

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Günter Warnecke

**Ein Beitrag zur Modellbildung
in der
rechnergestützten Arbeitsplanerstellung**

F. Filser, M. Radtke, Ch. Schulz

Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, CIM-Centrum Kaiserslautern

Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße, 67653 Kaiserslautern

e-mail: <name>@cck.uni-kl.de

LSA-95-03

Titel: Ein Beitrag zur Modellbildung in der rechnergestützten Arbeitsplanerstellung

Autoren: F. Filser, M. Radtke, Ch. Schulz

Anschrift: Tel.: + 49 6 31 - 205 33 06

e-mail: filser@cck.uni-kl.de

Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation,

Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße, 67653 Kaiserslautern

LSA-95-03

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB314, Projekt X9 "Lernen und Analogie in technischen Expertensystemen", wurde die Verwendbarkeit von Techniken des fallbasierten Schließens in wissensbasierten Systemen untersucht. Als prototypische Anwendungsdomäne wurde die Arbeitsplanerstellung rotationssymmetrischer Werkstücke gewählt. Im vorliegenden Beitrag wird ein Modell der Arbeitsplanerstellung unter Berücksichtigung der verschiedenen, bisher als unabhängig behandelten Planungsmethoden beschrieben. Auf der Basis einer modellbasierten Wissensakquisition aus in Unternehmen verfügbaren Arbeitsplänen wird ein Ausschnitt der Arbeitsplanerstellung, die Aufspannplanung, detailliert. Die Anwendbarkeit wurde durch eine prototypische Realisierung nachgewiesen.

The SFB314, project X9 „ Learning and analogy in technical expert systems, analyzed the applicability of cased-based reasoning in knowledge-based information systems. The process planning of rotational parts was chosen as a prototypical application. This paper presents a model of process planning taking the different, yet independently recognized planning methods into account. Starting with a model based knowledge acquisition from a bunch of real world process plans the clamp planning process is modeled in detail. The practical feasibility of the process planning model was proofed by a prototypical implementation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung des Projektes	2
1.3	Vorarbeiten am CCK	3
1.3.1	Wissensbasiertes System „BOHREX“	3
1.3.2	Entwicklung eines wissensbasierten Ähnlichkeitsmaßes für die fallbasierte Planung am Beispiel der Arbeitsplanung für die Teilefertigung	3
2	Integration verschiedener Planungsmethoden bei der Arbeitsplanerstellung	5
2.1	Planungsmethoden in der Domäne Arbeitsplanerstellung	5
2.2	Motivation der Integration verschiedener Planungsprinzipien	9
2.3	Planungstechniken der KI	10
2.3.1	Grundbegriffe	10
2.3.2	Lineares Planen	11
2.3.3	Nichtlineares Planen	12
2.3.4	Hierarchisches Planen	13
2.3.5	Fallbasiertes Planen	13
3	Konzept einer rechnergestützten Arbeitsplanerstellung	15
3.1	Problemabgrenzung	15
3.2	Ziele	15
3.3	Konzeptbeschreibung	15
3.4	Bewertung aus Sicht der Anwendung	17
3.5	Schwerpunkte der prototypischen Konzeptumsetzung	18
4	Beiträge zur Modellierung der Arbeitsplanerstellung	19
4.1	Umsetzung am Beispiel der Aufspannplanung	19
4.1.1	Warum Aufspannplanung?	19
4.1.2	Ziele und Inhalte der Aufspannplanung	19
4.1.3	Vorgehensweise bei der Aufspannplanung	21
4.2	Entwicklung eines Klassifizierungsschemas	22
4.2.1	Einordnung und Zielstellung	22
4.2.2	Einschränkungen	23
4.2.3	Aufbau des Klassifizierungsschemas	24
4.2.3.1	Beschreibung des Klassifizierungsschlüssels	24
4.2.3.2	Beschreibung des Lösungsteils	26
4.3	Erstellen einer Fallsammlung aus realen Arbeitsplänen	27
4.4	Definition des Planungsablaufes	28
5	Zusammenfassung und Bewertung	31
6	Literatur	33

1 Einleitung und Motivation

Der nachfolgende Bericht faßt die Ergebnisse der Mitarbeit des CCK im Projekt X9 „Lernen und Analogie in technischen Expertensystemen“ des Sonderforschungsbereiches 314 der DFG zusammen. Dieser Sonderforschungsbereich beschäftigt sich bereits seit 1985 mit der Themenstellung „Künstliche Intelligenz und Wissensbasierte Systeme“. Das Projekt X9 wird bearbeitet in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz von Prof. Richter an der Universität Kaiserslautern.

1.1 Motivation

Der steigende Aufwand zur Erstellung von Arbeitsplänen, bedingt durch die wachsende Zahl automatisierter Fertigungseinrichtungen, die eine hohe Planungsfunktionalität und Planungsqualität erfordern, brachte der Arbeitsplanerstellung den Ruf des „Flaschenhalses der technischen Auftragsabwicklung“ ein. Verstärkt wird diese Problematik durch den zunehmenden Anteil an Kleinserienfertigung, der zu einem deutlichen Mehraufwand in der Arbeitsplanung führt.

Zur Lösung dieser Problematik gewinnt die Forderung nach einer Systematisierung und Unterstützung der Arbeitsplanerstellung durch rechnergestützte Systeme an Bedeutung.

Ausgehend von den Ideen *Mitrofanovs* [Mitrofanov60] und *Opitz* [Opitz66] über Gruppentechnologie wurden seit den sechziger Jahren eine ganze Reihe rechnerunterstützter Ansätze vorgestellt und prototypisch realisiert. Übersichten, meist tabellarischer Art, über die umfangreichen, weltweiten Systementwicklungen finden sich in [Alting89], [Eversheim85], [Ham88], [Feller u.a. 88], [Ruf91] und [Kluge84].

Eine Abgrenzung bzw. Bewertung der unterschiedlichen Ansätze wird in der Literatur weder über ausreichend transparente Beschreibungen, noch über einheitlich beschriebene Merkmale ausgeführt. Sie wird vielmehr durch die uneinheitliche Verwendung der domänenspezifischen Begriffswelt erschwert. Häufigstes Kriterium zur Klassifikation der Systeme ist die Unterscheidung nach dem Planungsprinzip, wobei der Variantenansatz, der semi-generative und generative Ansatz zur Unterstützung der Arbeitsplanerstellung [Ham/Lu89, Ruf91] von Arbeitsplanverwaltungssystemen abzugrenzen sind. Deren Unterstützung besteht lediglich in der Verwaltung von Arbeitsplänen und deren selektiven Bereitstellung für erneute Planungen und soll im Rahmen dieser Ausführung nicht weiter betrachtet werden.

In den frühen achtziger Jahren erschienen die ersten wissensbasierten Systeme zur Arbeitsplanerstellung. Es waren meist regelbasierte Ansätze wie TOM [Matsushima u.a. 82], die das aufkommende Paradigma der Trennung von Methoden und Abarbeitungsstrategie nutzten. Dieses Paradigma erschien ausreichendes Potential für rechnerunterstützte Systeme für die Arbeitsplanerstellung zu besitzen.

Die weitere Entwicklung von Systemen für die Arbeitsplanerstellung orientiert sich stark an der Entwicklung wissensbasierter Softwaresysteme und läßt sich in die folgenden Phasen einteilen [Schulz92]:

- Regelbasierte Systeme.
- Erweiterung der Wissensrepräsentationsformalismen, Einsatz hybrider Systeme.
- Integration der Systeme in eine bestehende Systemumgebung.

- Anwendung verschiedener Planungstechniken der KI.
Auch wenn in der Vergangenheit die unterschiedlichsten Lösungen implementiert wurden, konnte keine den Anforderungen wirklich gerecht werden, so daß die Zielstellung in der Verbesserung von Planungsqualität und Planungseffizienz zukünftiger Systeme besteht.
- Entwicklung einer gesicherten, allgemeingültigen Theorie der Arbeitsplanerstellung.
Sie stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine sinnvolle Gestaltung und den wirtschaftlichen Einsatz rechnergestützter Hilfsmittel in der Arbeitsplanerstellung dar.
Damit verbunden ist ein Paradigmenwechsel in der Vorgehensweise zur Entwicklung wissensbasierter Systeme, vom Rapid-Prototyping-Gedanken hin zur modellbasierten Vorgehensweise.

Die genannten Phasen lassen sich nicht losgelöst voneinander betrachten, vielmehr gibt es durchaus Überlappungen in den Zielsetzungen der Entwicklungen. So läßt sich das vorliegende Projekt der letzten Phase, d.h. der Entwicklung einer Theorie der Arbeitsplanerstellung zuordnen, beinhaltet aber auch Arbeitspakete, die anderen genannten Phasen zuzuordnen sind.

1.2 Zielsetzung des Projektes

In vorausgegangenen Arbeiten mit dem Ziel, wissensbasierte Techniken zur Unterstützung der Arbeitsplanerstellung einzusetzen, wurde das Fehlen geeigneter Planungsmechanismen, insbesondere in den kommerziell erhältlichen Entwicklungswerkzeugen, aufgezeigt [Schulz88].

Daher galt das Interesse einer Planungsmethode bzw. der Verknüpfung mehrerer solcher Methoden mit dem Ziel:

- Effizienter Pläne zu erzeugen, d. h. Pläne für Varianten mit festem Schema nicht jedesmal generativ zu erzeugen,
- Pläne (global) zu optimieren, indem für möglichst große Planabschnitte bewährte Lösungen zum Einsatz kommen.

Ausgehend von der Analyse der Planungstätigkeit der Arbeitsplaner in der Praxis wurden die unterschiedlichen Vorgehensweisen verschieden qualifizierter und mit unterschiedlichem Erfahrungsschatz ausgestatteter Mitarbeiter deutlich. Insbesondere langjährige Mitarbeiter in der Arbeitsplanung zeichnen sich durch ihre effiziente Arbeitstechnik aus, die durch das zielorientierte Aufgreifen alter Planungsergebnisse und das geschickte, individuelle Anpassen dieser Lösungen an die aktuelle Planungssituation geprägt ist.

Wesentliche Zielsetzung des vorliegenden Projektes war es, die Einsatzmöglichkeiten von Techniken des fallbasierten Schließens im Bereich der Planung in technischen Domänen zu untersuchen, sie anzupassen, daß sie in Planungssystemen verwendet werden können und sie an einer hinreichend komplexen technischen Anwendung prototypisch zu evaluieren. Aufgrund der Erkenntnisse und Erfahrungen im Bereich der Arbeitsplanerstellung wurde als Anwendung die Arbeitsplanerstellung für rotationssymmetrische Drehteile ausgewählt.

1.3 Vorarbeiten am CCK

In der Vergangenheit wurden am CCK verschiedene Prototypen und Applikationen entwickelt, die sich der Thematik des fallbasierten Planens widmen. Die wesentlichen Arbeiten werden im folgenden kurz vorgestellt.

1.3.1 Wissensbasiertes System „BOHREX“

Im Rahmen eines Industrieprojektes wurde prototypisch ein System zur wissensbasierten Vorkalkulation der Werkzeugkosten bei der Bohrbearbeitung entwickelt [Hook89].

Aufgabe der Vorkalkulation im Rahmen der Fertigungsplanung ist die vergleichende Bewertung der Wirtschaftlichkeit alternativer Betriebsmittel in einer Situation, in der der gesamte Fertigungsprozeß (Zusammenspiel zwischen Maschine, Werkzeug, Werkstück und Prozeßparametern) noch mehr oder weniger unbekannt ist, um auf diese Weise Planungsalternativen auszuschließen.

