützung der aufgabenorientierten Programmierung.

Zu Beginn, wenn noch kein Programm existiert, ist die Sache einfach. Die Bahnelementdatensätze werden initialisiert, mit den aktuellen Daten gefüllt und abgespeichert. Die Bahnen werden eingelernt, indem der Roboter mit dem Joystick geführt wird. Beginn und Ende einer Bahn ergeben sich aus der Stellung des Totmannschalters. Wird dieser gedrückt, läßt sich der Roboter bewegen. Loslassen des Totmannschalters ist gleichbedeutend mit dem Ende des Bahnelements. Die Hilfen für den Bediener bestehen darin, Ebenen und Richtungen definieren zu können, die dann innerhalb des Bahnelements nicht mehr verlassen werden können.

Es wird eine Funktion angeboten, die äußerst hilfreich ist, wenn vom System vorgegebene Punkte angefahren werden sollen. Jedes Programm muß in der sogenannten Grundstellung beginnen und enden. Die Anlage kennt die Koordinaten der Grundstellung. Der Bediener kennt die Position höchstens ungefähr. Solche Punkte werden im Mischbetrieb angefahren. **Bild 55** zeigt das Ablaufdiagramm der Funktion. Zunächst erhält der Bediener die Möglichkeit den Roboter zu führen, um beispielsweise in eine kollisionsfreie Position zu gelangen. Im nächsten Schritt generiert die 'Bedienoberfläche' ein Automatikprogramm aus der Istposition zur Sollposition und startet dieses, sobald der Totmannschalter gedrückt wird. Bei

Kollisionsgefahr läßt der Bediener den Schalter los. Der Roboter steht. Es geht weiter mit einer bedienergeführten Bahn.

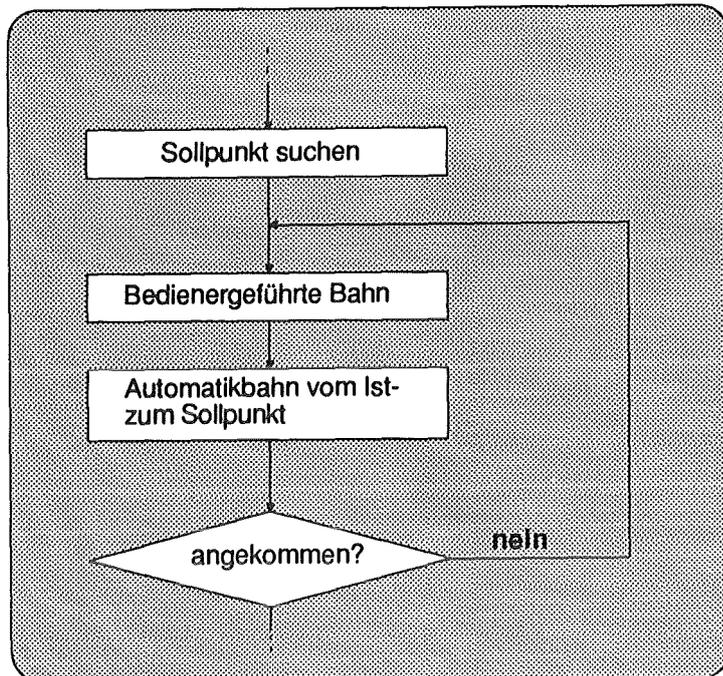


Bild 55 Schleife zum Anfahren eines vorgegebenen Punktes

Eine Grundfunktion des Systems wird in **Bild 56** beschrieben. Nachdem das Programm eingelernt wurde, wird ein Test durchgeführt. Dazu soll das Programm die einzelnen Bahnen in der richtigen Reihenfolge ausführen. Diese Funktion wird durch den Menüpunkt 'Programm (weiter) ausführen' gestartet. Die Klammern sind bewußt gesetzt. Das Programm muß per Definitionem in der Grundstellung mit dem Bahnelement Nummer Eins beginnen. (Das erste Element kann zwar zu einem Punkt entarten, aber nicht gelöscht werden; dafür ist gesorgt.) Nicht immer wird der Roboter in diesem Punkt stehen, wenn die Aktion ausgelöst wird. Ein Menüpunkt kann jederzeit aufgerufen werden, sonst wäre es sinnlos, die Funktion in einem Menü aufzunehmen. Während des Editiervorganges wird an irgendeiner Stelle eine Änderung vorgenommen. Danach möchte der Bediener sehen, wie der Roboter weiter verfährt. Es muß geklärt werden, wo der Roboter steht. Die Roboteristposition wird mit den Endpunkten der Bahnelemente verglichen, beginnend beim Bahnelement Eins, danach dessen Nachfolger usw.. Damit wird die Kontinuität in der Bahn gesichert. Die Grundstellung wird als Sonderfall behandelt. Sollte der Roboter nicht nahe genug an einem Bahnendpunkt stehen, wird die Funktion verlassen. Dem Bediener wird nahegelegt, in die Grundstellung zu fahren und von vorne zu beginnen. Der Menüpunkt 'Grundstellung anfahren' wird dazu mit dem 'Auswahlbalken' farblich unterlegt. Ist der Endpunkt gefunden, wird die Istposition mit dem Anfangspunkt des Nachfolger-Elements verglichen. Ist der Abstand zu groß, ist das System auf eine Bahnücke gestoßen. Der Menüpunkt 'Lücke schließen' ist zur Problemlösung geeignet.

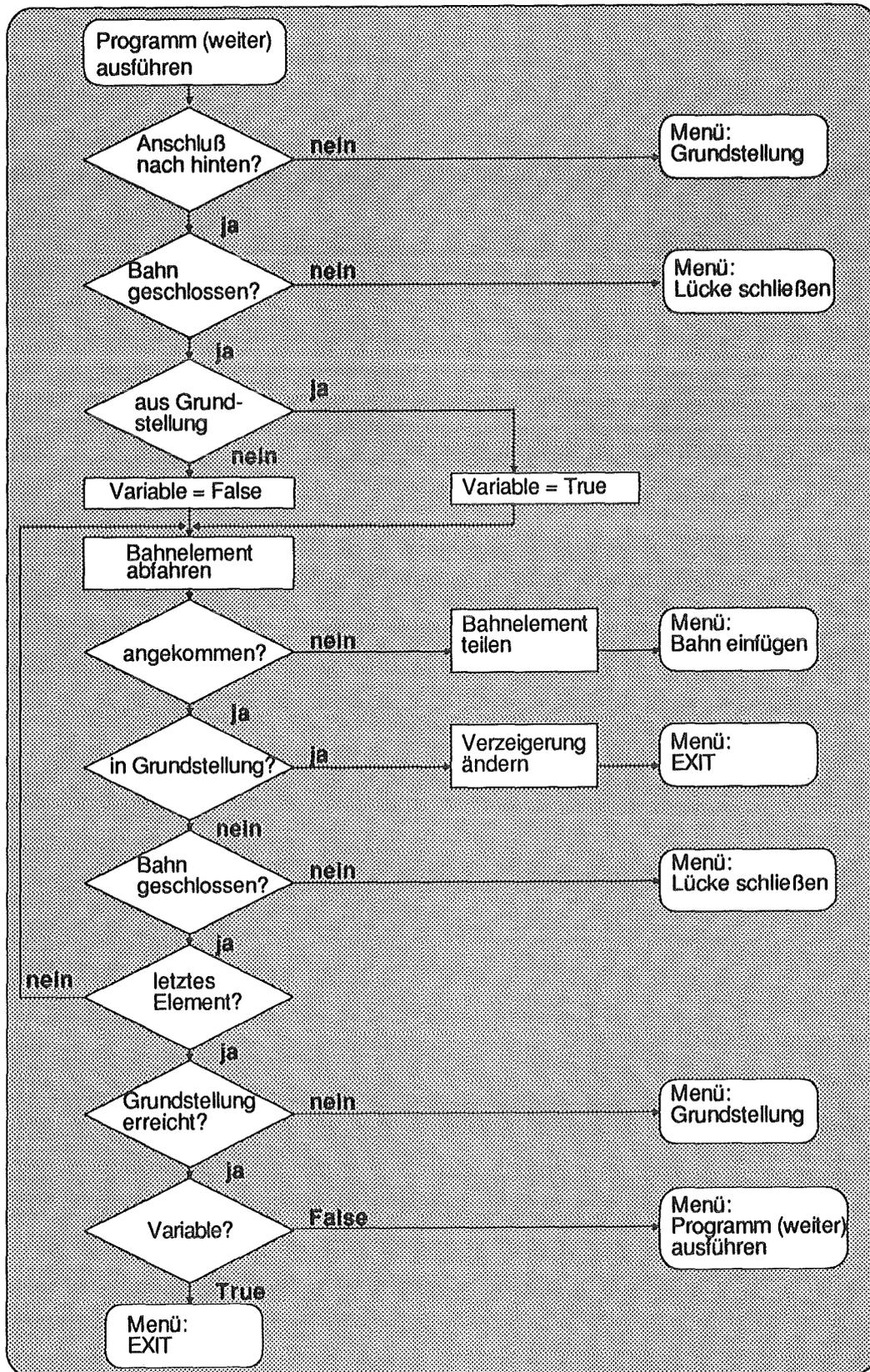


Bild 56 Programm (weiter) ausführen

Falls die Startvoraussetzungen erfüllt sind, werden nacheinander alle folgenden Bahnelemente ausgeführt. Es wird weiterhin kontrolliert, ob die Bahnelementendpunkte erreicht wurden, und ob die Abstände zu den Anfangspunkten das zulässige Maß nicht überschreiten. Sollte eine dieser Bedingungen verletzt sein, kommen die Menüpunkte 'Bahn einfügen' oder 'Lücke schließen' in Betracht. Steht der Roboter unterwegs einmal in der Grundstellung, so wird der Bediener gefragt, ob die Bahn hier enden soll. Dies ist eine Notstrategie. Die Pfade, die logisch folgen sollten, werden ausgespart. Das Bahnende zeichnet sich dadurch aus, daß das Bahnelement den Bahnelementnachfolger Eins hat. Steht der Roboter dort in Grundstellung und ist die Boole'sche Variable gesetzt, die signalisiert, daß die Bahn ohne Unterbrechung im ersten Bahnelement startend abgefahren wurde, dann ist die Grundstellung erreicht. Wurde sie nicht erreicht, muß die Bahn vervollständigt werden. Weitere Elemente sind einzulernen. Wurde nicht am Bahnanfang begonnen, besteht die Gefahr, daß Daten von Bahnelementen 'hinter' dem Startpunkt falsch sind. Deshalb soll die gesamte Prozedur wiederholt werden. Erzwungen wird dies jedoch erst, wenn versucht wird, das Programm mit dem Menüpunkt 'Exit' zu verlassen.

Weitere wichtige Funktionen um das Programm zu verändern wurden bereits angesprochen. Wird der Totmannschalter vorzeitig losgelassen, muß das Bahnelement geteilt werden. Dazu wird ein neues Bahnelement angelegt und eingefügt. Die Position des Roboters wird mit den Sollkoordinaten verglichen, um festzustellen, welches verbindende Geradenstück geteilt werden muß. Der zweite Teil wird im neuen Bahnelement hinter die Koordinate der Istposition kopiert. Die Datei mit den ursprünglichen Sollpositionen wird abgeschnitten und durch die Istposition ergänzt.

In manchen Fällen möchte der Bediener rückwärts fahren. Dazu wird der nächstgelegene Bahnelementendpunkt gesucht. Die Funktion dreht die Reihenfolge der Bahnelementpunkte um, generiert ein Automatikprogramm und startet dieses. Wird der Totmannschalter losgelassen, wird das Originalelement an der Istposition geteilt. Die Rückwärtsfahrt - im Gegensatz zum Rückzugsweg - wird nicht aufgezeichnet und daher im Automatikbetrieb nicht wiederholt.

Jedes Programm ist in sich logisch geschlossen. Das letzte Element hat als Nachfolger das erste Element. Deshalb macht es zunächst keinen Unterschied, ob mit der Menüoption 'Bahn einfügen' eine neue Bahn angehängt oder mittendrin eingefügt wird. Probleme entstehen erst später. Angenommen ein Bahnelement wurde geteilt und am Teilungspunkt durch Einfügen einer neuen Bahn verzweigt, dann entsteht eine Bahnücke, wenn das neue Bahnelement nicht dahingehend entartet ist, daß Anfangs- und Endpunkt nahezu gleich sind. Die Lücke entsteht in den Roboterkoordinaten, nicht in der Verzeigerung der Bahnelemente. Zwei Funktionen helfen dem Bediener, den Roboter wieder auf der Bahn aufzusetzen:

- 'Lücke schließen' und
- 'nächstes unbenutztes Bahnelement'.