Ziel des entwickelten Systems ist die Entlastung der Experten von Routinearbeiten, indem durch Einbeziehung des Wissens und der Erfahrungen der entsprechenden Mitarbeiter das System eine schnelle und kostengünstige Vorkalkulation ermöglicht.

Dabei führte die Forderung nach geringem Wartungsaufwand des Systems und einer vom Benutzer nachvollziehbaren Ableitung der Lösung zu dem Ansatz des fallbasierten Schließens.

Die Wahl eines Präzedenzfalls aus der Fallbasis erfolgt unter Zuhilfenahme eines mehrstufigen Ähnlichkeitsmaßes verknüpft mit eindeutigen Ausschlußkriterien (k.o.-Kriterien). Somit wird die Menge der möglichen Kandidaten schrittweise eingeschränkt. In Abhängigkeit von der Größe der Lösungsmenge wird dabei das jeweilige Ähnlichkeitsmaß verschärft bzw. gelockert.

Da dieser Selektionsprozeß zur Laufzeit der Konsultation stattfindet, darf aus Gründen der Benutzerakzeptanz die erforderliche Suchzeit wenige Sekunden nicht überschreiten. Um dies zu gewährleisten, wurde die Fallbasis als Indexdatei, bestehend aus Ankersegmenten und mehreren Schlüsselsegmenten, die in einer Baumstruktur angeordnet sind, realisiert.

Dieser Prototyp ließ wesentliche Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten des fallbasierten Schließens in technischen Domänen zu. Insbesondere die Schwierigkeiten der Anpassung bei einer Abweichung zwischen Präzedenzfall und aktueller Planungsaufgabe wurden in der betrachteten Domäne deutlich.

1.3.2 Entwicklung eines wissensbasierten Ähnlichkeitsmaßes für die fallbasierte Planung am Beispiel der Arbeitsplanung für die Teilefertigung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das fallbasierte Schließen und Planen gegenüber anderen Planungsmethoden abgegrenzt und als spezielle Form des analogen Schließens eingeführt. Wesentliche Aspekte dieses Themenfeldes wurden am Beispiel des Systems „CHEF“ [Hammond89] aufgezeigt.

Innerhalb dieser Arbeit wurde erkannt, daß es in der Domäne der Arbeitsplanerstellung nicht sinnvoll erscheint, ausschließlich fallbasiert zu planen, da sonst bei fehlender signifikanter Fallinformation kein Ergebnis geliefert werden kann. Daher integriert der erarbeitete Ansatz fallba-

sierte und generative Planung in dem Sinne, daß die fallbasierte Komponente bei Vorliegen von signifikantem Fallwissen eine Abkürzung der generativen Planung erlaubt [Humm91].

Der Prozeß der Ähnlichkeitsbestimmung erfolgt vor dem Hintergrund der applikationsspezifischen Definition von Ähnlichkeit: „Ein bekannter Fall ist dem aktuellen ähnlich, falls die Modifikation des bekannten Plans (d. h. die Anpassung auf das aktuelle Problem) einfach ist.“ Die Ermittlung des Ähnlichkeitsmaßes erfolgt in vier Phasen:

- Analyse der aktuellen Planungsaufgabe und Generierung der technologischen Constraints.
- Geometrischer und technologischer Vergleich der aktuellen Planungsaufgabe und geeigneter Fälle.
- Generierung der Hypothesen für durchzuführende Modifikationen.
- Abschätzung des Modifikationsaufwandes.

Die prototypische Implementierung wurde unter Einsatz von KEE (Knowledge Engineering Environment) durchgeführt.

2 Integration verschiedener Planungsmethoden bei der Arbeitsplanerstellung

2.1 Planungsmethoden in der Domäne Arbeitsplanerstellung

Innerhalb der Arbeitsplanung werden verschiedene Planungsmethoden angewendet, um die Umsetzung einer Konstruktionszeichnung in Arbeitsanweisungen, im weitesten Sinne den Arbeitsplan, durchzuführen. In allgemeinen Darstellungen zur Thematik Planungsmethoden in der Arbeitsplanung [Eversheim89, Geitner91, Milberg92] werden immer wieder vier genannt. Sie sind im folgenden kurz dargestellt:

- **Wiederholplanung:** Ausgehend von vorhandenen Arbeitsplänen werden aktuelle Arbeitspläne durch die Modifikation und Ergänzung der auftragsabhängigen Daten im Arbeitsplankopf erzeugt. Diese sind im wesentlichen die Daten, die ein PPS-System verwaltet und umfassen Teilenummer, Arbeitsplannummer, Bearbeiter, Termine (Start- und Endtermine) und Stückzahlen. Eine Veränderung von auftragsneutralen Daten im Arbeitsplan, wie z.B. Reihenfolge von Arbeitsvorgängen und Technologieangaben wird nicht vorgenommen.
- **Variantenplanung:** Ausgehend von Standardarbeitsplänen, das sind generische Arbeitspläne, werden spezielle, auf das aktuelle Werkstück passende Arbeitspläne durch die Auslegung von Variablen und Parametern erzeugt. Abgegrenzt wird diese Planungsmethode von der Wiederholplanung durch Veränderungen von auftragsneutralen Daten. Für die Variantenplanung charakteristisch ist der Freiheitsgrad der Planung, der innerhalb von vorher genau definierten Variantenklassen oder Teilefamilien liegt.
- **Anpassungsplanung:** Ausgehend von bestehenden und bekannten Arbeitsplänen werden durch Hinzufügen, Löschen und Ändern von Arbeitsgängen [Milberg92] aktuelle Arbeitspläne erzeugt. Charakteristisch für die Anpassungs- oder Ähnlichkeitsplanung ist das Finden von Werkstücken, deren bereits bestehender Arbeitsplan in möglichst großen Teilbereichen auf das aktuelle Werkstück paßt. Bei dieser Planungsmethode wird implizit angenommen, daß aus der Ähnlichkeit des Ausgangszustandes (Konstruktionszeichnung, Werkstück) die Ähnlichkeit der Lösung, d.h. des Arbeitsplanes, folgt. Abgegrenzt von der Variantenplanung wird die Anpassungsplanung durch den größeren Freiheitsgrad der Planung (Planungsspielraum).
- **Neuplanung:** Sie erfordert bei der Erstellung des Arbeitsplanes das Durchlaufen aller Tätigkeiten zur Arbeitsplanerstellung. Da hierbei nicht vordergründig die Verwendung vorhandener Planungsergebnisse angestrebt wird, bezeichnet man sie auch als generative Planung. Aus vorgenanntem Grund ist die Neuplanung die mit am meisten Aufwand verbundene der genannten Planungsmethoden.

Genauere Betrachtungen zeigen, daß dieses Schema den Sachverhalt in der Arbeitsplanung im allgemeinen richtig, aber zuwenig differenziert beschreibt. Die Arbeitsplanerstellung setzt sich aus einer Vielzahl von einzelnen Funktionen zusammen, deren Ergebnisse zur Lösung, dem Arbeitsplan, beitragen. Innerhalb jeder einzelnen Funktion kann man ein Vorgehen nach allgemein gültigen Prinzipien finden, so daß letztendlich die Planungsmethoden Wiederholplanung,

Variantenplanung, Anpassungsplanung und Neuplanung in der Arbeitsplanung in oben angeführter Form nicht existent sind. Betrachtet man den Kern obiger Aussagen, so sind drei allgemeine Prinzipien der Lösungsübernahme, die insbesondere bei technischen Problem- und Aufgabenstellungen¹ angewendet werden, zu erkennen. Diese Planungsprinzipien sind im folgenden kurz charakterisiert.

- **Vollständige Übernahme der Lösung (im Ergebnis).** Die Leistung beschränkt sich auf das Finden der entsprechenden knoten- und kanten gebundenen Lösung und stellt sich im allgemeinen nicht als Problem, sondern als Aufgabe dar. Sie ist zugleich das effizienteste und mit am wenigsten Aufwand verbundene der genannten Prinzipien.
- **Teilweise Übernahme von bekannten kontextspezifischen Lösungen.** Die Leistung beschränkt sich auf das Finden und Auswählen unter mehreren, auf verschiedenen Abstraktionsebenen des Lösungsraumes angesiedelten, verwendbaren Lösungen und deren Zusammenfügen und Anpassen an die aktuelle Situation. Für den Erfahrenen als auch für den Unerfahrenen kann sich in Abhängigkeit des Adaptiongrades der gefundenen Lösungen die Leistung als Aufgabe oder als Problem darstellen.
- **Keine Übernahme von kontextspezifischen Lösungen** sondern Verwendung von in der Anwendung allgemein anerkannten Methoden zur Problemlösung. Die Leistung besteht in der Transformation des gegebenen Initialzustandes in den gegebenen Terminalzustand mittels Operationen. Bei allgemeinen Problemstellungen muß weder der Initial- noch der Terminalzustand gegeben sein; in der Arbeitsplanung hingegen ist zumindest der Terminalzustand genau in Form der Fertigteilzeichnung fixiert, womit gleichzeitig aber auch eine subjektive Einordnung der Arbeitsplanung in bekannte Problemklassen, wie analytische, synthetische oder dialektische, vorgenommen wird [Dörner76]. Die Leistung der Transformation wird sich für den unerfahrenen Arbeitsplaner in jedem Fall als Problem darstellen; für den Erfahrenen kann es sich als Problem oder als Aufgabe präsentieren.

Anhand des folgenden Bildes sind die genannten Planungsprinzipien oder Prinzipien zur Lösungserzeugung nochmals dargestellt. Auf der waagrechten Achse ist der übernommene Lösungsanteil oder mehrere Anteile als Balken eingezeichnet; die senkrechte Achse zeigt die Allgemeingültigkeit der zur Lösungserzeugung verwendeten Operatoren² von der konkret vorliegenden Situation an.

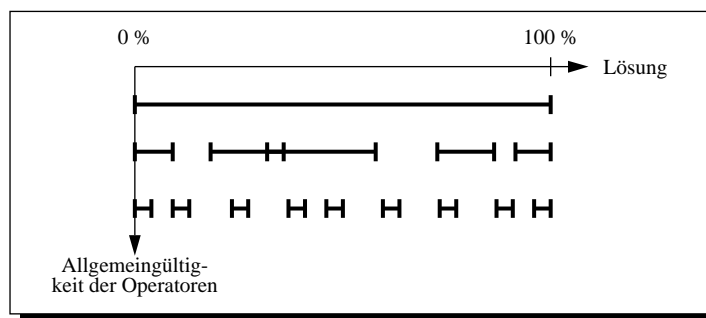


Bild 1: Abhängigkeit von Planungsprinzip, übernommenen Lösungsanteile und Allgemeingültigkeit der verwendeten Operatoren.

1. Probleme erfordern nach [Dörner76] das produktive Denken zur Herbeiführung der Lösung, dagegen erfordern Aufgaben reproduktives Denken.
2. Operatoren sind die (formalen) Repräsentanten von Operationen (vergl. Kapitel 2.3).

Bevor Bild 1 eingehender betrachtet wird, werden die Merkmale Wirkungsbreite und Wirkungssicherheit eingeführt. Je weniger Schritte zur Lösung eines Problems oder einer Aufgabe verwendet werden, desto größer ist die verändernde Wirkung der angewendeten Operatoren, d.h. desto größer ist also ihre Wirkungsbreite. Sonderfall ist die Lösung eines Problems oder einer Aufgabe mit genau einem Operator, wie es bei der vollständigen Übernahme von Lösungen praktiziert wird. Folglich sind dann Anwendungsbereich und Wirkungsbreite des Operators identisch. Die Wirkungssicherheit ist eine vom Anwender jederzeit gewünschte Eigenschaft [Dörner76]. Sie bezeichnet die (nicht meßbare) Wahrscheinlichkeit mit der ein Operator die gewünschte Veränderung einer Situation in Richtung einer Lösung bewirken kann.

Erkennbar ist, daß bei vollständiger Übernahme einer Lösung, d.h. das Problem wird durch Anwendung eines konkret auf die Situation zugeschnittenen (kontextspezifischen) Operators vollständig gelöst, keine Anpassung der bekannten und gefundenen Lösung notwendig ist. Damit liegt auch der Planungszeitpunkt vor der eigentlichen Anwendung des Operators, d.h. daß der Planungsfreiraum sehr eingeschränkt ist. Da keine Problemzerlegung notwendig ist, muß einerseits die Wirkungsbreite sehr groß und andererseits die Wirkungssicherheit des angewandten Operators sehr hoch sein.

Bei teilweiser Übernahme von Lösungen ist eine (situationsadäquate) Problemzerlegung erforderlich. Die übernommenen Teil-Lösungen sind wenigstens an ihren „Berührungspunkten“ anzupassen und in ihrer Reihenfolge zu planen, d.h. Planungszeitpunkt und Anwendungszeitpunkt der übernommenen Teil-Lösungen sind identisch. Hinsichtlich der Merkmale Planungsfreiraum, Wirkungsbreite und Wirkungssicherheit nimmt dieses Lösungsprinzip eine mittlere Stellung zwischen dem vorgenannten und dem folgend beschriebenen Lösungsprinzip ein. Auch die Gültigkeit der Operatoren bezüglich des situativen Kontextes liegt zwischen dem vorgenannten und dem folgend ausgeführten Lösungsprinzip.

Keine Übernahme von Lösungen erfordert eine „vollständige“ Problemzerlegung. Planung findet zum Anwendungszeitpunkt der Operatoren statt. Bei größtem Planungsfreiraum sind Wirkungsbreite und -sicherheit der anwendungsbezogenen und lösungsneutralen Operatoren am geringsten. Die verwendeten Operatoren besitzen den größten Abstraktionsgrad von konkreten Situationen; sie sind allgemeingültig.

Die oben angeführten Charakteristika werden in der folgenden Tabelle nochmals verdichtet zusammengeführt.

Lösungsprinzip	vollständige Übernahme der Lösung	teilweise Übernahme der Lösung	keine Übernahme der Lösung
Verwendung von	Ergebnissen	Teilergebnissen	keine
Problemzerlegung	keine	ja, in Abhängigkeit von bekannten Lösungen	ja, vollständig in Elemente der Abstraktionsebene
Zeitpunkt der Planung	vor Anwendung des Prinzips	während der Anwendung des Prinzips	während der Anwendung des Prinzips
Planungsfreiraum	keiner	mittel (Auswahl der übernommenen Lösung, Anpassung, Reihenfolge, ...)	hoch (Auswahl, Reihenfolge, ...)
Wirkungsbreite	sehr groß	mittel	gering
Wirkungssicherheit	sehr groß	mittel	gering
materieller und zeitlicher Aufwand	sehr gering	mittel	sehr hoch

Bild 2: Ausgewählte Merkmale der dargestellten Lösungsprinzipien.

Der Übergang der genannten Lösungsprinzipien ist fließend; eine scharfe Trennung ist nicht möglich. Wendet man diese allgemeinen Prinzipien auf eine geeignet zu treffende Abstraktion

der Funktionen des Anwendungsgebietes, der Arbeitsplanerstellung, an, so sind differenzierte Aussagen bezüglich der Planungsmethode möglich. Geht man davon aus, daß Arbeitsvorgänge, Unterarbeitsvorgänge und Teilarbeitsvorgänge eine geeignete Abstraktion der Funktionen der Arbeitsplanerstellung repräsentieren, so erhält man die folgende bildliche Veranschaulichung. Feinere Unterteilungen sind prinzipiell möglich, erscheinen hier aber zunächst nicht sinnvoll. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Lösungsprinzip und Anwendungsabstraktion. In diesen Zusammenhang werden auch die vier in der Literatur häufig dargestellten Planungsmethoden eingeordnet. Auf der senkrechten Achse sind die drei erläuterten Lösungsprinzipien aufgetragen; die waagrechte Achse kennzeichnet die Abstraktionsebenen der jeweiligen Anwendungsdomäne; hier die der Arbeitsplanerstellung. Die grau hinterlegten Flächen geben dabei jeweils qualitativ den übernommenen Lösungsanteil an, die weißen bezeichnen folglich den Bereich in dem keine Lösungsübernahme stattfindet.

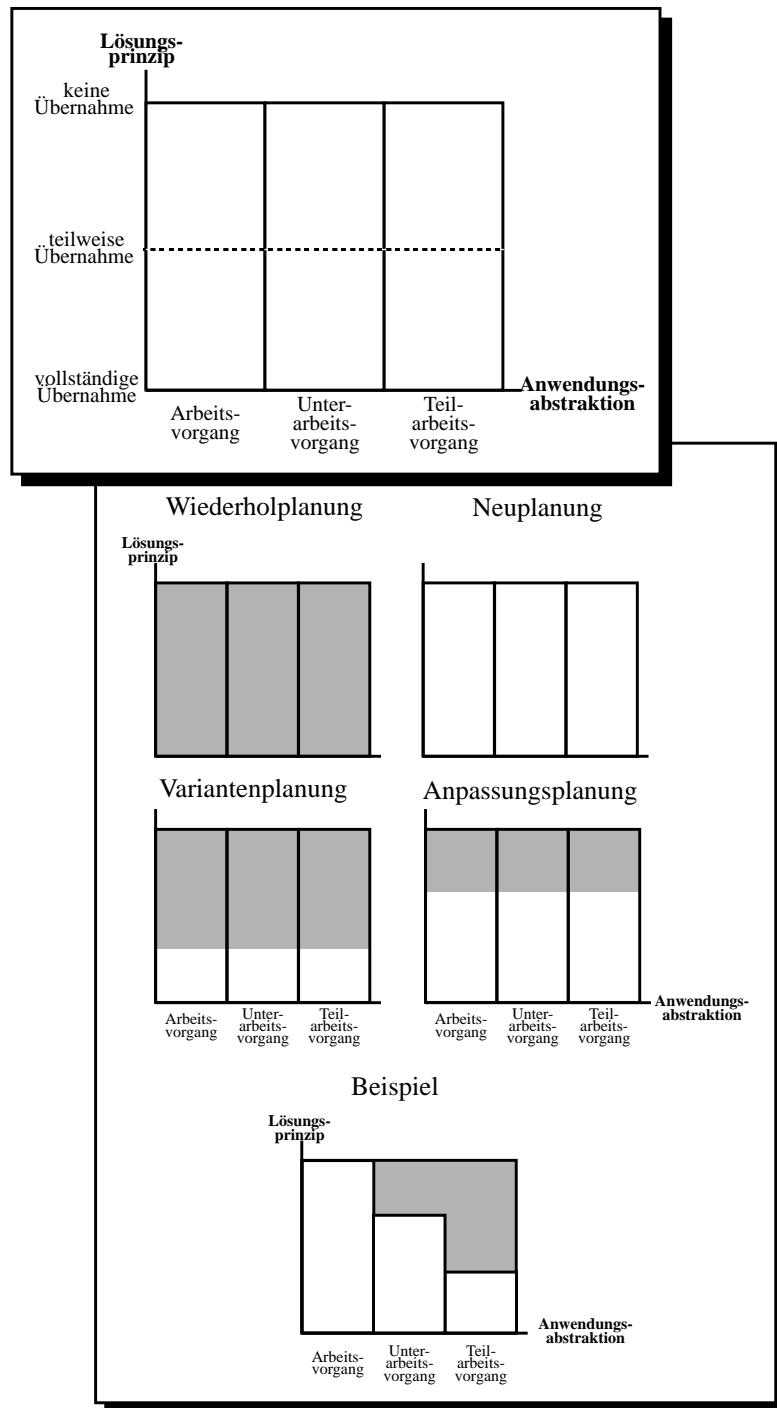


Bild 3: Zusammenhang zwischen Lösungsprinzip und Anwendungsabstraktion und Einordnung bekannter Planungsmethoden der Arbeitsplanung und Beispiel.

Die Bildung der drei genannten Abstraktionsebenen hat sich hier zunächst gegenüber einer sehr viel feineren Funktionsgliederung der Arbeitsplanerstellung, wie sie in [Schulz92] enthalten ist, als praktikabel herausgestellt. Auf der obersten Ebene wird die **Arbeitsvorgangsfolge** festgelegt, d.h. hier wird eine Reihenfolge der Fertigungsverfahren und damit auch eine Einschränkung möglicher Werkzeugmaschinen, Werkzeuge und Spannmittel vorgenommen. Auf der nächsttieferen Ebene wird die **Unterarbeitsvorgangsfolge**, d.h. eine Folge der Aufspannung

gen, Aufspannflächen und Spannmittel ermittelt. Auf der untersten der drei Ebenen wird die **Teilarbeitsvorgangsfolge**, d.h. eine Reihenfolge der (Fertigungs-) Operationen, Werkzeuge und deren Einsatzparameter innerhalb einer Aufspannung ermittelt. Die Betrachtung beschränkt sich auf rotationssymmetrische Werkstücke, so daß implizit die Abstraktionsebene der Arbeitsvorgangsfolge mit dem Fertigungsverfahren Drehen und auch im weiteren Umfang Werkzeugmaschinen-, Werkzeug- und Spannmittelart festgelegt sind. Da aber auf der unteren Abstraktionsebene der Teilarbeitsvorgänge rechnergestützte (isolierte!) Systeme von z.B. Werkzeugherstellern angeboten werden, erscheint ein Handeln auf dieser Abstraktionsebene zunächst nicht erforderlich. Ohne Abstriche an der eigentlichen Zielstellung des Projektes vornehmen zu müssen, wurde daher die Abstraktionsebene der Unterarbeitsvorgänge betrachtet.

Durch Anwendung der dargestellten Betrachtungsweise kann die Arbeitsplanerstellung und deren Rechnerunterstützung differenziert analysiert werden. Die obigen Darstellungen enthalten die drei Lösungsprinzipien, wie sie aus den Definitionen der Literatur abzuleiten sind. In Realität wird bei der Arbeitsplanerstellung neben der Lösung der materielle und zeitliche Aufwand zur Erstellung eines aktuellen Arbeitsplanes betont, so daß vom Arbeitsplaner zunächst die vollständige Übernahme von Lösungen versucht wird. Schlägt dies fehl, so wird er sukzessive (hier von unten nach oben auf der Abzisse) versuchen die anderen Lösungsprinzipien auf jeder einzelnen Abstraktionsstufe anzuwenden. Befindet sich der Arbeitsplaner auf einer unteren Abstraktionsebene der Planung (Teilarbeitsvorgangsebene), so werden hier von Werkzeugherstellern häufig schon rechnergestützte Systeme zur Auswahl von Werkzeugen angeboten. Durch Anwendung dieser rechnergestützten Systeme übernimmt der Arbeitsplaner den vorgegebenen Lösungsalgorithmus auf der genannten Abstraktionsebene. Findet er in der mittleren nur Teillösungen und in der obersten Abstraktionsebene keine passende, bekannte Lösung, so wird er hier generativ vorgehen. In der obigen Darstellung ist auch dieses beispielhaft angenommene Verhalten aufgenommen, das keiner der in der Literatur genannten Planungsmethoden eindeutig zugeordnet werden kann.