Bild 57 Editierbeispiel

Beide Funktionen werden mit **Bild 57** beschrieben. Beim Einlernen des Putzprogrammes werde zunächst ein leistungsstarkes Werkzeug benutzt, mit dem nicht alle Ecken bearbeitet werden können. Die Bahnelemente, die bis in diese Ecken hineinreichen, müssen geteilt werden (s. **Bild 57** Mitte). Die Ecke wird mit einer Luftbahn übersprungen. Im zugänglichen Bereich will der Bediener wieder aufsetzen. Er führt den Roboter mit der Luftbahn in die Nähe des gewünschten Aufsetzpunktes. Die Funktion 'Lücke schließen' sucht nun unter allen Bahnen diejenige heraus, die der Istposition am nächsten kommt. Auf dieser Bahn wird der Aufsetzpunkt gesucht. Mit einem Automatikprogramm wird der Punkt angefahren. Falls er erreicht wurde, wird das eingefangene Bahnelement am Aufsetzpunkt geteilt und die Verzeigerung geschlossen. Auf diese Weise wird das Werkstück bearbeitet, bis ein kleineres Werkzeug gebraucht wird.

Danach will der Bediener die übersprungenen Teile putzen. Dazu möchte er diese nacheinander anfahren. Diesmal will er nicht irgendwo aufsetzen, sondern am Bahnanfang. Er will auch nur solche Elemente einfangen, die noch nicht bearbeitet wurden. Beim Einlernen des Putzprogramms kommt dem Bediener entgegen, daß die Stellen, die bereits eingelernt wurden, auf natürliche Weise markiert sind. Dort fehlt der Grat. Er führt den Roboter mit Luftbahnen in die Nähe der einzulernenden Elemente (s. **Bild 57** rechts). Die Funktion 'nächstes unbenutztes Bahnelement' fängt den Anfangspunkt ein. Dazu werden alle Anfangspunkte mit der Istposition verglichen und derjenige ausgesucht, der der Istposition am nächsten kommt und zu einem Element gehört, das noch nicht benutzt wurde. Dieses besitzt eine Elementnummer, die in der Kette der Elemente vom ersten bis zum aktuellen Bahnelement fehlt.

Nur die Steuerung des Fertigungssystems könnte sicherstellen, daß nicht auf einem schon benutzten Element aufgesetzt wird. Möglicherweise möchte der Bediener eine Übergangsstelle zwischen zwei Werkzeugen etwas überlappen. Dann kann auf ein Bahnelement aufgesetzt werden, das schon benutzt wurde, ohne das bisher eingelernte Programm zu verändern. Dazu wird, bevor das Element geteilt wird, geprüft, ob es schon benutzt wurde und gegebenenfalls ein neues Element angelegt, das den zweiten Teil enthält. Der Unterschied gegenüber dem Fall des Aufsetzens auf ein unbenutztes Element liegt darin, daß das Ori-

nal in ganzer Länge und unverändert vorhanden bleibt. Wenn zwei benutzte Elemente in einem Knoten enden, wird das weggehende Element kopiert (s. **Bild 58 Mitte**). Wenn von einem Knoten zwei Elemente ausgehen, wird das unbenutzte Element gewählt; in **Bild 58 unten** mit einer Strichpunktlinie dargestellt.

Sollte der Benutzer die Übersicht verlieren, hilft oben zitierte Notstrategie. Korrekt ist eine Bahn nur, wenn die Verzeigerung konsistent ist. Diese Bedingung ist bei Bahnschleifen zwischendurch verletzt. Spätestens wenn das Programm verlassen werden soll, wird der Fehler in der Verzeigerung entdeckt und der Bediener zur Korrektur aufgefordert.

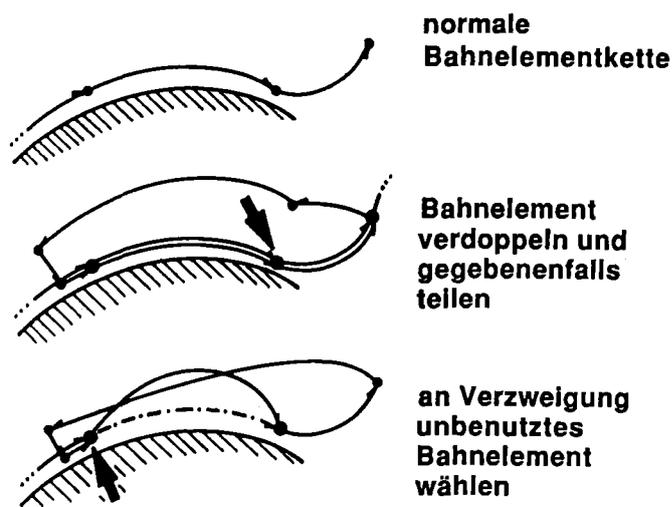


Bild 58 Zum Problem von Bahnschleifen (Pfeil gibt Roboterstellung an)

Die Darstellung aller Programme und Bedienoptionen der aufgabenorientierten Programmierung des Fertigungssystems zum Gußputzen würde zu weit führen. Die Dokumentation der Erfahrungen mit dem Prototypen wird zeigen, welche Putzergebnisse derzeit möglich sind.

8 Erfahrungen

Das Ziel der Entwicklungsarbeit für das Fertigungssystem zum Gußputzen ist der erfolgreiche Einsatz in einer Gießerei. Damit könnten Fragen geklärt werden nach:

- der Verfügbarkeit,
- der Wirtschaftlichkeit,
- der Akzeptanz und
- dem organisatorischen Aufwand.

Voraussetzung ist, daß die Funktionalität an einem Prototyp eindrucksvoll demonstriert werden kann. Hierbei sind folgende Fragen zu beantworten:

- Eignung des mechanischen Aufbaus,
- Bewährung der aufgabenorientierten Programmierung,
- erreichbare Putzergebnisse,
- Änderungen an der Nachfolganlage und
- Anpassungsaufwand an eine erweiterte Aufgabenstellung.

Vom Musterwerkstück, einem Achsgehäuse standen für Versuche nur wenige Exemplare zur Verfügung. Umfangreiche Erfahrungen liegen mit einer Druckmaschinenseitenwand (s. Bild 59) vor, an der sich auch die Fragen zur Flexibilität des Fertigungssystems beantworten lassen.

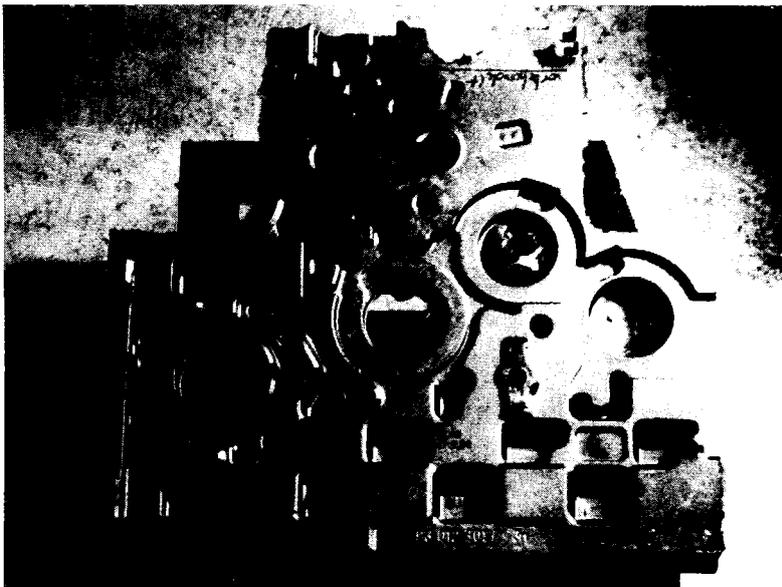


Bild 59 Versuchswerkstück: Druckmaschinenseitenwand

8.1 Erste Ergebnisse mit dem Fertigungssystem

Während der Entwicklungs- und Testzeit für die aufgabenorientierte Programmierung und die beschriebenen Programme wurden erste Ergebnisse mit den Maschinen gesammelt. Mit traditionell eingelernten und 'manuell korrigierten' Programmen wurde Guß geputzt.

Die Versuche an Druckmaschinenseitenwänden ergaben, daß zwar die tatsächlichen Toleranzen geringer als erwartet sind, jedoch in allen Fällen so groß waren, daß Programmkorrekturen notwendig wurden. Unter günstigen Bedingungen, bei kleinen Aufspanntoleranzen und Werkstücken aus einem Los und aus einer Modelleinrichtung können die individuellen Verschiebungen durch zwei Translationen vollständig erfaßt werden. Es werden Restgrathöhen von unter zwei Millimetern erreicht. Geringere Restgrathöhen werden nur bei drei Durchbrüchen gefordert. Das Versuchswerkstück wird nach dem Putzen im gleichen Betrieb fertigbearbeitet.

Die Druckmaschinenseitenwand hat am Umfang einen Teilungsgrat von 4800 mm Länge, vier große und einige kleine Durchbrüche. Bei der manuellen Bearbeitung entfällt hierauf ein Putzzeitanteil von 6 Minuten. Zielgröße für die automatische Bearbeitung waren 2 Minuten.¹⁾

Ein Werkzeugwechsel dauert wegen der großen Verfahrswege circa 30 Sekunden. Demnach können nicht optimale Schnittbedingungen oder größtmöglicher Vorschub das Optimierungsziel sein, sondern eine Bearbeitungsstrategie, die mit wenigen Werkzeugen auskommt.

Zu Beginn wurde mit drei Werkzeugen bearbeitet:

- einer Schruppscheibe (Durchmesser 300 mm, Breite 30 mm),
- einem Hartmetallfrässtift (Durchmesser 12 mm) und
- einem Schlagmeißel.

Die Vorschubrichtung der Schruppscheibe wurde parallel zur Drehachse der Scheibe gewählt. Der Frässtift wurde zum konturbündigen Fräsen der rechteckigen Durchbrüche eingesetzt. Mit dem Schlagmeißel wurden die Durchbrüche geöffnet.

Sehr bald wurde die Schruppscheibe durch eine Trennscheibe ersetzt, mit der die Grate unabhängig von der Grathöhe im Gratfuß abgeschnitten werden können. Die Vorschubrichtung wurde in der Scheibenebene gewählt. Die Kurvenbögen am Umfang mußten in dieser Phase mit dem Fräser geputzt werden. Mit dem Frässtift wurden bei 8 mm Grathöhe Vorschubgeschwindigkeiten von 40 mm/sec erreicht. Mit der Trennscheibe waren 160 mm/sec erreichbar. Die Druckmaschinenseitenwand konnte mit der Trennmaschine, dem Frässtift und dem Schlagmeißel in 420 sec geputzt werden.

¹⁾Zum Vergleich: Das Musterwerkstück, die Achsbrücke, hat etwa 13 Meter Liniengrat und mehrere Flächengrate, aber keine Durchbrüche. Die Vorgabezeit für das Putzen, ohne den Arbeitsgang Trennen, liegt bei 75 Minuten. Daraus wurde als Entwicklungsziel eine Bearbeitungszeit von 20 Minuten abgeleitet.

Nur 55 Sekunden dauert das Putzen des Umfangsgrates mit dem Fräsmeißel. Ein Werkzeugwechsel entfällt, weil der Fräsmeißel die Aufgabe des Frässtiftes übernimmt. Die Bearbeitungszeit sank auf 280 sec. Der mit dem Fräsmeißel erreichbare Vorschub liegt oberhalb der Bahngeschwindigkeit des Bearbeitungsroboters von 800 mm/sec. Der größte Teil der 55 Sekunden wird für Umorientierungen benötigt, weil die Freiheitsgrade der Roboterhand sehr stark untersetzt und deshalb langsam sind.

Wird auf den Fräser verzichtet und werden die Durchbrüche nur noch aufgeschlagen, nicht konturbündig geputzt, dann ist eine Bearbeitungszeit von 3 Minuten erreichbar. Dabei bewährt sich der Einsatz der Nachgiebigkeit als 'schnelle Achse' und als Sensorik.

Eine weitere Leistungssteigerung ist durch eine putzgerechte Gestaltung des Werkstückes bzw. der Modelleinrichtung erzielbar:

- Grate sollen möglichst weit außen liegen, nicht in Vertiefungen, um mit großen Werkzeugen erreichbar zu sein.
- Höhere Grate sind oft ungünstiger als niedrige Grate. Die Reste eines abgeschlagenen Speisers sollten höher sein als die Breite der Trennscheibe, die sie abtrennen soll, weil diese sonst abgedrängt und zerstört wird.

Beim Versuchswerkstück müssen von den Verantwortlichen zwei Alternativen diskutiert werden:

- Durch Abfräsen bzw. Abhobeln der Modelleinrichtungen kann leicht erreicht werden, daß Durchbrüche nach dem Gießen immer geschlossen sind. Dann genügen weniger Schläge mit dem Schlagmeißel und das Putzergebnis wird besser, weil die 'Bohrungsspiegel' als Ganzes herausfallen.
- Ragt die untere Formhälfte in die obere Formhälfte hinein, dann steht der Grat am Durchbruch nach oben weg und kann mit dem Fräsmeißel abgetragen werden. Dieser Ansatz hat aber formtechnische Grenzen, wenn der Quotient aus Durchmesser des Durchbruchs und Höhe der Sandsäule bzw. Dicke der Seitenwand zu klein wird.

In einer zweiten, späteren Phase wurde das Putzprogramm automatisch korrigiert. Dazu wurde jedes Werkstück zunächst auf seinen Geraden vermessen. Durch die Meßpunkte wurden Ausgleichsgeraden gelegt. Auf die Bahnen des Putzprogrammes wurden die Translationen dieser Ausgleichsgeraden relativ zum 'Musterwerkstück' an dem eingelernt wurde aufaddiert. Für gekrümmte Bahnen wurde ein Schätzwert berechnet. [KOHLHEPP 91] Dieses Korrekturverfahren scheitert bei anderen Werkstücken, die nicht durch Geradenstücke beschrieben werden können, wie z.B. den Achsgehäusen. Es ist kein allgemeiner Ansatz. Die Programmierung dauert bei den großen aber einfachen Werkstücken 15-20 Stunden. Davon entfällt eine Stunde auf das Einlernen des Meßprogrammes mit der aufgabenorientierten Programmierung. Der Rest wird für das konventionelle Einlernen des Putzprogrammes verbraucht [LAWO 91]. Die Werkstücktoleranz lag eine Größenordnung unter

der Aufspanntoleranz. Die automatische Korrektur gestattet, verschiedene Aufspannpaletten mit circa einem Zentimeter Toleranz zu benutzen.

Die durchgeführten Versuche lassen keine Rückschlüsse auf die Verfügbarkeit der Anlage zu. Mechanische Schäden an Robotern und Werkzeugen waren immer das Ergebnis eines Bedienungsfehlers oder eines Fehlers in der Software. Die Führungsbahnen der Roboter müssen besser geschützt werden. Es wurde beobachtet, daß größere Gratstücke (ca. $6 \times 6 \times 6 \text{ mm}^3$) auf den Führungen liegen bleiben.

Die Versuche zeigten deutlich, daß die mechanischen Komponenten des Fertigungssystems erlauben, mit gutem Ergebnis Guß zu putzen.

8.2 Programmierkomfort

Bei der Beurteilung des Programmierkomforts müssen zwei Fragen bewertet werden:

- Wie bewährt sich die Geometrieerfassung durch direktes Führen des Meßroboters?
- Welche Vorteile bringt die aufgabenorientierte Programmierung?

Nach [VDI 2853] darf sich ein Bediener nur innerhalb des Arbeitsbereiches eines Roboters aufhalten, wenn die Maximalgeschwindigkeit des Roboters auf 250 mm/sec begrenzt wird. Schon aus diesem Grund kann die Dynamik menschlicher Bewegungen nicht erreicht werden.

Die Anschaltung des Joysticks an die Robotersteuerung geschieht über einen Proportionalregler, der die Signale mit verschiedenen Verstärkungsfaktoren bewertet. Mit dem Totmannschalter wird der Joystick aktiviert und deaktiviert, vorausgesetzt die aufgabenorientierte Bedienoberfläche erwartet das Einlernen einer Bahn. Mit einem weiteren Taster kann über die Logik in der Robotersteuerung die Geschwindigkeit um Faktor 10 herabgesetzt werden.

Schon nach einer kurzen Übungsphase kann der Bediener den Roboter mit dem Joystick recht gut führen. Eine genaue Positionierung wird durch die Geschwindigkeitsumschaltung erleichtert. Dann sind Vorgaben möglich, die bei großer Geschwindigkeit im Hysteresefenster des Joysticknullpunktes unterdrückt werden.

Gegenüber dem Verfahren des Roboters mit den Handverfahrtasten des Programmierhandgerätes (PHG) ergeben sich die Vorteile:

- Mehrere Roboterachsen können koordiniert bewegt werden.
- Die Verfahrachsen und die Verfahrrichtungen werden nicht verwechselt.

Beim Einlernen eines 'ebenen Teilungsgrates' werden nur die drei Freiheitsgrade der Ebene freigegeben. Bahnen, auf denen gemessen wird, werden vom System aufgrund der Messung korrigiert. Das Endresultat ist eine Äquidistante zur Werkstückoberfläche. Demgegenüber

wurden Luftbahnen völlig frei, d.h. ohne gesperrte Richtungen eingelernt. Eine typische Luftbahn besteht aus einer kleinen Positionsänderung an Beginn und Ende der Bahn und einer dazwischenliegenden großen Umorientierung um z.B. um eine Ecke herumzufahren. Insbesondere bei großen Umorientierungen, deren Einlernzeit im Bereich von 10 bis 30 Sekunden liegt, werden unabsichtlich Roboterachsen mitbewegt. Trotz der Datenreduktion im Anschluß an die Einlernphase ergeben sich Bahnen, die für eine Serienbearbeitung nicht akzeptiert werden können. Mit einfachen Maßnahmen, die aber zusätzliche Eingaben des Bedieners erfordern, ließ sich dieses Problem erfolgreich lösen:

- Es lassen sich nur die Drehachsen bewegen.
- Es lassen sich nur die Positionierachsen bewegen.
- Der Roboter kann, bezogen auf die Meßrichtung des Sensors, nur in der Ebene verfahren. Diese Luftbahn kann nicht aus der Teilungsebene herausführen.
- Der Roboter kann nur auf der Ebene verfahren.
- Die Bahn soll durch die direkte Verbindung zwischen Start und Ziel ersetzt werden.
- Mit dem graphischen Editor können die Punkte anschaulich manipuliert werden.

Im Zuge dieser Erweiterung wurde auch für das Einlernen von 'ebenen Teilungsgraten' eine neue Option geschaffen, die den Roboter nur noch in Vorschubrichtung und um eine Drehachse verfahren läßt. Damit kann der Bediener gezwungen werden, den Sensor senkrecht zur Oberfläche des Werkstücks zu führen.

Zum Einlernen der Bahnen des Bearbeitungsroboters, die nicht vom Meßprogramm übernommen und nicht automatisch generiert werden, existiert eine 'Master-Slave-Betriebsart'. Beide Roboter werden zunächst synchronisiert, d.h. der Meßroboter (Master) nimmt die Stellung des Putzroboters (Slave) ein. Dann werden beide Roboter mit den Signalen des Joysticks in der Hand des Meßroboters gleichmäßig bewegt. Damit wurden folgende Ziele verfolgt:

- Geometrieingaben für den Putzroboter sollen genau so einfach möglich sein wie für den Meßroboter, z.B. mit gesperrten Achsen.
- Die Bahnen sollen mit laufenden Werkzeugen eingelernt werden können.
- Es wird nur ein Joystick benötigt.
- Der Bediener soll über die sogenannte Kraftreflexion spüren, welche Bearbeitungskräfte wirken.

Das Erreichte rechtfertigt den Aufwand nicht:

- Die Kommunikation zwischen den Robotersteuerungen und den übergeordneten Rechnern ist trotz der systemnahen Programmierung (NetBios) langsam.
- Die Roboterdynamik ist viel zu gering um eine Kraftreflexion zu realisieren.
- Das System ist zu unruhig um in der Nähe des Werkstücks oder während der Bearbeitung eingesetzt zu werden.
- Die Sicht ist stark eingeschränkt (Entfernung ca. 5 m).

Besser und ausreichend ist ein weiterer Joystick, der unmittelbar am Sichtfenster zum Bearbeitungsroboter angebracht ist und die Sollwerte in Roboterweltkoordinaten statt in Werkzeugkoordinaten vorgibt.

Die aufgabenorientierte Programmierung hat sich bewährt. Zum Putzen eines ebenen Teilungsgrat-Bahnelementes wird benötigt:

- Eine Bahn aus Meßpunkten, die die Werkstückgestalt in zuvor definierter Genauigkeit beschreibt.
- Ein System bzw. ein Programm, das die Meßwerte in ein Bearbeitungsprogramm einfügt.
- Ein Bearbeitungsprogramm, das ein Werkzeug startet, die aktuelle Werkzeuggeometrie berücksichtigt und entscheidet, wie häufig die Bearbeitungsbahn abzufahren ist.

Der zweite Schritt, die Übertragung der Meßwerte, besteht vordergründig aus einer Transformation der Koordinaten. Das zweite Problem bei diesem Schritt wurde darin gesehen, den Editiervorgang des Putzprogrammes zu beherrschen. Im Simulationsmodus konnte die Problemlösung früh demonstriert werden. Beim Prototyp ergaben sich eine Reihe weiterer Probleme:

- Die Handorientierung des Bearbeitungsroboters muß mit einer werkzeugspezifischen Transformation hergeleitet werden.
- Die Achsgrenzen der Orientierungsachsen unterscheiden sich zwischen den beiden Robotern. Die Bearbeitungsmaschine wurde gegenüber dem Meßroboter um 180 Grad verdreht aufgebaut.
- Die Hand des Bearbeitungsroboters ist länger als bei der Auslegung angenommen. Deshalb sind die Reserven des Arbeitsbereiches aufgebraucht.
- Die Robotersteuerung reagiert auf Sollwerte außerhalb der sogenannten Softwareendschalter mit einer Fehlermeldung und Stillstand sobald die Situation erkannt ist, nicht erst beim Versuch die Grenzen wirklich zu überschreiten. Zeitpunkt und Ort des Stillstandes sind nicht vorhersehbar.

Eine Stärke der aufgabenorientierten Programmierung besteht darin, Probleme rechtzeitig zu erkennen und Lösungen anzubieten. Falls beispielsweise eine Orientierungsachse an ihre Grenzen stößt, muß diese Achse normalerweise um 360 Grad gedreht werden um fortfahren zu können. Diese Umorientierung muß kollisionsfrei erfolgen. Dabei hilft die Bedienoberfläche. Probleme mit den Achsgrenzen der Positionierachsen lassen sich oft beheben, indem leicht veränderte Orientierungen zugelassen werden. Die Bahnpunkte werden nach Zustimmung des Bedieners entsprechend geändert. Der Übergang von Koordinaten des Meßprogramms zu einem Bearbeitungsprogramm wäre ohne die gebotene Unterstützung unmöglich.

Die Editierfunktionen haben sich als sinnvoll erwiesen. Die Fangfunktionen werden hauptsächlich zum Editieren des Putzprogrammes benötigt. Die Funktion 'Zurücksetzen' läßt den

Roboter auf einer eingelernten Bahn in umgekehrter Richtung verfahren. Die Funktion ist nützlich, wenn bei großen Umorientierungen die Drehung in die verkehrte Richtung ausgeführt wurde und an einer Achsgrenze endete. Die dabei entstandene Bahn wird mit der Option bis zur gewünschten Stelle zurückgefahren und gelöscht.

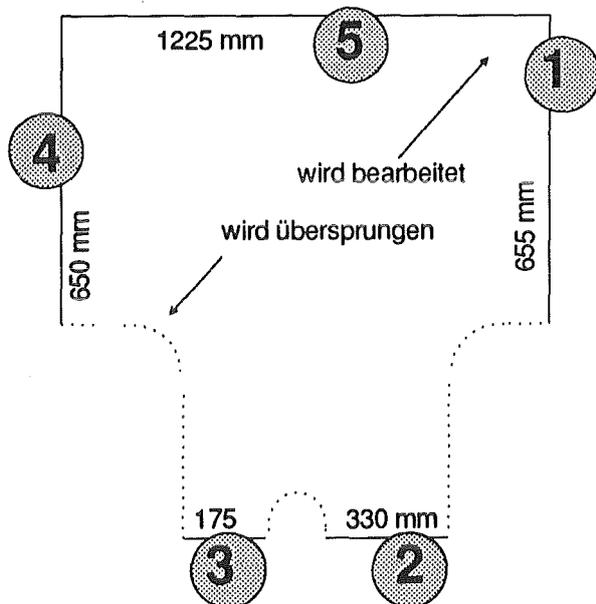


Bild 60 berücksichtigte Gratlinien
(unterlegte Zahlen dienen als Referenz im Text)

8.3 Beispiele für Putzergebnisse

Das Versuchswerkstück wurde an den 'Geraden' an der Außenseite mit dem Fräsmeißel geputzt. Die Rundungen wurden ausgespart (s. Bild 60). Was in der Draufsicht wie Geraden aussieht, ist in Wirklichkeit ein Kurvenverlauf, der im wesentlichen zwischen zwei Ebenen hin- und herspringt (s. Bild 61). Der Abstand der Ebenen ist kleiner als die Breite des Sensor-Meßfensters. Deshalb kann das Rohmeßprogramm in einer Ebene eingelernt werden. Die Auswertung sorgt für eine exakte Gratverfolgung.¹⁾

¹⁾Das konventionell eingelernte Programm verfuhr nur in einer Ebene. Dabei blieb in der untersten Ebene etwas mehr Grat stehen.