Aus der Erkenntnis heraus, daß die in der Literatur dargestellten Planungsmethoden das Vorgehen in der Arbeitsplanerstellung nur wenig differenziert beschreiben, wurde eine allgemeinere Betrachtung von Lösungsprinzipien durchgeführt. Drei fließend ineinander übergehende Lösungsprinzipien vollständige Übernahme der Lösung im Ergebnis, teilweise Übernahme von bekannten, kontextspezifischen Lösungen, keine Übernahme von kontextspezifischen Lösungen wurden gefunden, die zum einen eine differenzierte und ganzheitliche Betrachtung der Arbeitsplanerstellung erlauben. Diese erlauben auch die Beschreibung von Analysen der Arbeitsplanung, wie sie in [Schulz92] dargestellt sind. Zum anderen sind sie erforderlich, um im Sinne des in Kapitel 1.1 angesprochenen Paradigmenwechsels eine domänenadäquate Modellbildung zur gezielten Rechnerunterstützung herbeizuführen.

2.2 Motivation der Integration verschiedener Planungsprinzipien

Eine Integration von verschiedenen Planungsprinzipien, wie sie vorher ausgeführt wurden, läßt sich im wesentlichen ableiten aus

- Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten und
- Analysen des realen Verhaltens von Arbeitsplanern.

Aus früheren Arbeiten [Humm91], [Radtke/Schulz91], [Schulz89] ist zum einen ableitbar, daß Arbeitsplanerstellung basierend auf teilweiser Übernahme von bekannten und bestehenden spe-

ziellen Lösungen nicht für sich allein bestehen kann. Zum anderen wurde deutlich, daß zum Anpassen von gewählten bestehenden Lösungen gleiches Wissen erforderlich ist, wie für das Planen ohne Lösungsübernahme. Zum Anpassen eines bestehenden Arbeitsplanes müssen die Intentionen und Abhängigkeiten innerhalb des gewählten Planes explizit bekannt sein, d.h. eine Problemzerlegung der gefundenen Lösung ist erforderlich. Das Prinzip „keine Übernahme bestehender Lösungen“ unterstützt also das Prinzip „teilweise Übernahme von bestehenden und bekannten Lösungen“ und ermöglicht damit die Abschätzung eines wie auch immer gearteten Anpassungsaufwandes. Damit ist der gewählte Lösungsansatz, d.h. Integration beider Planungsprinzipien, aus den allgemeinen Lösungsprinzipien heraus mit den Erkenntnissen vorhergehender Arbeiten motiviert.

Zum anderen kann das Vorgehen in der Arbeitsplanerstellung, d.h. zunächst Suche und Übernahme von bestehenden und bekannten Lösungen, aus der menschlichen Mentalität begründet werden, mit wenig Aufwand Bewährtes zu benutzen, ehe auf die Schaffung von neuen Lösungen, d.h. keine Übernahme von Lösungen, übergegangen wird, welches mit Unsicherheiten bezüglich der erreichten Lösungsqualität und bezüglich des zu betreibenden Aufwandes behaftet ist. Analysen des Vorgehens während der Arbeitsplanerstellung [Schulz92] spiegeln genau diesen Sachverhalt wider, der sich auch bei gezielter Rechnerunterstützung in der Arbeitsplanerstellung wiederfinden muß.

Eine gezielte Rechnerunterstützung in der Arbeitsplanung im Sinne der in Kapitel 1.2 genannten Zielsetzung erfordert eine Abstimmung zwischen bekannten Planungstechniken der KI, die die derzeit verfügbaren Möglichkeiten und Grenzen der Rechnerunterstützung repräsentieren und den dargestellten Planungsprinzipien andererseits. In den folgenden Kapiteln werden die Planungstechniken der KI vorgestellt und im Hinblick auf Ihre Anwendbarkeit untersucht.

2.3 Planungstechniken der KI

Das Ziel dieses Abschnittes besteht darin, die grundlegenden Planungstechniken aus dem Bereich der KI vorzustellen. Die Beschreibung dieser Verfahren ist darauf gerichtet, wesentliche Inhalte und Strategien zu verdeutlichen. Auf eine detailliertere Beschreibung dieser Verfahren und Beispiele ihrer Anwendung in der Blockwelt soll daher weitestgehend verzichtet werden. Entsprechende Darstellungen finden sich in [Hertzberg89].

2.3.1 Grundbegriffe

Das Planungsproblem läßt sich aus der Sicht der KI wie folgt definieren: Gesucht ist ein Plan, dessen Ausführung einen gegebenen Ausgangszustand in den gewünschten Zielzustand überführt. Ein Plan besteht dabei aus einer Folge von Aktionen, die jeweils einen Zustand in einen anderen überführen. Die Planung selbst ist der synthetische Prozeß, der die geeigneten Aktionen aus einer vordefinierten Menge auswählt und in einer zeitlichen Reihenfolge anordnet. Die explizite Betrachtung von Aktionen im Hinblick auf ihre Veränderung der Welt ist der Kernpunkt eines jeden Planungsproblems und kann als entscheidendes Kriterium zur Abgrenzung gegenüber anderen Problemstellungen herangezogen werden.

Die beiden zentralen Begriffe dieser Definition sind die Begriffe Zustand und Aktion. Ihre formale Repräsentation ist die Grundlage aller Planungstechniken und soll deshalb hier kurz beschrieben werden.

Die Problemwelt und ihre einzelnen Zustände werden durch Prädikate beschrieben. Jeder problemrelevanten Eigenschaft der Umwelt wird eine Variable mit speziellem Wertebereich zugeordnet. Die Bestimmung der entsprechenden Merkmale und Wertebereiche ist dabei letztlich ein Modellierungsproblem und soll deshalb nicht näher betrachtet werden.

Zur Beschreibung der zu planenden Aktionen wird ein Operatormodell verwendet, das aus folgenden Teilen besteht:

- **Vorbedingungen:**
Die Vorbedingungen eines Operators beschreiben dessen Anwendungsbedingungen, d.h. hier werden mit Hilfe von Prädikaten alle Zustände der Problemwelt beschrieben, in denen die durch den Operator repräsentierte Aktion ausgeführt werden kann.
- **Rahmenaxiome:**
Die Rahmenaxiome eines Operators sind die Beschreibung dessen, was sich durch die Anwendung des Operators in der Problemwelt nicht verändert.
- **Nachbedingungen:**
Die Nachbedingungen beinhalten alle Veränderungen der Umwelt, die durch die Anwendung des Operators ausgelöst wurden. Diese Beschreibung wird oft in eine add-Liste und eine delete-Liste aufgespalten. Die add-Liste enthält alle neu hinzugekommenen Merkmale, während die delete-Liste die Problemweltmerkmale beschreibt, die nicht mehr gelten.

Das hier beschriebene Operatormodell ist domänenunabhängig, d.h. es beinhaltet nicht die Möglichkeit, spezifische Eigenschaften von Operationen eines Anwendungsgebietes zu beschreiben. In der Literatur wird daher eine Erweiterung dieses Schemas um die folgenden Bestandteile vorgeschlagen, um die auf diesem Modell basierenden Verfahren überhaupt in der Praxis einsetzen zu können [Currie/Tate89]:

- typisierte Vorbedingungen,
- Informationen über Zeit- und Ressourcennutzung und
- Informationen über inkonsistente Zustände der Problemwelt.

2.3.2 Lineares Planen

Wie auch das im nächsten Abschnitt beschriebene nichtlineare Planen kann das lineare Planen als Suchprozeß betrachtet werden. Dabei werden zunächst auf den Ausgangszustand und später auf die daraus entstandenen Zustände alle jeweils möglichen Operatoren angewendet. Als Ergebnis entsteht ein Graph, der auch als Zustandsraum bezeichnet wird. Der Planungsprozeß besteht dann aus einer Suche innerhalb dieses Zustandsraumes, indem man, ausgehend vom Ausgangszustand, den oder die Knoten des Graphen sucht, die die Beschreibung des Zielzustandes enthalten.

Die konkrete Problemstellung ist damit analog zu regelbasierten Inferenzsystemen. Die Analogie zu den Operatoren bilden dabei die Regeln, deren Anwendbarkeit von Unifikation und Pattern-Matching bestimmt wird. Ebenso wie bei diesen Systemen gibt es zwei grundsätzliche Suchrichtungen. Man beginnt entweder bei dem Ausgangszustand und versucht, einen der möglichen Zielzustände zu erreichen oder man sucht rückwärts, von der Menge der Zielzu-

stände ausgehend, zum eindeutig bestimmten Ausgangszustand. Die Rückwärtssuche hat sich als der günstigere Weg erwiesen, da ihr eine größere Zielorientierung zugrunde liegt. Die Hauptursache dafür besteht darin, daß es im allgemeinen mehr Nachfolger als Vorgänger zu einem bestimmten Zustand gibt.

Die Anwendung dieses Prinzips beruht auf der Linearitätsannahme (linearity assumption). Diese besagt, daß es möglich ist, die Merkmale des Zielzustandes zu Teilzielen zusammenzufassen bzw. als Teilziele zu betrachten. Diese Teilziele können dann isoliert betrachtet und erfüllt werden. Man muß sich allerdings darüber im klaren sein, daß diese äußerst nützliche Annahme in den meisten Problembereichen nur schwer aufrechtzuerhalten ist.

2.3.3 Nichtlineares Planen

Die Grundidee des nichtlinearen Planens besteht darin, die Reihenfolge der Operatoren nur so weit wie unbedingt nötig festzulegen. Bezüglich der Operatorordnung wird damit eine Least-commitment- oder auch Minimalbeschränkungsstrategie angewendet. Der wesentliche Unterschied zwischen linearem und nichtlinearem Planen besteht darin, daß beim linearen Planen eine vollständige Operatorordnung erzeugt wird, während die Operatorordnung beim nichtlinearen Planen nur partiell ist.

Beim nichtlinearen Planen wird vorausgesetzt, daß die Unabhängigkeit der einzelnen Teilziele weitestgehend gilt. Nach dieser Annahme ist es dann möglich, die Teilziele dieses Planes und die dazugehörigen Teilpläne unabhängig voneinander zu betrachten. Eine Ordnung zwischen den Teilplänen wird nur dann festgelegt, wenn auftretende Interaktionen eine Koordinierung der betroffenen Planteile erzwingen.

Ein grundlegendes Problem des nichtlinearen Planes besteht in der Interpretation der Nichtlinearität. Dabei sind folgende Interpretationen möglich:

- Die parallelen Zweige eines Planes dürfen nur als Ganzes aber in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden.
- Es ist jede vollständige Ordnung erlaubt, die mit der partiellen, nichtlinearen Ordnung verträglich ist.
- Die untereinander nicht geordneten Operationen der verschiedenen, parallelen Zweige dürfen nebenläufig (parallel) ausgeführt werden.

Vor der Anwendung dieser Planungstechnik sollte deshalb eine dem Problem angemessene Interpretation der Nichtlinearität definiert werden. Diese unterschiedlichen Interpretationsmöglichkeiten zeigen jedoch auch den grundlegenden Vorteil dieser Planungstechnik auf: Ein nichtlinearer Plan repräsentiert eine Menge linearer Pläne, aus denen zur Ausführungszeit ein geeigneter ausgewählt werden kann.

Für die Problemstellung der Arbeitsplanerstellung bedeutet das die potentielle Möglichkeit, den Arbeitsplan auszuwählen, der z. B. der aktuellen Belastungssituation in der Fertigung am besten entspricht. In welchem Umfang diese Möglichkeit zum Tragen kommt, hängt in erster Linie von den Interaktionen zwischen den einzelnen Teilplänen und der gewählten Interpretation der Nichtlinearität ab.

2.3.4 Hierarchisches Planen

Hierarchisches Planen ist im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Planungstechniken eher eine allgemeine Methodik der Planung. Es ist daher möglich, diese Methodik mit diesen Techniken zu kombinieren und somit z. B. eine hierarchische, nichtlineare Planung durchzuführen.

Die Grundidee des hierarchischen Planens besteht darin, in Analogie zur menschlichen Vorgehensweise, die Komplexität des Planungsprozesses zu reduzieren. Der Grundvorgang ist die Unterdrückung von zunächst unwichtigen Details. Als Grundvoraussetzung für einen hierarchischen Planungsansatz und eine Möglichkeit zur Unterdrückung von Details wird dabei die Abstraktion angesehen [Stefik81]. Nach [Wilkins88] unterscheiden sich verschiedene Abstraktionsebenen durch eine unterschiedliche Granularität oder Detailgenauigkeit in der Beschreibung. Unter Abstraktion ist daher nicht das Weglassen von Details zu verstehen, sondern eine bewußte Unterdrückung von Details durch:

- Zusammenfassung mehrerer detaillierter Merkmale zu einem Merkmal (Granularität).
- Beschreibung eines Merkmals auf unterschiedlichen Detailierungsebenen.

Die entsprechende Methode im Bereich der KI-Planung wird als Operatorabstraktion bezeichnet. Die Grundidee dieses Konzeptes basiert auf der Einführung abstrakter Operatoren. Abstrakte Operatoren sind im Gegensatz zu den elementaren oder Basisoperatoren nicht direkt ausführbar, d.h. sie repräsentieren nicht eine konkrete sondern eine Folge von Aktionen. Das Operatormodell ist jedoch das gleiche wie bei den elementaren Operatoren.

Aus Sicht der Arbeitsplanerstellung bedeutet die Technik des hierarchischen Planens das Erzeugen von Arbeitsplänen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen mit steigender Komplexität und Detaillierung. Diese Vorgehensweise wird auch bei der realen Problemlösung angewandt, indem der Arbeitsplaner den Arbeitsplan beginnend bei Arbeitsvorgängen über die Unterarbeitsvorgänge bis zu den Teilarbeitsvorgängen detailliert und dabei die entsprechenden Ressourcenzuordnungen trifft.

2.3.5 Fallbasiertes Planen

Die bisher beschriebenen Planungstechniken gehören zum klassischen, generativen Ansatz der KI-Planung, d.h. die Pläne werden stets von Neuem unter Zuhilfenahme des abgebildeten Problemwissens erzeugt. Demgegenüber ist das fallbasierte Planen eine Technik des analogen Schließens, d.h. Probleme werden anhand von bereits bekannten Fällen gelöst. Dazu werden Erfahrungen (Pläne) in Form von Fallbeispielen gesammelt und in das bereits vorhandene Erfahrungswissen eingeordnet. Ein neues Problem wird dann gelöst, indem die Lösung eines ähnlichen, bereits bekannten Problems komplett bzw. teilweise auf das neue Problem übertragen und entsprechend der aktuellen Situation modifiziert wird [Althoff u.a. 92].

Die Vorteile dieser Technik liegen in:

- der Vermeidung von wiederholtem Planungsaufwand,
- der Möglichkeit zur dynamischen Erweiterung des Systemwissens durch die Akquisition neuer Fälle und

- in der Beschleunigung des Planungsprozesses durch den Rückgriff auf implizit im Plan enthaltene Planungsentscheidungen [Radtke/Schulz91].

In der Arbeitsplanerstellung läßt sich diese Technik vorwiegend in der Varianten- und der Anpassungsplanung wiederfinden, die im Abschnitt 2.1 beschrieben wurden.

3 Konzept einer rechnergestützten Arbeitsplanerstellung

3.1 Problemabgrenzung

Vor der Erarbeitung eines Lösungskonzeptes für die rechnergestützte Arbeitsplanerstellung im Rahmen des Projektes muß eine Abgrenzung der Problemstellung und eine inhaltliche Gewichtung der verfolgten Ziele vorgenommen werden.

Zielsetzung ist es, Techniken des analogen (fallbasierten) Schließens auf ihre Anwendbarkeit in technischen Expertensystemen zu untersuchen und diese für die Entwicklung von wissensbasierten Planungssystemen nutzbar zu machen. Die Richtigkeit und Tragfähigkeit der entwickelten Konzepte sollten dabei an der realen Problemstellung der Arbeitsplanerstellung überprüft werden. Das Ziel des entwickelten Konzeptes besteht aus der Sicht der Anwendung daher nicht in der Realisierung eines vollständigen rechnergestützten Systems zur Arbeitsplanerstellung sondern in der Erprobung neuer Konzepte an ausgewählten und repräsentativen Teilproblemen. Daher wurde die Problemstellung zu Anfang auf die Arbeitsplanerstellung für rotationssymmetrische Drehteile eingegrenzt.

3.2 Ziele

Bei der Entwicklung des Lösungskonzeptes wurden aus der Sicht der Anwendung Arbeitsplanerstellung einige Ziele verfolgt, die in diesem Abschnitt kurz beschrieben werden sollen.

Ausgehend von den im Kapitel 2 beschriebenen Planungsmethoden in der Arbeitsplanung und der Erkenntnis, daß diese Methoden in ihrer praktischen Anwendung nicht isoliert voneinander angewendet werden sondern vielmehr eine dem konkreten Teilproblem entsprechende Vorgehensweise gewählt wird, sollte das zu entwickelnde Konzept diese Vielschichtigkeit und Dynamik widerspiegeln. Es sollten sich daher in diesem Konzept einerseits die verschiedenen Planungsmethoden wiederfinden lassen, andererseits sollte ein fließender Übergang zwischen ihnen möglich sein.

Entsprechend der Zielstellung sollten innerhalb des Lösungskonzeptes insbesondere die Aspekte der Verwendung von Fallwissen, d.h. des Wissens aus bereits erarbeiteten Arbeitsplänen, berücksichtigt werden.

Das dritte wesentliche Ziel des Konzeptes und seiner Realisierung war der Beitrag zur strukturierten Erfassung von Arbeitsplanungswissen mit dem Ziel der informationstechnischen Weiterverarbeitung. Dieses Ziel umfaßt die Modellbildung im Bereich Arbeitsplanung und ist zwingende Voraussetzung für die modellbasierte Entwicklung von Expertensystemen in diesem Bereich.

3.3 Konzeptbeschreibung

Das folgende Ablaufschema enthält die wesentlichen Prozesse und (Zwischen-) Ergebnisse bei der Erstellung eines Arbeitsplanes ausgehend von einer vorliegenden Problembeschreibung. Dieses Konzept bildete die Grundlage sowohl für die Bildung der verschiedenen Arbeitspakete als auch für die prototypische Implementierung eines Systems zur Arbeitsplanerstellung.

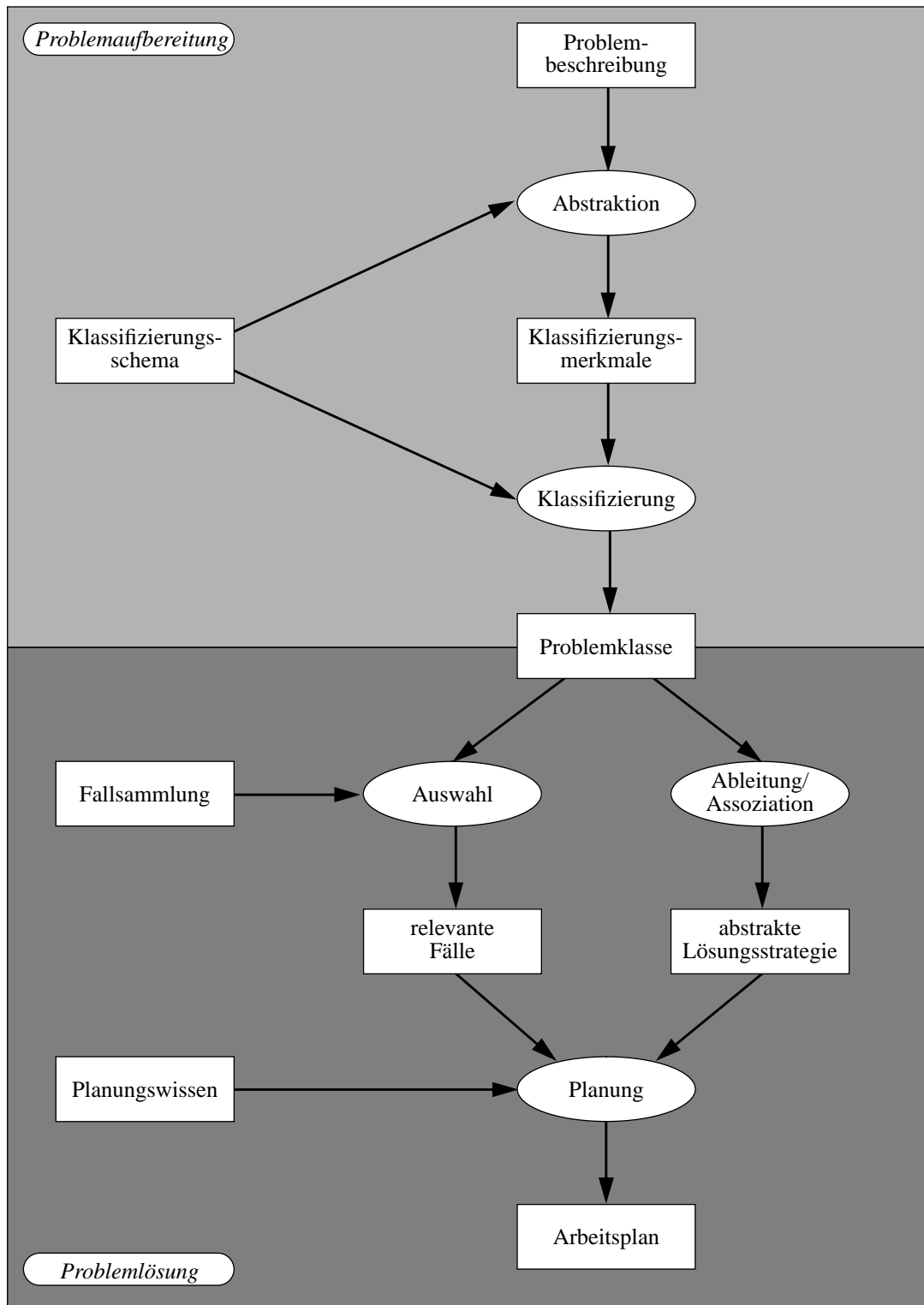


Bild 4: Ablaufschema zur rechnergestützten Arbeitsplanerstellung.

Bei der Entwicklung dieses Ablaufschemas wurde die Beobachtung berücksichtigt, daß insbesondere erfahrene Arbeitsplaner aktuelle Probleme wann immer möglich durch den Rückgriff auf gesammelte Erfahrungen und bereits existierende Arbeitspläne lösen. Das entstandene Ablaufschema stellt eine notwendige Formalisierung dieser Vorgehensweise dar. Es ist daher nicht als Modell des menschlichen Problemlösens zu sehen sondern als ein Realisierungskonzept, das sich an diese Vorgehensweise anlehnt.