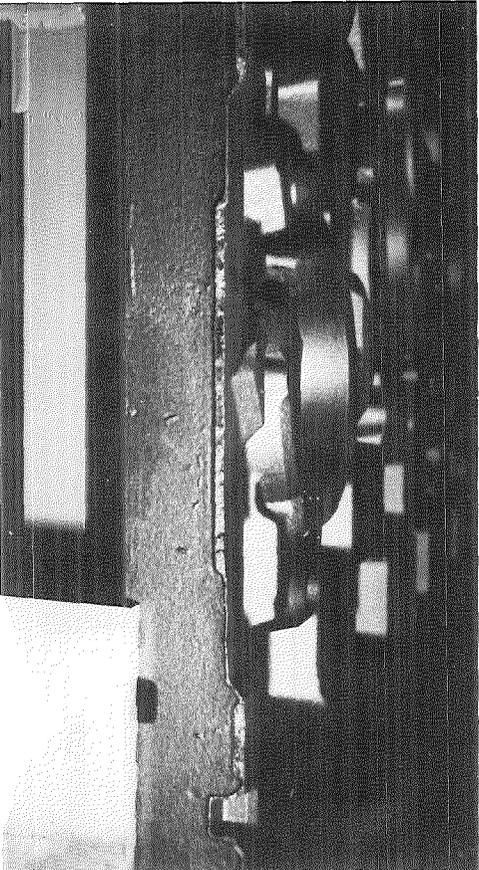


Bild 61 'sprunghafte' Teilungsebene

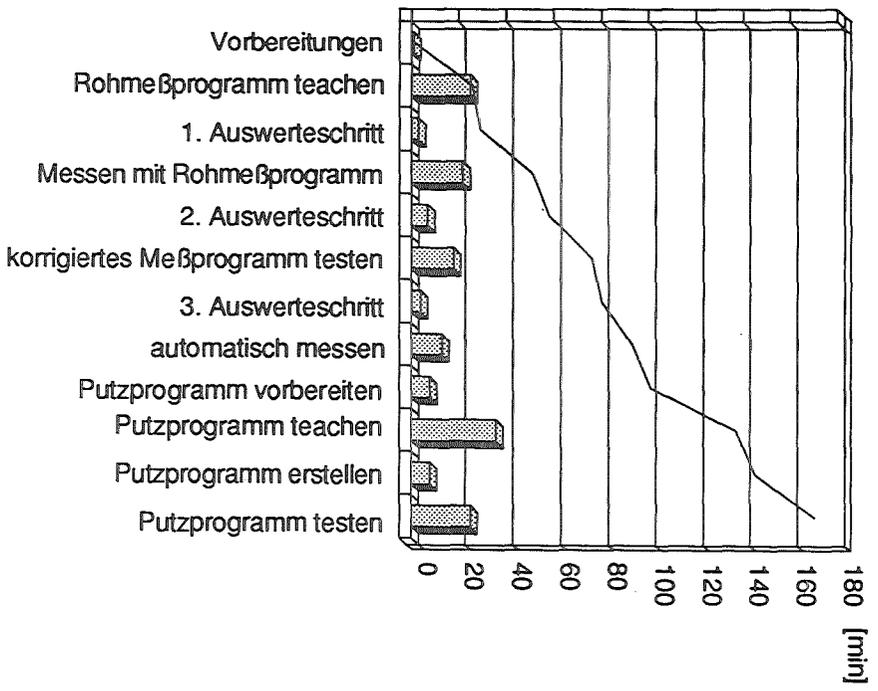


Bild 62 Gesamtzeitbedarf und Zeitbedarf der einzelnen Schritte

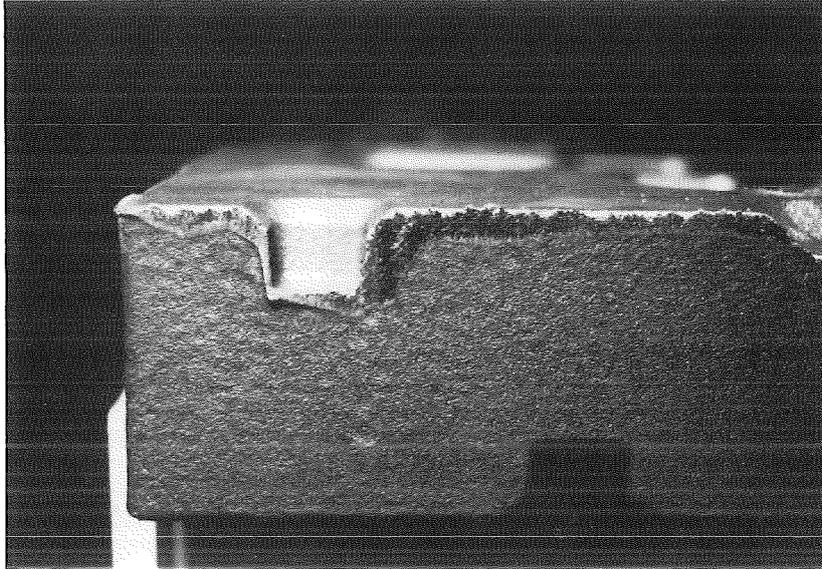


Bild 64 'Konturbündiges Putzergebnis'

Zurecht kann eingewendet werden, daß der Gratverlauf nicht vollständig erfaßt wurde. Wäre die Spanntasche nur wenige Millimeter schmaler gewesen, wäre der Knick im Gratverlauf nicht erkannt worden. Beim Einlernen wurde wie erwähnt nur in einer Ebene verfahren. Nach dem Einlernen des Rohmeßprogrammes folgt ein Auswerteschritt bestehend aus einer Datenreduktion und einer anschließenden Interpolation von Stützpunkten. Senkrecht zur Teilungsebene liegen zu diesem Zeitpunkt alle Bahnpunkte ideal in der Ebene. Die Dichte der Stützpunkte wird durch die Interpolationsparameter festgelegt. Wegen der vergleichsweise großen zulässigen Restgrate werden nur wenige Stützpunkte interpoliert. Soll die Gratkontur genauer erfaßt werden, ist bei der ersten Messung die Punktedichte höher zu wählen. Nach der Messung kann großzügiger reduziert werden, weil die Knickpunkte dann in der Datenbasis enthalten sind.

Im Automatikbetrieb wurde das Putzprogramm aus Punkten generiert, die nur noch in Richtung der Normalen auf die Werkstückoberfläche korrigiert wurden. Daher enthält jedes Putzprogramm diesen 'Schlenker' nach unten, auch wenn das Werkstück auf der Palette so verschoben ist, daß der ursprünglich dazugehörige Meßpunkt den Grat an der Oberkante des Werkstückes sieht. Für sehr genaue Bearbeitungen und Messungen ist es notwendig, die Scanrichtung immer senkrecht zum Gratverlauf zu halten. Bei geringen Ansprüchen an das Putzergebnis ist der dafür notwendige Zeitaufwand nicht zu rechtfertigen.

Am letzten Element mit der Nummer 5 kann nochmals die gute Reproduzierbarkeit des Putzergebnisses bewiesen werden. Aufgrund einer teilweisen Fehlinterpretation der Scans am Musterwerkstück enthielt das Meßprogramm Punkte, die zu tief lagen. An allen Werkstücken ergab das dieselbe Putzspur (s. Bild 65). Erkennbar war an diesem Bahnelement die Zustellung nicht ganz korrekt vorgenommen worden. Wäre mit dem äußersten Punkt

des runden Fräsmeißels bearbeitet worden, wäre die Putzspur eine gleichmäßige dünne Linie.

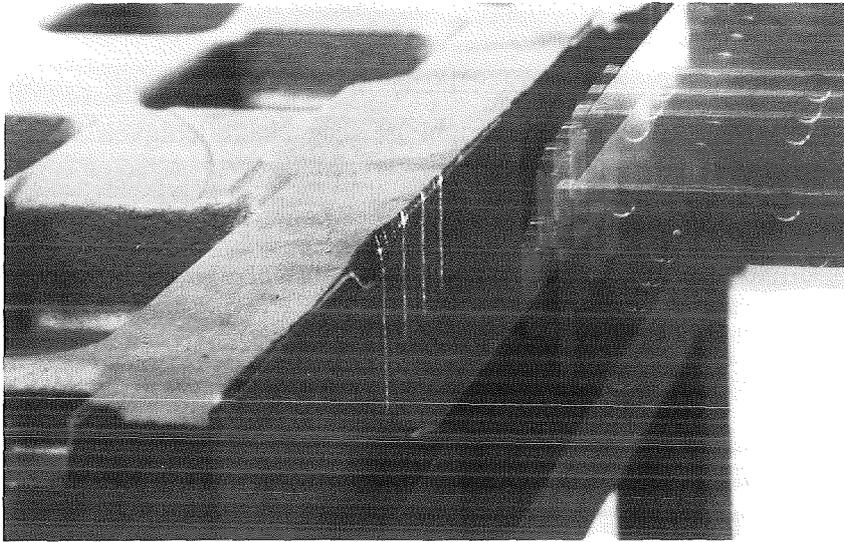


Bild 65 Bearbeitungsergebnis bei tiefliegendem Meßpunkt

In Bild 63 ist deutlich eine größere Lücke zwischen den Stützpunkten auszumachen. Die Werkstückoberfläche hat an der Stelle eine Vertiefung. Dort hatte die Auswertung der ersten Messung falsche Gratfußpunkte gefunden, die auf dem Höhenniveau der Vertiefung lagen. Diese Meßpunkte wurden gelöscht, um zu verhindern, daß das Werkzeug in das Werkstück hineinfräst.

Die Gußputzversuche an der Seitenwand wurden mit zwei unterschiedlichen Aufspannvorrichtungen vorgenommen. Während die Meßwerte bei gleicher Palette und unterschiedlichen Werkstücken nur um etwa einen Millimeter variieren, ist die Aufspannlage gegenüber der zweiten Palette um circa einen Zentimeter im wesentlichen entlang Element 5 verschoben. Auf das Putzergebnis hat das keinen Einfluß.

Der Zeitaufwand für das Putzen der Seitenwand hat kaum Aussagekraft. Im Mittel dauerte das Putzen 25 Minuten. Allerdings wurde nie im Automatikbetrieb geputzt, sondern immer in der Testbetriebsart zum Automatikbetrieb. Die Zeiten entstanden durch verschiedene Vorsichtsmaßnahmen. Die Vorschubgeschwindigkeit war sehr niedrig gewählt. Programme wurden nicht hauptzeitparallel geladen. Im Modus 'Putzprogramm testen' werden auch alle Rückwege kontrolliert, d.h. jedes Gratelement wird in Vorwärtsrichtung zweimal abgefahren. Die Bearbeitungszeiten der konventionell eingelernten Programme sind nicht erreichbar. Erstens putzt dieses Programm genauer und zweitens putzt und verfährt dieses Programm mit größeren Sicherheitsfaktoren. Letzteres ist der Preis, der zu zahlen ist, soll nicht für jedes Programm der optimale Parametersatz neu gesucht werden.

Am Musterwerkstück wurde ein zweites Beispiel untersucht. Die Funktionalität der Nachgiebigkeit sollte daran nachgewiesen werden. An dem Achsgehäuse (s. Bild 66) wurde ein Bahnstück eingelernt, das mit einer Schruppscheibe zu bearbeiten war.

Die Nachgiebigkeit muß zwei Aufgaben erfüllen:

- Beim Herunterfahren auf die Werkstückoberfläche muß die Bewegung gestoppt werden, sobald die Werkstückoberfläche erreicht ist. Die Nachgiebigkeit reagiert schneller als der Bediener.
- Am Ende der Bahn muß durch Auswertung des Endschalters entschieden werden, ob das Bearbeitungsergebnis akzeptiert wird. Auch diese Aufgabe wurde erfüllt.

Die Schleifspuren im Bild 66 demonstrieren das Putzergebnis. Die vorhandenen Achsgehäuse waren Ausschuß. Im Beispiel wurde um Kollision zu vermeiden mit konstanter Orientierung geschliffen, also nicht senkrecht zur Werkstückoberfläche. Dies birgt die Gefahr mit der Kante der Schruppscheibe Riefen in die Oberfläche zu schleifen. Das Schliffbild ist dort, wo reguläre Verhältnisse angetroffen wurden, deutlich besser als bei einer manuellen Bearbeitung. Im Gratbereich, mit den Vererzungen der Werkstückoberfläche ist die Interpretation der Meßwerte schwierig. Als Korrekturwert für die Bahn wurde dort nicht die Verschiebung des Gratfußpunktes benutzt, weil der Gratfußpunkt nicht gefunden wurde, sondern das veränderte Abstandsmaß zur Werkstückoberfläche. Das Ergebnis zeigt, daß sich trotz aller Geometrieabweichungen zwischen Werkstück und Werkzeug ein Gleichgewicht einstellt, das ein gutes Putzergebnis gewährleistet.