Innerhalb des Ablaufschemas kann man zwei aufeinanderfolgende Phasen unterscheiden, die im folgenden erläutert werden sollen:

- die Problemaufbereitungsphase
Das Ziel der Problemaufbereitungsphase ist es, das aktuelle Planungsproblem so aufzubereiten, daß eine effiziente Lösung dieses Problems unter Einbeziehung bekannter Lösungen (Arbeitspläne) möglich wird. Zu diesem Zweck wird zunächst eine Problemabstraktion durchgeführt, die die wesentlichen Eigenschaften des aktuellen Problems herauskristallisiert. Mit Hilfe dieser Eigenschaften wird eine Klassifizierung des aktuellen Problems vorgenommen, so daß es einer bestimmten Problemklasse zugeordnet werden kann. Voraussetzung eines zielgerichteten Vorgehens in dieser Phase ist die Verwendung eines geeigneten Klassifizierungsschemas, das sowohl die Ziele des Abstraktionsprozesses festlegt als auch die verschiedenen Problemklassen definiert.
- die Problemlösungsphase
Die Problemlösung beginnt mit der Übernahme einer abstrakten Lösungsstrategie entsprechend der vorliegenden Problemklasse. Parallel dazu werden aus der Fallsammlung die Lösungen herausgesucht, die für das aktuelle Problem und damit für die aktuelle Problemklasse relevant sind. Die abstrakte Lösungsstrategie, die relevanten bekannten Lösungen und das Planungswissen sind dann die Eingangsgrößen für den eigentlichen Planungsprozeß. Dieser Prozeß ist als Synthese von hierarchischer nichtlinearer und fallbasierter Planung realisiert, wobei versucht wird, so viel wie möglich aus den bekannten Lösungen zu übernehmen. Die abstrakte Lösungsstrategie dient dabei als initiale Einschränkung der potentiellen Alternativen.

3.4 Bewertung aus Sicht der Anwendung

Das vorgestellte Ablaufschema zur rechnergestützten Arbeitsplanung stellt kein grundlegend neues Konzept dar. Der Grundgedanke der Integration von generativen und fallbasierten Techniken zur Problemlösung in der Arbeitsplanung wurde u.a. schon in [Humm u.a. 91] und [Radtke/Schulz91] beschrieben. Dieser Grundgedanke wurde jedoch dahingehend weiterentwickelt, daß die Voraussetzungen für einen effizienten Einsatz bekannter Lösungen eingehend untersucht wurden und aus diesen Untersuchungen ein Ergebnis abgeleitet werden konnte. Die Weiterentwicklung besteht in der Klassifizierung der Probleme und die Nutzung der Problemklassen für die Organisation der Fallsammlung und die Auswahl der relevanten Lösungen. Ein weiterer Nutzen dieser Problemklassen ist die Bereitstellung von Lösungen auf einer hohen Abstraktionsebene und damit die Realisierung eines hierarchischen Planungsansatzes.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Ablaufschemas ist seine Flexibilität bezüglich der in der Arbeitsplanung verwendeten Planungsmethoden. Der einzig bestimmende Einflußfaktor ist die

Ähnlichkeit zwischen dem aktuellen Problem und der jeweils betrachteten bekannten Lösung. Die Ähnlichkeit kann sich dabei zwischen der Identität (Wiederholplanung) und dem Unterschreiten einer pragmatisch zu definierenden Nützlichkeitsgrenze (Neuplanung) bewegen. Da beim Planungsprozeß nicht nur die bekannten, bestehenden Pläne in ihrer Gesamtheit sondern auch Teilpläne übernommen werden können, gilt diese Aussage für alle zu lösenden Teilprobleme innerhalb der Arbeitsplanerstellung.

Die Einbeziehung einer Problemklassifizierung in das Ablaufschema schuf zudem die Voraussetzung für die strukturierte Erfassung und Dokumentation von Arbeitsplanungswissen anhand von abstrakten Arbeitsplänen. Darüberhinaus stellt das Klassifizierungsschema selbst einen Beitrag zur Systematisierung dar, da es die wesentlichen Kriterien zur Problembeschreibung und damit auch zur Problemlösung für das gewählte Anwendungsgebiet benennt. Im Zusammenhang mit den erhobenen und ausgewerteten Arbeitsplänen der Fallsammlung entstand auf diese Weise eine strukturierte Wissenssammlung, die der Begriffswelt in der Praxis weitaus näher steht als die bisher üblichen Regelsammlungen. Hier zeigt sich ein Vorteil der hier verfolgten modellbasierten Vorgehensweise.

3.5 Schwerpunkte der prototypischen Konzeptumsetzung

Aus dem vorgestellten Ablaufschema lassen sich eine Reihe von Arbeitspaketen ableiten, die zur Umsetzung des Konzeptes notwendig sind.

Einen Schwerpunkt bildete dabei die Realisierung des Planungsschrittes. Dies umfaßt im wesentlichen die Kopplung von hierarchischer, nichtlinearer und fallbasierter Planung, wie sie in [Richter u.a. 93] und [Paulokat/Weß93] nachzulesen sind.

Aus Sicht der Anwendung stand die Modellbildung in der Arbeitsplanung im Vordergrund, die in die folgenden Arbeitspakete unterteilt wurde:

- Definition einer geeigneten Werkstückbeschreibung.
- Definition eines Klassifizierungsschemas einschließlich der dazugehörigen abstrakten Arbeitspläne.
- Aufbereitung von Arbeitsplänen und Erstellung einer Fallsammlung.
- Bereitstellung des anwendungsabhängigen Planungswissens.

Aufgrund ihrer Bedeutung werden die Ergebnisse ausgewählter Arbeitspakete im folgenden Kapitel beschrieben.

4 Beiträge zur Modellierung der Arbeitsplanerstellung

4.1 Umsetzung am Beispiel der Aufspannplanung

4.1.1 Warum Aufspannplanung?

Betrachtet man die funktionale Gliederung [Schulz92] und die Begriffsbildung in der Domäne Arbeitsplanerstellung sowie die als Eingangsinformationen vorliegenden Fertigteilbeschreibungen, so lassen sich die in der folgenden Tabelle beschriebenen Abstraktionsebenen innerhalb der Arbeitsplanerstellung feststellen¹.

Abstraktionsebenen	Fertigungsmittelbestimmung	Werkstückbetrachtung
Arbeitsvorgangsebene	Maschinendaten	global
Unterarbeitsvorgangsebene	Vorrichtungsdaten	global
Teilarbeitsvorgangsebene	Werkzeugdaten	lokal

Bild 5: Abstraktionsebenen in der Arbeitsplanerstellung und ihr Inhalt.

Die Planung auf diesen Abstraktionsebenen ist ein wesentliches Element des menschlichen Problemlöseprozesses in der Arbeitsplanerstellung. Daraus ergibt sich die zwingende Notwendigkeit ihrer Berücksichtigung bei der Modellbildung in der Arbeitsplanerstellung und bei der Umsetzung der Konzepte.

Im Sinne einer Vereinfachung der Problemwelt wurde von vornherein eine Beschränkung auf rotationssymmetrische Drehteile vorgenommen. Weiterhin dient diese Beschränkung der Konzentration auf das Wesentliche. Im Mittelpunkt konnte somit die Ausarbeitung und Erprobung der Konzepte stehen.

Durch die Beschränkung auf rotationssymmetrische Drehteile ist das technologische Verfahren Drehen und die dazugehörige Maschinenart der Drehmaschinen schon vorbestimmt, so daß auf der Technologieebene kein Planungsbedarf mehr besteht. Der Einstieg in die Problemlösung muß daher auf der Aufspannungsebene erfolgen. Die Aufspannplanung bildet somit den ersten Schritt innerhalb des Problemlöseprozesses. Darüberhinaus kann sie in ihrer Komplexität und Kompliziertheit als repräsentativ für das Gesamtproblem Arbeitsplanerstellung angesehen werden. Aus diesem Grund wurde sie als geeignetes Problemfeld für die Erprobung, Detaillierung und prototypische Umsetzung der Konzepte ausgewählt.

4.1.2 Ziele und Inhalte der Aufspannplanung

Die Ziele der Aufspannplanung sind in die Gesamtziele der Arbeitsplanung eingebettet, d.h. die Erzeugung von „korrekten“ Handlungsanweisungen, die eine termingerechte Fertigstellung

1. Eine weitere Detaillierung im Sinne der NC-Programmierung ist hier möglich, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

eines Werkstückes unter Berücksichtigung von geometrischen und technologischen Informationen mit minimalem Einsatz an vorhandenen Ressourcen bewirken. Für die Aufspannplanung ergeben sich hieraus die aufgabenspezifischen Optimierungsziele, ein Werkstück bezüglich seiner Aufspannungen so zu planen, daß eine möglichst minimale Anzahl verschiedener, vorhandener Spannmittel verwendet wird und die Anzahl der benötigten Aufspannungen minimal wird. Diese, bei singulärer Betrachtung der Ziele im allgemeinen einfach durchzuführende, aufgabenspezifische Optimierung, wie sie z.Z. häufig in rechnerunterstützten Systemen angewendet wird, führt häufig zu Problemen bezüglich der Ausführbarkeit und der ganzheitlichen Optimierung des Arbeitsplanes und verursacht zudem schwer lösbare Zielkonflikte. Hier setzt das entwickelte Realisierungskonzept an, indem Zielkonflikte erkannt und interaktiv gelöst werden können.

Die vorgenannten Ziele, von denen die Ausführbarkeit herausgehoben ist, bedingen die Planungsinhalte der Aufspannplanung. Ausgehend von der Fertigteilzeichnung, dem vorgegebenen Rohteil und den bekannten Ressourcen werden während der Aufspannplanung, die in die Aufgaben der Arbeitsplanerstellung eingebettet ist, im allgemeinen die folgend genannten Fragen gestellt und beantwortet.

- Wieviel Aufspannungen sind zur Fertigung eines gegebenen Werkstückes aus einem bekannten Rohteil notwendig?
- Welche Aufspannungen sind sinnvoll, d.h. führen zu einem ausführbaren Arbeitsplan?
- Welche Art von Spannmittel wird verwendet?
- Sind zusätzlich Nebenspannmittel erforderlich? Welche?
- Welche Flächen eignen sich prinzipiell zum Aufspannen des Werkstückes?
- Wo liegen Aufspannflächen?
- Wie sieht eine Grobstrategie zur Fertigung, d.h. eine Reihenfolge von Aufspannungen und eine Zuordnung zu Fertigungsschritten, aus?
- Wie sehen die Zwischenzustände für die einzelnen Fertigungsschritte ausgehend vom Roh- teil zum Fertigteil aus?

Daraus können auch in etwas allgemeinerer Form die Planungsinhalte der Aufspannplanung abgeleitet werden.

- Festlegung der Ressourcenart, d.h. die Einschränkung und Festlegung auf eine oder mehrere Klassen potentiell anzuwendender und zur Verfügung stehender Spannmittel bezogen auf die konkrete Problemsituation,
- Positionierung der Aufspannung, d.h. die Festlegung der relativen Lage von Werkstück und Spannmittel zueinander, und damit auch die Identifikation von Werkstückflächen, auf denen das Spannmittel und das Werkstück sich physisch während einer oder mehrerer Teilarbeitsvorgänge (Fertigungsschritte) berühren,
- Festlegung der Aufspannfolge, d.h. der zeitlichen Anordnung der einzelnen Aufspannungen, die zur vollständigen Durchführung der Bearbeitungsaufgabe innerhalb eines Arbeitsvorganges an einem Arbeitsplatz erforderlich sind.