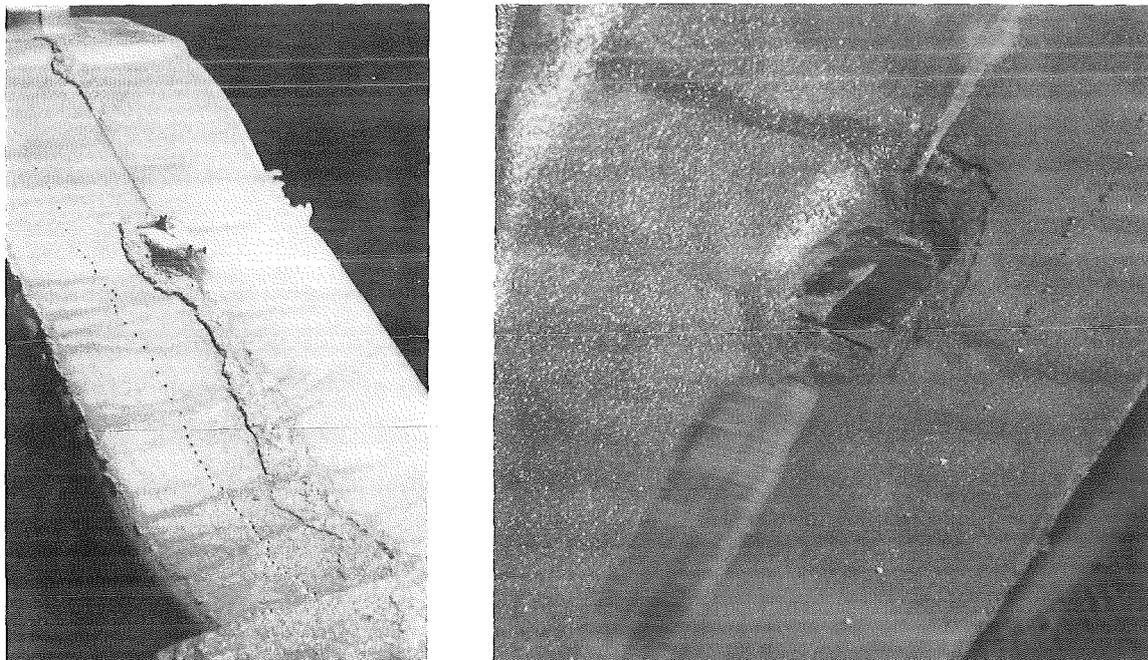


Bild 66 Schleifspuren auf einem Achsgehäuse
(rechts: geputzt; links: ungeputzt; gekörnte Punkte neben dem Grat repräsentieren jeweils einen Meßpunkt)

Die noch bestehenden Probleme sind Grundlage für die Verbesserungsvorschläge. Sie betreffen hauptsächlich den Geometrieerfassungssensor.

8.4 Verbesserungsvorschläge

Die Arbeit mit der Prototypanlage legt einige Mängel offen:

- Die Zuverlässigkeit der Interpretation der Sensorwerte muß verbessert werden.
- Die Breite des Werkzeuges muß automatisch berücksichtigt werden.
- Die Bearbeitungszeiten und Meßzeiten sind lang, weil die Übertragung der Roboterprogramme lange dauert.

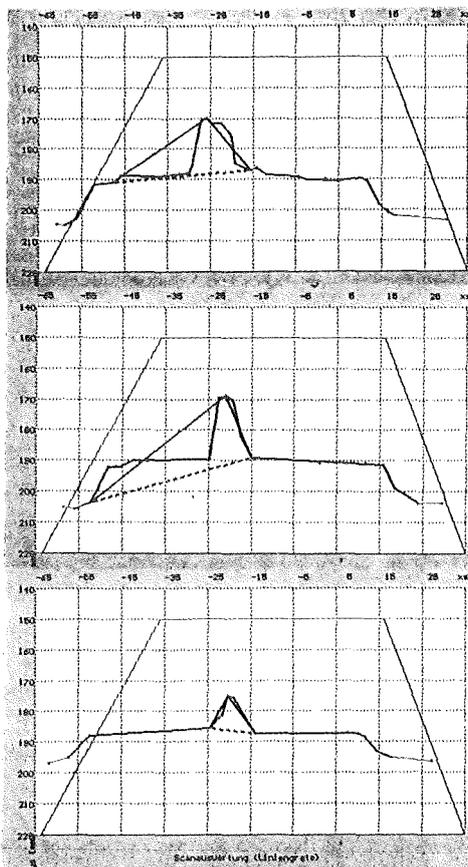


Bild 67 Zwei fehlinterpretierte und eine korrekte Messung

Gute Putzergebnisse können nur erzielt werden, wenn die Geometrie einwandfrei erfaßt wird. Fehlinterpretierte Messungen und Messungen, die überhaupt kein Ergebnis liefern, führen zu Störungen im Schliffbild. **Bild 67** zeigt oben zwei Fehlinterpretationen, die ein Eindringen des Werkzeuges in die Werkstückoberfläche zur Folge haben, unten einen korrekt gefundenen Grat. Mit besserer Wahl des Parameters 'maximale Gratfußbreite' können die

Fehlinterpretationen in diesen Beispielen vermieden werden. Auch bei optimierten Parametern liegt die Fehlerquote bei 5% [KOHLHEPP 91], wobei in dieser Zahl die Fälle ausgenommen sind, bei denen sich die Auswertung nicht entscheiden konnte, was im Ergebnis fast genauso schlecht ist.

Bei Redundanz in den Meßwerten kann die Nachbarschaft in die Auswertung mit einfließen. Sollte dennoch keine größere Treffsicherheit erzielbar sein, dann müssen andere Sensoren, z.B. eindimensional messende, tastende Sensoren eingesetzt werden.

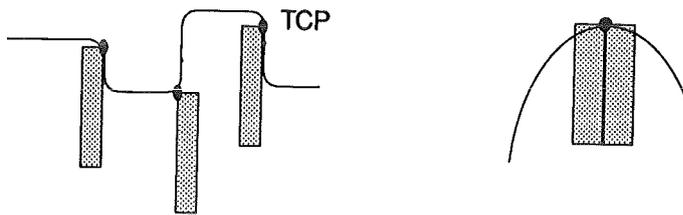


Bild 68 TCP (Werkzeugeingriffspunkt) an Absätzen und in Radien

In Bild 68 ist ein weiteres Problem dargestellt. Mit dem Sensor kann die Geometrie exakt erfaßt werden. Das Werkzeug hat aus Stabilitätsgründen eine Breite von 6 bis 40 Millimetern. An Absätzen und in Radien muß dieser Umstand bedacht werden.

Effiziente allgemeine Kollisionsbetrachtungen bauen hierarchische Strukturen auf, in denen das Modell mehrere Verfeinerungsstufen besitzt. Mit groben Mustern können schnell große Räume ausgeschlossen werden. Werden die Modelle aus Kugeln gebildet ist die Abstandskontrolle zweier Elemente besonders einfach. Diese Verfahren implizieren alle, daß Kollision vermieden werden muß und selten auftaucht, daß also nur selten hohe Verfeinerungsstufen herangezogen werden müssen. Beim Gußputzen muß das Werkzeug mit dem Werkstück kollidieren, um Grat abzutragen. Es müßte immer mit exakten Modellen gerechnet werden [HORSCH 91].

Eine 'lokale' Kollisionsberechnung im Bereich des Werkzeuges löst das Problem. An jedem Punkt P (s. Bild 69) wird aus den Punktkoordinaten ein Werkzeugkoordinatensystem mit dem Ursprung in der Scheibendrehachse bestimmt. Zwei Koordinaten x und y liegen in der Scheibenebene. Die dritte Koordinate z steht parallel zur Werkzeugdrehachse. In diesem Koordinatensystem finden die weiteren Rechnungen statt. Auf welcher Seite des TCPs das Werkzeug liegt, wird bei der Werkzeugdefinition festgelegt. Liegt diese Seite in Vorschubrichtung vorne, so werden die Bahnpunkte vor dem Istpunkt untersucht. Sonst bezieht sich die Rechnung auf die hinteren Bahnpunkte. Die Nachbarschaft wird soweit ausgedehnt, bis der untersuchte Punkt Q in z -Richtung weiter als die Werkzeugbreite b entfernt ist. Ob der Punkt kollisionsgefährdet ist, ergibt sich aus:

$$r^2 = Q_x^2 + Q_y^2.$$

Mit dem Strahlensatz läßt sich gegebenenfalls die Verschiebung d berechnen, um die der Punkt P verschoben werden muß:

$$d = c \cdot b / a$$

Die Verschiebung wird auf den Wert c begrenzt, falls die Entfernung a kleiner als die Scheibenbreite b sein sollte.

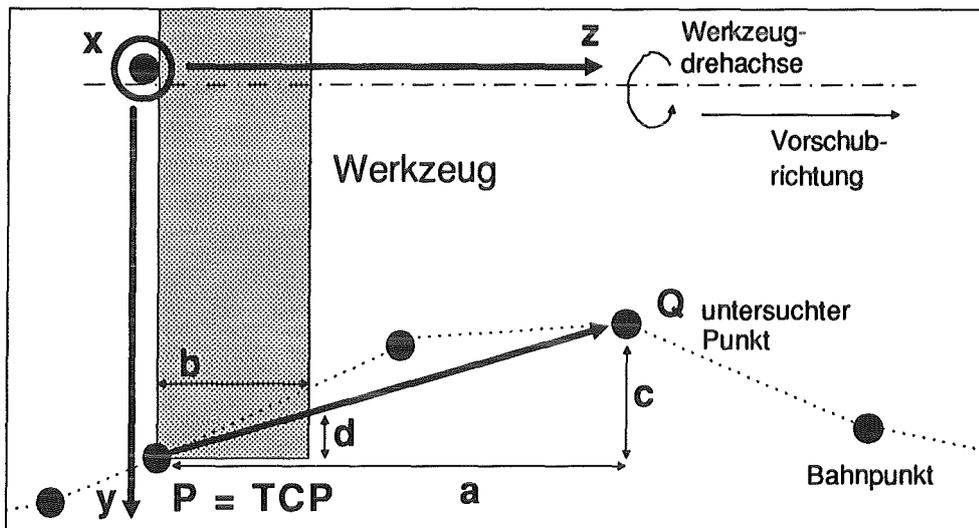


Bild 69 Zur 'Kollisionsvermeidung' mit dem Werkzeug

Eine Geschwindigkeitssteigerung läßt sich erreichen durch:

- schnellere Schnittstellen,
- Speichern der Programme im Hauptspeicher der Robotersteuerung.

Serielle V24-Schnittstellen mit 9600 Baud sind gegenwärtig Standard für Robotersteuerungen. Neue Robotersteuerungen basierend auf neuer Hardware werden jetzt vorgestellt. Diese werden (hoffentlich) schnellere Schnittstellen bieten. Der zweite Weg funktioniert nur bei Serienteilen oder bei Werkstücken mit einfacher Geometrie. Er erfordert eine weitere Verwaltungsinstanz, die darüber wacht, daß jeweils die richtigen Programme geladen sind.

8.5 Erweiterte Aufgabenstellung

Die Durchbrüche der Druckmaschinenseitenwand können nur mit dem Schlagmeißel bearbeitet werden. Der Geometriesensor kann die Gratverläufe dort nicht messen. Deshalb konnten die Durchbrüche mit den ursprünglich vorhandenen Optionen der aufgabenorientierten Programmierung nicht geputzt werden.

Am Beispiel der Einführung einer Option zum Einlernen solcher 'Durchbrüche' wird erkennbar, daß die Methoden geeignet sind, in kurzer Zeit neue Werkzeuge bereitzustellen.

Runde Durchbrüche werden in mehreren Schritten eingelernt:

- Eine Luftbahn führt den Roboter zum Durchbruch.
- Der Meßroboter wird auf mindestens 3 Punkte am Kreisumfang positioniert.
- Der Bediener gibt die Zahl der Punkte an, an denen gemeißelt werden soll.
- Der Meßroboter fährt die Punkte in der Luft ab. Die Kreisberechnung in einer beliebigen Ebene und die Aufteilung übernimmt das Programmiersystem.
- Wenn alle Durchbrüche eingelernt sind, kehrt der Roboter zum Startpunkt der Luftbahn zurück, die zum ersten Durchbruch führte.
- Im Automatikbetrieb werden diese Bahnen vom Meßroboter übersprungen, da Messungen nicht möglich und nicht nötig sind.

Diese umfangreiche Erweiterung wurde innerhalb einer Woche entworfen und realisiert. Die Testphase dauerte nochmals eine Woche. - Ein lohnender Aufwand und Ermutigung über Systemvarianten nachzudenken.

9 Systemvarianten

Das vorgestellte Fertigungssystem zum Gußputzen mit aufgabenorientierter Programmierung ist eine sehr aufwendige Anlage für ein begrenztes Teilespektrum. Die Komponenten und Methoden lassen sich weiterverwenden und weiterentwickeln. Einige Systemvarianten werden diskutiert.

9.1 'Einroboterlösung'

Die Investition für eine Lösung mit einer Meß- und einer Bearbeitungsmaschine ist hoch.¹⁾ Kleinere Betriebe oder Gießereien, die durch verschiedene andere Maßnahmen den Putzaufwand verringern können, werden die Zwei-Maschinen-Anlage nicht auslasten. Für diese Einsatzfälle wird ein Gußputzzentrum mit einem Roboter entwickelt, die sogenannte Einroboterlösung. Vor- und Nachteile werden in **Bild 70** gegenübergestellt.

Vorteile	Nachteile
niedrige Investitionskosten	erfordert höhere Rechenleistung
geringer Platzbedarf	geringerer Putzleistung
Transformation vom Meß- zum Putzroboter entfällt	erschwerte Programmierung
	Sensorik wird im schmutzigen Bereich eingesetzt

Bild 70 Vor- und Nachteile der Einroboterlösung

Die Arbeitsabläufe unterscheiden sich kaum zwischen den Varianten. Für den Anwender ergibt sich ein Unterschied beim Einlernen des Bearbeitungsprogramms. Durch den Fortfall der Koordinatentransformation vom Meß- zum Putzroboter und der damit verbundenen Fehler ist das 'Rohputzprogramm' genauer. Trotzdem müssen für das Putzprogramm Bahnen und Korrekturen in Position und Orientierung eingelernt werden. Dazu sind mehrere Alternativen denkbar:

- Wird am **geputzten Werkstück** eingelernt, dann kann die Programmierung mit stehenden Werkzeugen oder Attrappen erfolgen. Der Bediener kann den Joystick in der

¹⁾Die Kosten hängen auch davon ab, wo die Systemgrenzen gezogen werden. Inclusive Engineeringleistung, Kapselung, Transportsystem, Hard- und Software sind circa 2 Millionen DM anzusetzen.

Hand des Roboters benutzen, um die Maschine zu bewegen. Dafür würde der Preis gezahlt, daß die Grate nicht mehr sichtbar sind und der organisatorische Aufwand zunimmt.

- Falls am **ungeputzten Werkstück** eingelernt werden soll, müssen die Werkzeuge eingeschaltet werden. Eine Zustellung in Richtung des Werkstücks ist nur sinnvoll, wenn der Grat dabei abgetragen wird. Funkenflug und Bearbeitungsgeräusch können das fehlende Kraftgefühl und schlechte Sichtbedingungen kompensieren. Bei laufendem Werkzeug muß der Bediener hinter einer Schutzwand stehen. Wenn an einem stationären Joystick Einlernhilfen, wie beispielsweise Einschränkung der Bewegungsmöglichkeiten auf die Teilungsebene, realisiert werden sollen, muß das Joystickkoordinatensystem rechnerisch in das Werkzeugkoordinatensystem des Roboters gedreht werden.

Wird auf einer Maschine gemessen und bearbeitet, dann sollte dies ohne Pause zwischen den Schritten geschehen. Besonders bei großen Werkstücken läßt sich kein Puffer realisieren. Die Auswertung der Meßergebnisse muß schnell sein. Es ist höhere Rechenleistung erforderlich. Ein Problem ergibt sich mit der Sensorik. Als Motivation für eine Lösung mit getrennter Meßmaschine war ganz wesentlich, daß dadurch die Sensorik dem schmutzigen Bereich entzogen werden kann. Einfache Abstandssensoren sind teilweise recht robust. Werden diese mit einer Werkzeugwechseinrichtung nur bei Bedarf angeflanscht und sonst in einem geschützten Bereich abgelegt, dann ist ausreichende Systemverfügbarkeit zu erwarten. Bei aufwendigeren Sensoren wie einem Laserscanner werden sich Probleme mit den Steckverbindungen in der Werkzeugwechseinrichtung ergeben.

Unter den Randbedingungen:

- geringer Ansprüche an die Restgrathöhe,
- einfacher Formen der Werkstücke und
- großer Stückzahlen

bietet es sich an, die Messung während der Nebenzeiten zu erledigen, indem Meßsysteme in die Aufspannung integriert werden. Bei der Positionierung der Meßelemente bietet das Fertigungssystem Unterstützung an. Die Meßwerte müssen sich mit Bearbeitungsbahnen korrelieren lassen. Der eleganteste Weg ist in **Bild 71** gezeigt. Das erste Los des Werkstücktyps wird unter Zuhilfenahme eines Meßprogramms bearbeitet. Dabei werden die Meßwerte gespeichert.

Die aufgezeichneten Meßwerte werden untersucht, um die relevanten Punkte zu bestimmen. Dazu werden eine Reihe von Hypothesen zugrundegelegt:

- Das Werkstück liegt verschoben oder verdreht auf dem Werkstückträger. (=> Werkstückkoordinatensystem)
- Das Werkstück ist insgesamt 'geschrumpft' oder 'gedehnt'. (=> Skalierungsfaktor)

- Ein einzelnes Bahnelement ist verschoben oder verdreht, z.B. bei Kerngraten (=> Transformation zwischen Werkstückkoordinatensystem und Bahnelementkoordinatensystem)

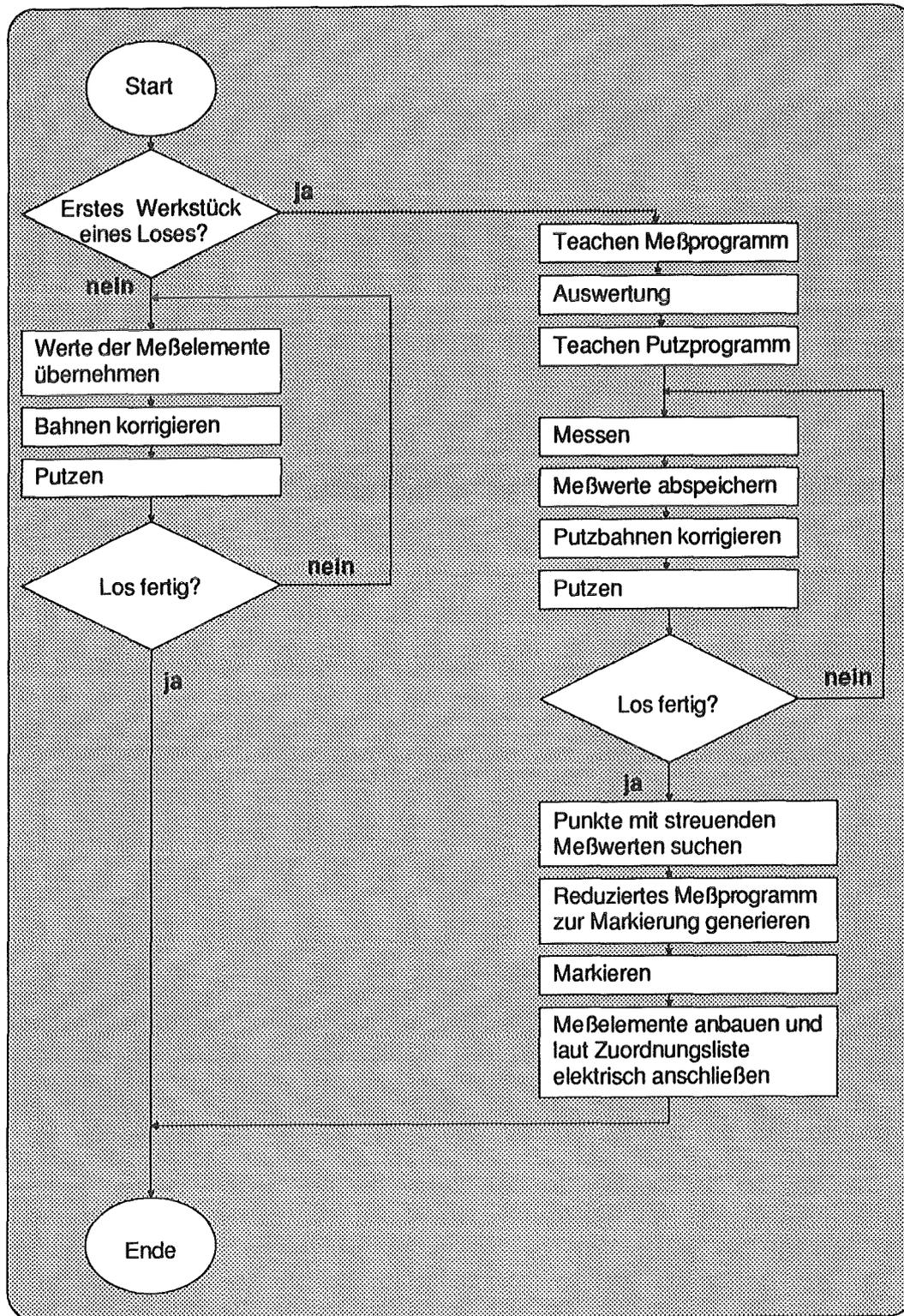


Bild 71 'Programmierung' der Großserienlösung

Bahnpunkte, die sich mit diesen Hypothesen aus anderen Punkten herleiten lassen, werden in der Meßpunktliste gestrichen. Der Roboter kann mit einem Schreibstift statt des Meßelementes die Meßpunkte am Werkstück markieren. Das System druckt eine Zuordnungsliste aus, die den Zusammenhang zwischen Meßpunkt und Meßelementnummer herstellt. Diese Liste wird benötigt, um die in beliebiger Reihenfolge eingelesenen Meßwerte richtig zu sortieren.

Selbstverständlich kann diese Meßpunktereduktion auch im Zusammenhang mit einem Laserscanner oder einem vom Meßroboter geführten Taster eingesetzt werden.

9.2 Gußputzen mit Werkstückhandhabung

Die Mehrheit der Gußstücke ist leicht genug, um von einem Roboter gehoben zu werden. Bei kleinen Teilen bietet sich die Werkstückhandhabung an. Bei kleinen Gußstücken übersteigt die Bearbeitungskraft leicht die Gewichtskraft.

Der wesentliche Vorteil (s. **Bild 72**) der Werkstückhandhabung besteht in der Freiheit bei der Werkzeugauswahl. Die Werkzeuge können beliebig groß und schwer sein, d.h. die Antriebsleistung ist praktisch unbegrenzt und damit z.B. auch der Schleifscheibendurchmesser. Sogar Werkzeuge, die bei der Werkzeughandhabung kaum in Betracht kommen, wie Bandschleifer, werden zu Alternativen. Die Werkzeuganzahl ist nahezu beliebig, weil die Werkzeugwechselzeiten gering sind. Es muß dazu nur eine kurze Strecke verfahren werden.

Vorteile	Nachteile
freie Werkzeugwahl effektivere Absaugung kürzere Werkzeugwechselzeiten einfacherer Abtransport abgeschnittenen Materials Handhabungsprobleme teilweise integriert	aufwendige Greifer aufwendiges Ordnungssystem

Bild 72 Vor- und Nachteile der Lösung mit Werkstückhandhabung

Mit den Werkzeugen verknüpft ist das Entsorgungsproblem. Beim Schleifen muß der Schleifstaub abgesaugt werden. Das geschieht effektiver, wenn die Richtung des Funkenflugs gleich bleibt. An einer stationären Trennmaschine können abgeschnittene Speiser automatisch abtransportiert werden.

Bei großer Teilevielfalt steht diesen Vorteilen ein Nachteil gegenüber. Jeder neue Werkstücktyp erfordert einen zusätzlichen Greifer. Bei großen Teilen können in der Aufspannung Spannmittel benutzt werden, die auch einige Zentimeter Grat verdecken dürfen. Der Platzbedarf für die Spannmittel ist bei großen Teilen kaum größer als bei sehr kleinen. Die aufzunehmenden Bearbeitungskräfte sind ungefähr gleich.