Durch die Interaktion der Aufspannplanung mit der Abstraktionsebene der Teilarbeitsvorgänge, wie sie z.B. durch die oben genannte Zuordnung von Teilarbeitsvorgängen zu einer Aufspannung deutlich wird, kann sie nicht vollständig isoliert betrachtet werden. Daher sind hier zunächst noch folgende zusätzliche Arbeitsinhalte zu berücksichtigen.

- Bearbeitungsart, d.h. mögliche Fertigungsschritte zur Herstellung des Werkstückes,
- Reihenfolge von Fertigungsschritten, d.h. deren zeitliche Anordnung, wie sie sich aus geometrischen und technologischen Randbedingungen ergeben wird,
- Zwischenzustände, die zur Planung von eventuell weiteren Aufspannungen benötigt werden,
- Zuordnung von Fertigungsschritten zu Aufspannungen oder umgekehrt.

Nachdem Ziele und daraus abzuleitende Inhalte der Aufspannplanung dargestellt wurden, wird im folgenden die Vorgehensweise bei der Aufspannplanung beschrieben.

4.1.3 Vorgehensweise bei der Aufspannplanung

„Die“ Vorgehensweise bei der Aufspannplanung existiert nicht; Vorgehensweisen sind genauso vielfältig wie die Anzahl derjenigen, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzen haben. Bild 6 zeigt schematisch das gewählte Vorgehen und einige der betrachteten Einflußparameter bei der Planung von Aufspannungen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Untersuchung der Einflußparameter wird hier verzichtet.

In der ersten Phase wird die Anzahl potentieller Aufspannungen bestimmt. Das Ergebnis ist nicht als Datum zu sehen, sondern erfordert bei fortschreitender Planung auch Anpassungen. Danach wird die Aufspannsituation ermittelt. Sie beschreibt abstrakt wie das Werkstück zu aufzuspannen ist. Hierbei wird lediglich festgelegt, ob das Werkstück mit einem Hauptspannmittel (nur links), mit einem Haupt- und einem Nebenspannmittel (links und rechts, links und mittig) oder mit einem Haupt- und mehr als einem Nebenspannmittel aufgespannt wird. Einflußgrößen werden ebenfalls genannt und untersucht. Bei der folgenden Ermittlung potentieller Spannflächen - sie sind in diesem frühen Stadium der Planung nicht endgültig - werden unter Ausnutzung der Aufspannsituation und der Anzahl der Aufspannungen Flächen gesucht, die zum Ansetzen eines noch unbekanntes Spannmittels geeignet sind. Die Auswahl einer bestimmten Art von Spannmitteln gestattet dann die retrospektive Prüfung der Eignung gewählter Spannflächen. Zur Festlegung einer Spannmittelart müssen allerdings schon Anforderungen berücksichtigt werden, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht explizit feststehen, z.B. die beabsichtigten Bearbeitungen. Im letzten Schritt können Aufspan- und Bearbeitungsstrategie geplant werden. Nach der Durchführung aller vorgenannten Schritte sind daher die Planungsergebnisse zu verifizieren, da die Planung in den einzelnen Phasen auf Annahmen beruhen.

Mit der Darstellung der Ziele, Inhalte und der Vorgehensweise bei der Aufspannplanung ist das betrachtete Problemfeld ausreichend beschrieben. Auf die jeweiligen speziellen Anforderungen und Rahmenbedingungen wird bei der anschließenden Beschreibung der Ergebnisse ausgewählter Teilaufgaben der Modellierung eingegangen.

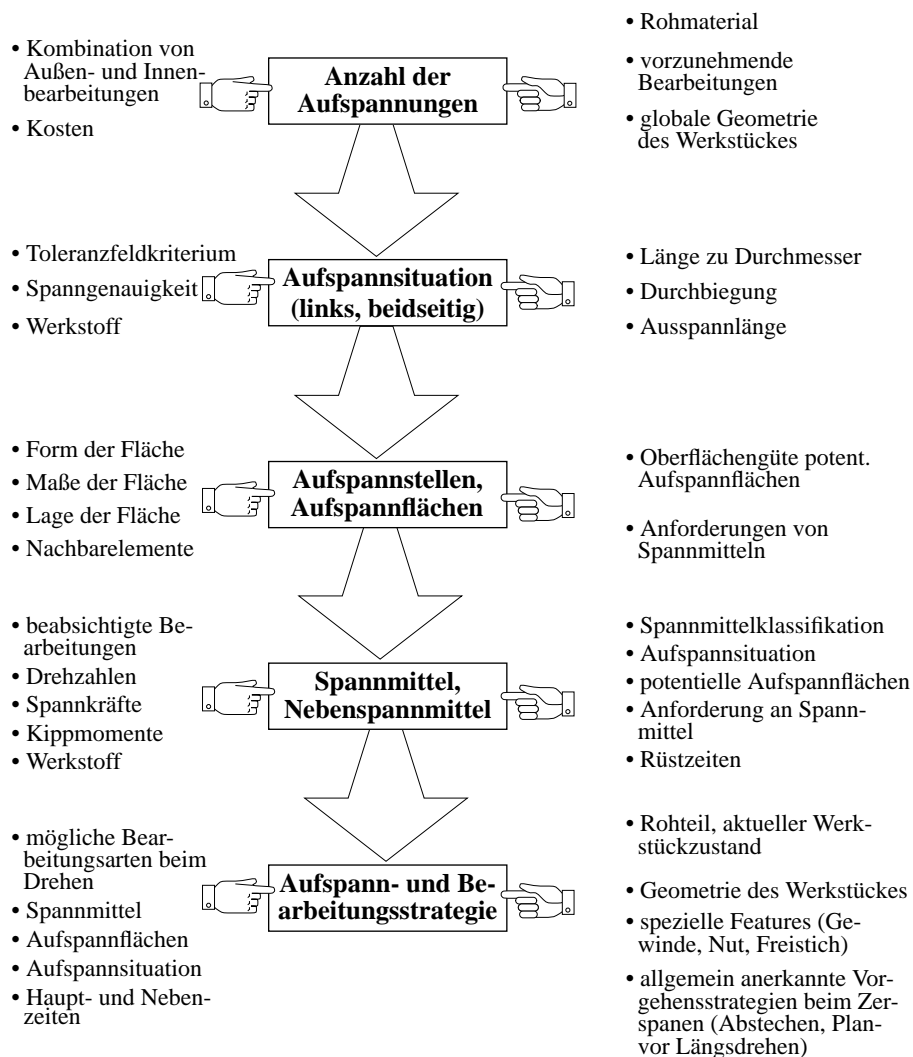


Bild 6: Vorgehensweise und Einflußparameter bei der Aufspanplanung

4.2 Entwicklung eines Klassifizierungsschemas

4.2.1 Einordnung und Zielstellung

Wie aus dem im Bild 4 dargestellten Ablaufschema ersichtlich wird, kommt dem Klassifizierungsschema innerhalb der Problemaufbereitungsphase eine zentrale Bedeutung zu. Es dient der Klassifizierung des aktuellen Problems und durch die Bereitstellung einer der Problemklasse angepaßten abstrakten Lösungsstrategie als Ausgangspunkt und richtungweisendes Element der Problemlösung. Zusätzlich bestimmt es das Ziel und damit auch Inhalt und Ablauf des Abstraktionsprozesses der aktuellen Problembeschreibung, der letztlich zu einer abstrakten Problembeschreibung anhand von Klassifizierungsmerkmalen führt.

Die Zielstellung des Klassifizierungsschemas ergibt sich neben der Funktion innerhalb des Ablaufschemas auch aus den konkreten Randbedingungen seines Einsatzes. Diese sind gekenn-

zeichnet durch das Werkstückspektrum der rotationssymmetrischen Drehteile und das Problemfeld der Aufspannplanung. Zusammenfassend kann die Zielstellung des Klassifizierungsschemas daher wie folgt beschrieben werden:

Bestimmung von Klassen von rotationssymmetrischen Drehteilen mit gleicher Aufspann- (Fertigungs-)strategie zur Verwendung dieser Strategie bei der Planung von neuen Werkstücken.

Das entwickelte Klassifizierungsschema unterscheidet sich durch die Einbeziehung der Aufspann- und Fertigungsstrategien in seinem Umfang und durch seine Zielstellung deutlich von bekannten Klassifizierungsschemata, die z.B. in [Zimmermann67], [Opitz66] und [Lutz67] beschrieben sind.

4.2.2 Einschränkungen

Um die Problemkomplexität zur Erstellung eines Klassifizierungsschemas zu reduzieren, werden Einschränkungen vorgenommen, ohne daß die Ziele und die Aussagekraft des Klassifizierungsschemas beeinträchtigt werden.

Es werden drei Arten von Einschränkungen gemacht:

- Einschränkung der verwendeten Werkstoffe,
- Einschränkung der verwendeten Rohteile und
- Einschränkungen der betrachteten Merkmalsgruppen.

Beim Werkstoff wird von der Verwendung "normalen" Baustahls, vergleichbar St-37, ausgegangen, der in der metallverarbeitenden Industrie häufig zerspannt wird und damit keine Beschränkung der Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes darstellt.

Als Rohteile werden nur solche mit einem minimalen Bearbeitungsaufmaß auf jeder Fläche zugelassen. Diese entsprechen Fall 1 in Bild 7. Ausgegrenzt werden Stangen, Rohre und Stücke, deren Aufmaß an einer Stirnseite sich zum Aufspannen eignet. Es werden auch nur zylindrische Rohteile zugelassen. Durch den Wegfall möglicher Spannstellen stellt diese Einschränkung eher eine Verschärfung des Aufspannproblems dar.

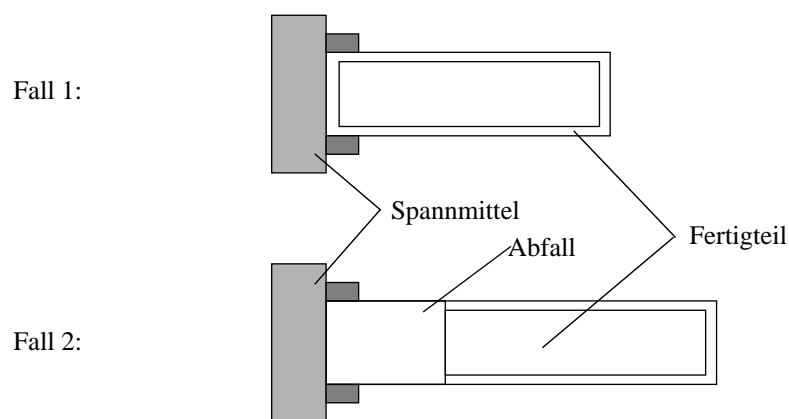


Bild 7: Möglichkeiten der Bearbeitung vom (nicht vorgearbeiteten) Stück.

Innerhalb der Eingrenzung der Merkmale im Klassifizierungsschema werden z.B. technologische Merkmale, wie Genauigkeiten, Oberflächengüten, Härten sowie organisatorische Merkmale, wie Stückzahlen, Rüstzeiten nicht betrachtet.

4.2.3 Aufbau des Klassifizierungsschemas

Das Klassifizierungsschema setzt sich entsprechend seiner Zielstellung aus zwei Bestandteilen zusammen:

- dem Klassifizierungsschlüssel zur Problemklassifizierung und
- dem Lösungsteil zur Beschreibung der entsprechenden abstrakten Lösungsstrategie.