Universalität im Greifer kann nur erreicht werden, wenn die Werkstücke mit einem einheitlichen Griff gegossen werden. Verschiedenen Möglichkeiten bieten sich an (s. Bild 73):

- Im Idealfall kann das Griffstück am Werkstück verbleiben. Dann kann das Werkstück auch geordnet abgelegt werden.
- Speiser werden oft mit exothermen Speisereinsätzen geformt. Solche Speiser sind bei vielen Werkstücken gleich. Das Problem besteht darin, daß Speiser vom Werkstück wegragen. Es ergeben sich dadurch große Hebelarme und hohe Momente auf die Roboterhand.
- Das Anschnittsystem könnte standardisiert werden.
- Am Werkstück kann ein Griffstück angegossen werden, das abschließend abgetrennt wird. Dabei ist zu beachten, daß:
 - der Trennschnitt exakt geführt werden muß, damit kein Restgrat verbleibt,
 - das Griffstück ohne Kerne gegossen werden kann und daß
 - das Griffstück dort angebracht ist, wo die größten Kräfte auftreten.

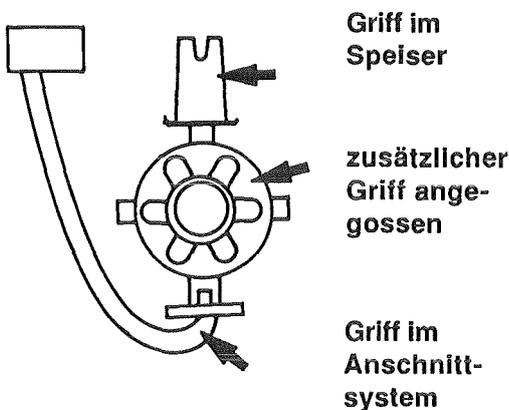


Bild 73 Möglichkeiten zur Griffausbildung

Ein Problem ist aber nicht nur der Greifer. Bevor das Werkstück gegriffen werden kann, muß es in eine Greifposition gebracht werden. Die Teile liegen nach dem Strahlen ungeordnet in einem Transportbehälter. Der sogenannte 'Griff in die Kiste' ist ungelöst. Also ist eine zweite werkstückspezifische Vorrichtung nötig, wenn keine Standardschnittstellen gefunden oder geschaffen werden.

Auch in diesem Fall könnte eine Zwei-Roboter-Lösung erwogen werden. Ein Meßroboter könnte das Werkstück mitsamt Greifer weitergeben. Dieser Aufwand ist aber nicht gerechtfertigt. Bei kleinen Gußteilen liegen die Maßtoleranzen wesentlich näher bei der zulässigen

Restgrathöhe, als dies bei großen Teilen der Fall ist. Deshalb können viele Werkstücke ganz ohne Messung geputzt werden. Unter Verwendung einfacher Greifer, sind die Aufspanntoleranzen allerdings nicht zu vernachlässigen. Nachgiebig gelagerte Werkzeuge, die kleine Abweichungen auffangen, sind nur eine Teillösung. Spätestens, wenn mit Trennscheiben geschnitten werden soll, müssen die Werkzeuge starr gelagert werden. Eine Messung ist dann unumgänglich. Die Strategie aus **Bild 71** in leicht abgewandelter Form steigert die Wirtschaftlichkeit. Statt die Meßelemente in den Greifer einzubauen, kann das Werkstück mit dem 'Markierungsprogramm' vermessen werden.

Die Programmierung erfolgt wie bei den anderen Systemlösungen. Oft wird der Arbeitsbereich eines Roboters, der zur Werkstückhandhabung eingesetzt wird, unüberschaubar und mit Werkzeugen zugestellt sein. Dann muß der Joystick außerhalb montiert werden.

9.3 Entgraten, Kleben, Bahnschweißen etc.

Das Entgraten unterscheidet sich vom Gußputzen durch die Größe der Grate und die Höhe der Unsicherheit über die Lage des Gratfußpunktes. Gußputzen ist zweifellos technisch schwieriger, die Aufgaben sind sich aber so ähnlich, daß die aufgabenorientierte Programmierung weitgehend übernommen werden kann. Eine wichtige neu hinzukommende Aufgabe ist die 'punktförmige' Bearbeitung, die beim Gußputzen kaum eine Rolle spielt. Beim Entgraten müssen Bohrungen angesenkt werden. Für die Roboter bedeutet das einen Punkt anzufahren, kurz zu warten, und dann die nächste Aktion auszuführen. Flächiges Bearbeiten entfällt beim Entgraten. Eine Messung kann auch hier das Bearbeitungsergebnis positiv beeinflussen.

Bei Klebe- und Bahnschweißaufgaben müssen häufig, ähnlich wie beim Entgraten und Gußputzen, komplizierte Bahnen abgefahren werden. Ein Problempunkt ist auch dabei die Programmierung der Bahn. Ein anderer Punkt ist die Beherrschung der Technologien. Das Auftragen von Kleber scheint eine einfache Tätigkeit zu sein. Das Problem ist die Ventilsteuerung. Abhängig von der Robotergeschwindigkeit muß das Ventil in der Klebstoffzuführung weiter geöffnet oder geschlossen werden. Beim Bahnschweißen sind die Parameter noch vielfältiger. Der Schweißstrom, der Drahtvorschub, die Pendelamplitude etc. müssen eingestellt werden. Die Beispiele zeigen, daß neben der reinen Bewegungsprogrammierung aufgabenspezifisches Expertenwissen nötig ist.

In neuen Märkten, in kleineren Betrieben oder bei niedrigen Stückzahlen, wird dieses Problem immer wichtiger. Preisgünstige PCs bieten hervorragende Möglichkeiten, Wissen- und Mensch-Maschine-Schnittstellen bereitzustellen, die einfaches und schnelles aufgabenorientiertes Programmieren erlauben. Das Programmiersystem zum Bahnschweißen muß die Sprache des Schweißers beherrschen, wie das System zum Gußputzen die des Gießers.

10 Zusammenfassung

Gußteile, wie Achsgehäuse von Baumaschinen oder Maschinengestelle, müssen vor der Endbearbeitung geputzt werden. Harte Gußgrate belasten die Werkzeuge zu stark. Die Reproduzierbarkeit der Aufspannung wird durch Grate verschlechtert. Grate entstehen auch an Oberflächen, die nicht weiterbearbeitet werden.

Am Stand der Technik des Gußputzens von Großgußteilen hat sich lange nichts geändert. Die Werkstücke werden manuell unter großer Belastung für die Werker geputzt. Existierende Lösungen für Kleingußteile scheitern häufig am Aufwand und der Art der Programmierung.

Das Fertigungssystem zum Gußputzen sollte eine Lösung für große Gußstücke sein, die in kleinen Stückzahlen hergestellt werden. Wichtige Randbedingungen waren: Werkzeug-handhabung, universelle Aufspannvorrichtungen, aktiver Toleranzausgleich und Werkstattprogrammierung durch vorhandenes Personal.

Die Gratsystematik ist der Ausgangspunkt für die aufgabenorientierte Programmierung. Der Begriff 'ebener Teilungsgrat' ist eine Vokabel der Gießer. Er sagt eine Menge aus: Der Grat liegt in einer Ebene. Die möglichen Gratformen werden eingeschränkt. Im Unterschied zu einer 'Luftbahn' muß der 'ebene Teilungsgrat' mit einem laufenden Werkzeug bearbeitet werden. Die aufgabenorientierte Programmierung gibt beim Einlernen eines 'ebenen Teilungsgrates' nur die Freiheitsgrade in der Ebene frei, die zuvor definiert werden kann.

Die Bedienoberfläche sorgt bei der aufgabenorientierten Programmierung für eine natürliche Gliederung des Gesamtprogrammes in viele einzelne Bahnelemente. Den Bahnelementen werden Attribute zugeteilt, die eine automatische Parametervorgabe oder eine 'automatische Logik' (z.B.: Werkzeug einschalten) unterstützen. Die komplizierten Verläufe der Gratfußpunkte werden durch direktes Entlangführen der Maschine mit Hilfe eines Joysticks aufgezeichnet.

Die betrachteten Werkstücke werden mit Toleranzen von ca. 10 Millimetern gegossen. Diese Geometrieabweichungen müssen aktiv kompensiert werden. Die beschriebene Lösung unterscheidet sich von älteren Ansätzen durch die Trennung in die Arbeitsschritte Messen und Bearbeiten.

Die Übertragung der Meßergebnisse auf eine Bearbeitungsbahn wird durch eine Reihe von Geometrieabweichungen gestört, denen mit einfachen aber wirkungsvollen Mitteln begegnet wird. Eine 'Nachgiebigkeit' besteht aus einer Linearführung, einem Pneumatikzylinder und einigen Endschaltern. Im Unterschied zu früher vorgeschlagenen elastischen Elementen wird die 'Nachgiebigkeit' mit einstellbarer Kraft gegen einen mechanischen Anschlag gedrückt. Ein Endschalter erkennt, falls das System weiter als geduldet ausweicht. Die Bear-

beitungsbahn kann wiederholt werden. Der verbleibende Fehler ist bei geeignet aufeinander abgestimmten Systemkomponenten tolerierbar.

Die Hardwarebauteile können in vier Gruppen eingeteilt werden. Ein Transportsystem ist nur rudimentär realisiert. Das Meßsystem bildet ein Portalroboter als Meßmaschine und ein Laserscanner als Geometrieerfassungssensor. Als Bearbeitungsmaschine kämen auch Werkzeugmaschinen in Betracht. Ausgewählt wurde ein Portalroboter der nahezu baugleich zur Meßmaschine ist. Die Steuerung basiert auf zwei Robotersteuerungen und einem übergeordneten Rechnernetz aus IBM-kompatiblen Personalcomputern.

Zur Koordination der Teilaufgaben innerhalb des Rechnernetzes wurde eine dezentral arbeitende Ablaufsteuerung entwickelt. Diese übernimmt die Verwaltung aller Werkstückdaten, die Verwaltung der individuell zu einem Werkstück gehörenden Programme, die in einem 'Ablaufplan' definiert sind, und die Bedienung der Warteschlangen. Die Bedienoberfläche wurde ergonomisch mit Menüs und Bildschirmmasken in allen Programmen einheitlich gestaltet. Es wird vielfältige Grafikunterstützung geboten.

Am Beispiel eines 'ebenen Teilungsgrates' wird detailliert beschrieben, welche Schritte zum Einlernen der Bahn durchzuführen sind und wie die dahintersteckenden Programme strukturiert sind.

Ein wesentlicher Aspekt ist der, daß das Bearbeitungsprogramm aus dem Meßprogramm entsteht. Es wird erweitert um Werkzeugwechsel. In der Regel wird die Reihenfolge der Bahnelemente beim Putzen verändert. Andere Bahnen werden weggelassen oder geteilt, weil sie mit verschiedenen Werkzeugen bearbeitet werden sollen. Diese Editiervorgänge müssen im Automatikbetrieb nachvollziehbar sein.

Beim Editieren kann auf bekannten Bahnen entlangefahren, oder von einem bekannten Punkt ausgehend ein neues Bahnelement eingefügt werden. Nur mit den 'Fangfunktionen' der aufgabenorientierten Programmierung kann wieder auf zuvor eingelernten Bahnen aufgesetzt werden. Die Schwierigkeiten bei der Bildung von Bahnschleifen werden gelöst.

Erwartungsgemäß löst der Prototyp des Fertigungssystems nicht alle Probleme des Gußputzens. Die Zuverlässigkeit der Scanauswertung muß verbessert werden. Ein Programm zur Berücksichtigung der Werkzeugbreite ist in die Abläufe einzubinden. Beide Probleme lassen sich auch mit einem als Werkzeugattrappe ausgebildeten taktilen Sensor lösen.

Am Beispiel wurde gezeigt, daß in vielen Werkstückbereichen mit dem Einsatz des Fertigungssystems sehr gute Putzergebnisse erzielt werden. Die Schleifspuren sind gleichmäßiger als bei der manuellen Bearbeitung.

Ein Entwicklungsziel bestand darin, das Programm in 5 Stunden einlernen zu können. Dies ist erreichbar. Bei einem etwas einfacheren Werkstück als dem Musterwerkstück dauerte die Programmierung 3 Stunden. Danach war das erste Exemplar geputzt.

Mit dem sogenannten 'Fräsmeißel' gelang eine beträchtliche Produktivitätssteigerung. Hohe Grate und Anschnittreste mit einer Breite von 7 Millimetern werden bei Grauguß mit Vorschubgeschwindigkeiten von über 600 mm/sec in einem Schnitt zuverlässig geputzt.

Die Investitionskosten können durch die 'Einroboterlösung' reduziert werden. Kleine Werkstücke können mit ähnlichen Methoden und Verfahren geputzt werden.

Die aufgabenorientierte Programmierung kann Industrieroboteranwendungen zum Kleben, Bahnschweißen u.s.w. neuen Anwenderschichten zugänglich machen. Sie berücksichtigt die personellen und organisatorischen Verhältnisse des Betriebes ebenso wie die technischen Randbedingungen. Die aufgabenorientierte Programmierung macht große technische Systeme mit vielen Einzelkomponenten und Einstellparametern beherrschbar.

11 Literatur

- [Abele 83] Abele, E.: "Gußputzen mit sensorgeführten programmierbaren Handhabungsgeräten", Springer Verlag, Berlin 1983
- [Ambos 90] Ambos, E.; Pokrzywnicki, B.v.: "Neue technologische Lösungen beim Einsatz von Manipulatoren in Gießereien". Gießerei-Rundschau Nr. 718, 1990.
- [Aretz 88] Aretz, R.: "Fräserradienkorrektur und Kollisionsbetrachtung bei digitalisierten Freiformflächen", Vortrag beim Fachgespräch zwischen Industrie und Hochschule - komplexe Werkstücke in der Fertigung, Universität Dortmund, 1988
- [Asada 88] Asada, H.; Goldfine, N.: "End-effector design for Robotic grinding", IFAC Proceedings of Automatic Control, World Congress 1987, Volume IV, S. 187-192, 1988
- [Bass 89] Bass, D.: "Fertigputzen mit einer programmgesteuerten 'intelligenten' Entgratungsanlage", Gießerei 67 (1980) Nr. 15/16 S. 495-499
- [Bolle 80] Bolle, H.H.: "Einsatz eines Industrieroboters zum Gußputzen", Gießerei 67 (1980) Nr. 15/16 S. 492-495
- [Bolle 81] Bolle, H.H.: "Humanisierung von Arbeitsplätzen in der Kundengießerei durch Einsatz einer automatischen Gußputzeinrichtung"; HDA-Abschlußbericht, BMFT-FB-HA 81-004, 1981
- [Breitwieser 86] Becker, H.; Breitwieser, H.; Weber, W.: "Fortschritte bei Servomanipulatoren durch digitale Steuerung", KfK Nachrichten, Jahrgang 18 1/86, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 32-39
- [Bronstein] Bronstein, Semendjajew: "Taschenbuch der Mathematik", 18. Auflage Verlag Harri Deutsch, Thun, 1979
- [Brooks] Brooks, M. et al: "AC: A General-Purpose Controller for Manipulator Endpoint Admittance", IARP International Advanced Robot Program
- [Cardaun 90] Cardaun, U.: "Erfahrung vorausgesetzt - Off-line-Programmierung von Lackierrobotern", roboter, Heft 5, S. 18, 1990
- [Craig 89] Craig, J.J.: "Introduction to Robotics - Mechanics and Control", Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1989

- [DIN 1680.2] DIN 1680 Teil 2. "Gußrohnteile - Allgemeintoleranz-System", Beuth Verlag, Berlin, 1980
- [DSA 201] Deutscher Schleifscheibenausschuß, Richtlinie 201: "Anerkennungsgrundsätze für Schutzeinrichtungen", DSA, Hans-Böckler-Allee 26, Hannover, Entwurf 1985.
- [Feldt 88] Feldt, W.: "Automatisierung des Gußputzens mit rechner (CNC)- und sensorgesteuerten Rohgußschleifautomaten - Teil 1 Lösungsansätze und Maschinenkonzept". Gießerei 75 (1988) Nr. 19, S. 572 - 574
- [Föhn 87] Föhn, S.: "Präzises Entgraten", Roboter, Nr. 2 (1990), S. 42-44
- [FU 87] Fu, K.S.; Gonzalez, R.C.; Lee, C.S.G.: "Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence", McGraw-Hill Book Company, New York, 1987
- [Gärtner 88] Gärtner, W.: "Wirtschaftliche Aspekte bei der Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Putzerei", Gießerei 75, 1988, Nr. 19, S. 577 - 579.
- [Häfele 89] Häfele, K.-H., interner Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1989
- [Häfele 90] Häfele, K.-H.: "Industrieroboter off-line programmieren", ZWF 85 (1990) 11, S. 589-592
- [Hirzinger 85] Hirzinger, G.: "Adaptiv sensorgeführte Roboter mit besonderer Berücksichtigung der Kraft-Momenten-Rückkopplung", Robotersysteme 1, 161-171 (1985)
- [Hogan 88] Hogan, T.: "Die PC-Referenz für Programmierer", Systema Verlag GmbH, München, 1988
- [Honsel 89] N.N.: "Roboter und NC-Maschine zum Entgraten"; Flexible Automation 2, 1989, S. 41-43
- [Höpf 87] Höpf, M.; Stolz, A.: "Konzeption eines Bearbeitungswerkzeugs für hochflexible Handhabungssysteme" Ergebnisbericht der IPA, Stuttgart, 1987
- [Horsch 91] Horsch, T.; Nolzen, H.; Adolphs, P.: "Schnelle kollisionsvermeidende Bahnplanung für einen Roboter mit 6 rotatorischen Freiheitsgraden", Robotersysteme 7, 185-192 (1991), Springer-Verlag Berlin
- [Kandziora 88] Kandziora, B.: "CAD/CAM-System zur Planung und Simulation automatisierter Montagevorgänge"; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988

- [Kämpfer 84] Kämpfer, S.: "Roboter - Die elektronische Hand des Menschen", VDI-Verlag, Düsseldorf 1984
- [Klumpp 87] Klumpp, W.; Zanke, H.: "Entgraten mit Industrierobotern", wt Werkstattstechnik 77 (1987) S. 383-387
- [Kohlhepp 90] Droll, H.; Göbell, A.; Haffner, H.; Isele, J.; Kohlhepp, P.: "Programmierung und Sensorik bei COMETOS", KfK Nachrichten, Jahrgang 22 2/90, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 79-85
- [Kohlhepp 91] Häfele, K.-H.; Kohlhepp, P., interner Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1991
- [Lange 88] Lange, B.: "Automatisierung des Gußputzens mit rechner (CNC)- und sensorgesteuerten Rohgußschleifautomaten - Teil 2 Arbeitsablauf und erste Ergebnisse", Gießerei 75 (1988) Nr. 19 S. 575-576
- [Läubli 89] Läubli, T., Fleischer, A.G., Krueger, H.: "Bildschirmarbeitsplätze", Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 2/79 (2. überarbeitete Auflage), Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund, 1989
- [Lawo 89] Lawo, M.; Isele, J.: "Abtrennen von Speisern unter Einsatz eines hochflexiblen Handhabungssystems", Gießerei, Vol 76, Heft 21, 1989, S. 722-725
- [Lawo 91] Lawo, M.: "Handarbeit passé, Ein flexibles Robotersystem zum Gußputzen", Industrie-Anzeiger 61/1991, Seiten 22..24
- [Lehr 90] Lehr, R.: "COMETOS - Vermessung der Genauigkeitskenngrößen an den KUKA 460 Portalrobotern", Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1990
- [Leitz 87] Broschüre der Firma Leitz: "Der Weg zur kontrollierten Fertigung", 1987
- [Mellein 90] Mellein, G.; Prestel, F., interner Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1990
- [Michelberger 90] Michelberger, M.: "Schleifmanipulatoreinsatz bei Großgußstücken aus Stahlguß"; Vortrag beim AuT-Workshop "Gießerei-Evaluation", Köln, 1990.
- [Ott 89] Ott, H.-J.: "Lasergeformte Kunststoffmodell ohne Werkzeug und ohne Form", Vortrag beim Fachgespräch zwischen Industrie und Hochschule - Rechnereinsatz in der Fertigung, Universität Dortmund, 1989

- [Paul 81] Paul, R.-P. "Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control", MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1981
- [Pritschow 89] Pritschow, G.; Grubler, G.: "Automatic Programming of Industrial Roboter by Sensor Guidance", Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 5, Nr. 213, S. 179-181, 1989
- [Riege 84] Riege, W.: "GIFA 84": Trenn- und Schleifeinrichtungen sowie Handhabungsgeräte für die Putzerei", Gießerei 71 (1984) Nr. 20, S. 769 - 774
- [Riege 88] Riege, W.: "Internationaler Stand des Einsatzes von freiprogrammierbaren Handhabungsgeräten und Robotern in Gießereien"; Gießerei 75 (1988), Nr. 6, S. 143-148
- [Rigoll 86] Rigoll, G.: "Maschinelle Spracherkennung zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle", Springer Verlag, Berlin, 1986
- [Rogos 90] Rogos, J.; Anders, M.; Sikora, R.: "Automatisierung beim Gußputzen", ZWF 85 (1990) 9, S. 484-487
- [Schneider 88] Schneider, P.; Sulzer, Th.: "Flexible robot cells: Example deburring". Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, S. 253-262, Lausanne, April 1988
- [Schulz 88] Schulz, M.: "Entgraten von Aluminiumgußwerkstücken mit Industrierobotern", Doktorvortrag, Universität Dortmund, 1988
- [Schygulla 91] Schygulla, U.: "Teststand Cometos, Berichtsteil I, Messungen Palettenlage, Verformungsmessungen unter statischer Last", KfK-Bericht Nr. 4855, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1991
- [Sendler 91] Sendler, U.; Altmeyer, H.: "Gießerei auf dem Weg zur CIM-Lösung"; CAD.CAM.CIM, Dezember 1991, S. CA 296..299, (in ZWF CIM), Carl Hanser Verlag, München, 1991.
- [Spur 81] Spur, G.; Stöferle, Th. (Herausgeber): "Handbuch der Fertigungstechnik - Band 1 - Urformen"; Carl Hanser Verlag, München - Wien, 1981.
- [Stepien 87] Stepien, Th.: "Control of Tool/Workpiece Contact Force with Application to Robotic Deburring", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. Ra-3, No. 1, February 1987
- [Sturz 86] Sturz, W.: "Werkstückorientierte Verfahrensauswahl zum Gußputzen mit Industrierobotern", Springer Verlag Berlin, 1986

- [S&S] Unterlagen der Arbeitsvorbereitung der Gießerei Schubert&Salzer Ingolstadt, 1987
- [Tacke 84] Tacke, B.: "Läßt sich der Einsatz eines Roboters Putzen von Rohguß heute schon sinnvoll rechtfertigen?", Gießerei 71 (1984) Nr. 7, S.277-284
- [Tecnomatix 88] N.N.: "Automatisiertes Gußputzen", Gießerei 75 (1988) Nr. 4, S. 98
- [VDG 89] N.N.: "Die Gießereiindustrie in der Bundesrepublik Deutschland - zum 56. Gießerei-Weltkongreß 19.-23. Mai 1989 in Düsseldorf", VDG Düsseldorf, 1989
- [VDG 440] VDG-Merkblatt Nr. G440: "Lieferzustand von Rohgußoberflächen - Maßnahmen zur Senkung des Putzaufwandes", VDG-DOK, Düsseldorf, 1984.
- [VDG 441] VDG-Merkblatt Nr. G441: "Entfeinerungsregeln für Putzarbeiten mit Lösungsansätzen zur putzgerechten Gußstückgestaltung", VDG-DOK, Düsseldorf, 1983.
- [VDI 2853] VDI-Richtlinie 2853: "Sicherheitstechnische Anforderungen am Bau, Ausrüstung und Betrieb von Industrierobotern", VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1987
- [Waninger 87] Waninger, D.: "Putzen von Gußstücken unter Einsatz von Manipulatoren mit Hochleistungsschleifsystemen", Gießerei 74, 1987, Nr. 15/16, S. 474-47
- [Weber 89] Weber, W.: "Regelung von Manipulator- und Roboterarmen mit reduzierten, effizienten inversen Modellen"; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [Weck 86a] Weck, M.; Fürbaß, J.-P.: "Automatisierung verbessert Arbeitsbedingungen beim Gußputzen - Sensor-geführte CNC-Werkzeugmaschinen ermöglichen wirtschaftliche Putzbearbeitung", Gießerei 76 (1986) Nr. 7, S. 183 - 187
- [Weck 86b] Weck, M.; Fürbaß, J.-P.: "Sensorsysteme für das automatische Gußputzen"; VDI-Z B1.128 (1986) Nr. 22, S. 879-883
- [Wolff 87] Wolff, H.: "Analyse der Arbeitssituation in den Tätigkeitsbereichen von Gießereien unter Berücksichtigung des Trends in Markt und Technik". VDG Fachbericht Nr. 49, Düsseldorf, 1987.

- [Zangemeister 90] Zangemeister, C. (Referent): "Erfolgspotentiale von Forschung und Entwicklung im Arbeitsschwerpunkt Gießereiindustrie". Vortrag beim AuT-Workshop "Gießerei-Evaluation", Köln, 1990.
- [3COMa] N.N.: "Theory of Operations - For then 3+ Product Family"; Firmenschrift, 3COM Corporation, Santa Clara, California, 1986
- [3COMb] N.N.: "NetBIOS-Programmer's Reference"; Firmenschrift, 3COM Corporation, Santa Clara, California, 1987