Die beiden Bestandteile unterscheiden sich in ihrem Aufbau sehr stark voneinander. Während der Klassifizierungsschlüssel einen sehr formalen Aufbau besitzt und sich damit an den Aufbau bekannter Klassifizierungsschlüssel anlehnt, ist der Lösungsteil nur schwach formalisiert. Dies ist auf die Zielstellung zurückzuführen, mit Hilfe des Klassifizierungsschemas eine Wissenssammlung und -strukturierung in der Domäne Arbeitsplanerstellung unabhängig von konkreten Wissensrepräsentationsformalismen durchzuführen. Die Ergebnisse sind somit langfristig nutzbar, da sie implementierungsunabhängig dokumentiert sind.

Im folgenden werden der Klassifizierungsschlüssel und der Lösungsteil in ihren Grundzügen beschrieben.

4.2.3.1 Beschreibung des Klassifizierungsschlüssels

Durch die im vorhergehenden Kapitel erläuterten Einschränkungen war es möglich, die Zahl der relevanten Werkstückeigenschaften auf drei zu begrenzen. Im einzelnen handelt es sich dabei um folgende Eigenschaften:

- Länge-Durchmesser-Verhältnis,
- Äußere Grundkontur,
- Innere Grundkontur.

Alle diese drei Merkmale werden als unabhängig voneinander betrachtet, so daß ein paralleler Code, der jedes Merkmal durch eine bestimmte Stelle kodiert, gewählt wurde. Für die Kodierung der einzelnen Merkmalsausprägungen wurde ein dezimaler, numerischer Code aufgrund seiner Einfachheit ausgewählt.

Die Reihenfolge der einzelnen Merkmale entspricht der obigen Aufzählung. Ausschlaggebend hierfür war die Bedeutung der einzelnen Merkmale für die Aufgabe der Klassifizierung. Zusätzlich konnte noch eine Übereinstimmung mit der Reihenfolge innerhalb des Opitz-Code festgestellt werden. Insgesamt ergibt sich somit der folgende Kode-Aufbau:

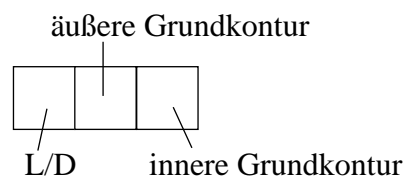


Bild 8: Bedeutung der einzelnen Stellen des Codes

Im folgenden wird die Kodierung der einzelnen Merkmale kurz erläutert.

Kodierung des Länge-Durchmesser-Verhältnisses¹

Das Länge-Durchmesser-Verhältnis teilt die Gesamtheit des hier betrachteten Werkstückspektrums in zwei Klassen: die scheibenförmigen und die wellenförmigen Drehteile. Für die scheibenförmigen Drehteile wird dabei das Länge-Durchmesser-Verhältnis wie folgt definiert: $0 < L/D \leq 1,2$. Für wellenförmige Drehteile gilt die folgende Beziehung: $1,2 < L/D \leq 6$. Ein größeres Länge-Durchmesser-Verhältnis (schlanke Wellen, Drähte), wird nicht zugelassen.

Insgesamt ergibt sich damit die folgende Struktur der Merkmalsausprägungen:

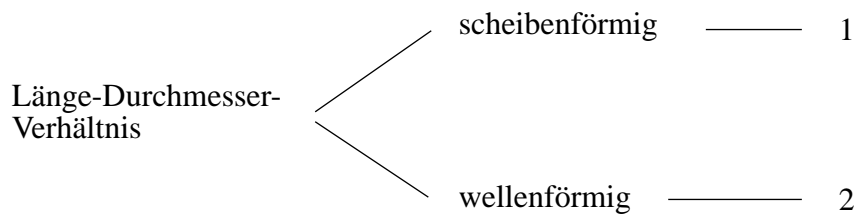


Bild 9: Struktur der Merkmalsausprägungen des Länge-Durchmesser-Verhältnisses

Kodierung der äußeren Grundkontur²

Das zweitwichtigste Merkmal zur Klassifizierung eines Werkstückes entsprechend der Aufspanstrategie ist die äußere Grundkontur.

Das nachfolgende Schema beschreibt die Klassifizierung der Merkmalsausprägungen zur Beschreibung der äußeren Grundform eines rotationssymmetrischen Drehteils einschließlich ihrer Zuordnung zu einem Kodierungsschlüssel.

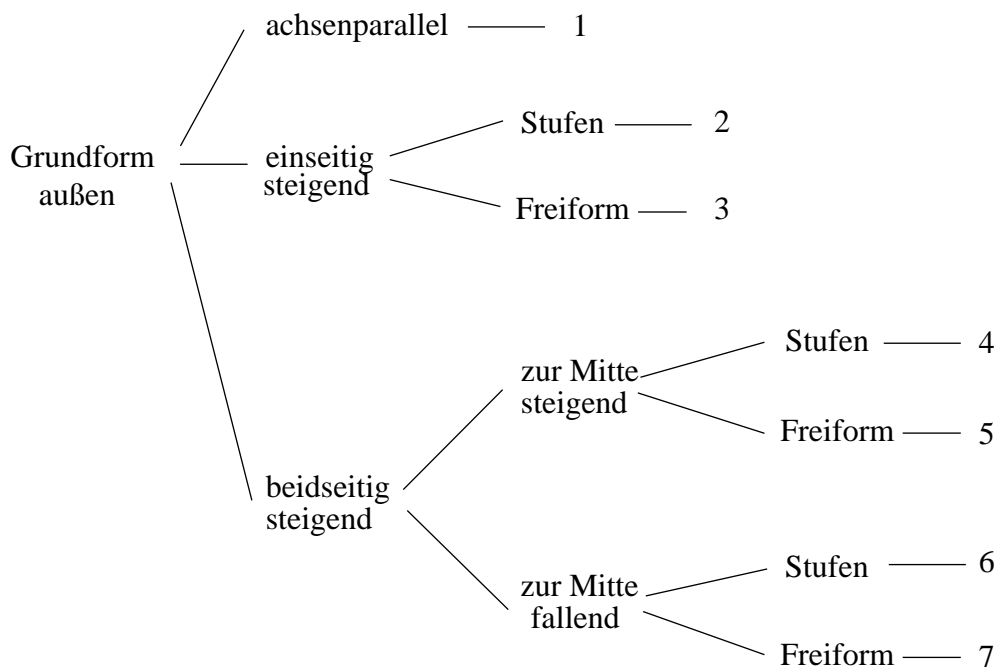


Bild 10: Struktur der Merkmalsausprägungen der äußeren Grundform

1. Die ausführliche Kodierungstabelle befindet sich im Anhang A.
 2. Die ausführliche Kodierungstabelle befindet sich im Anhang A.

Kodierung der inneren Grundkontur¹

Die innere Grundform ist das dritte und letzte Merkmal zur Klassifizierung des betrachteten Werkstückspektrums.

Das folgende Schema beschreibt die Klassifizierung der Merkmalsausprägungen zur Beschreibung der inneren Grundform.

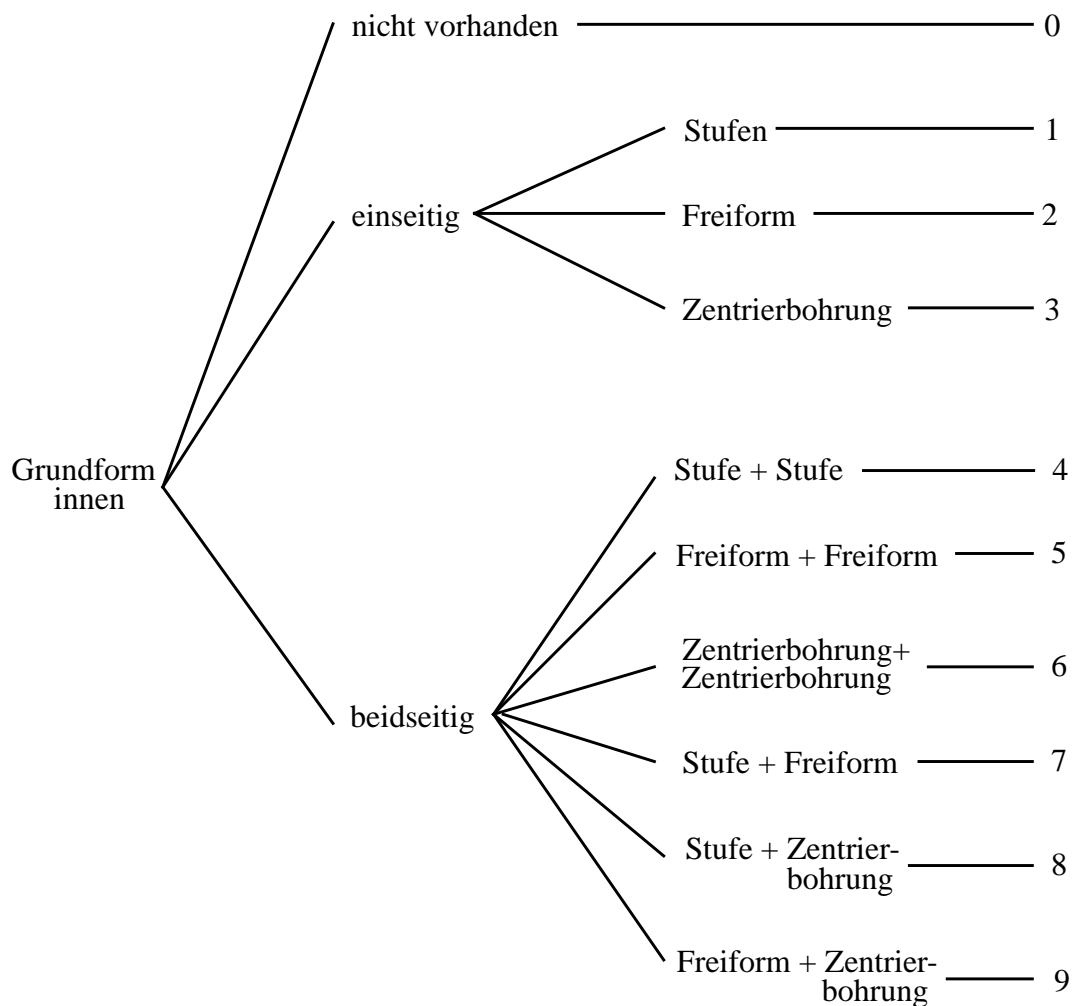


Bild 11: Struktur der Merkmalsausprägungen der inneren Grundform

4.2.3.2 Beschreibung des Lösungsteils²

Der Lösungsteil innerhalb des Klassifizierungsschemas besteht aus drei Bestandteilen zur Beschreibung verschiedener Aspekte der abstrakten Lösung:

-
1. Die ausführliche Kodierungstabelle befindet sich im Anhang A.
 2. Ein ausführliches Beispiel befindet sich im Anhang B.

- Aufspannung,
- Aufspann- und Bearbeitungsstrategie und
- Annahmen.

Zur Beschreibung der Aufspannung sind die Ausprägungen der Merkmale geschätzte Anzahl der Aufspannungen, Aufspannsituation, Aufspannflächen und Spannmittel anzugeben.

Die Spann- und Bearbeitungsstrategie wird durch die natürlichsprachliche Erläuterung der einzelnen Aufspann- und Bearbeitungsoperationen entsprechend ihrer Reihenfolge beschrieben.

Die über die allgemeinen Einschränkungen und Annahmen, wie sie bereits in Kapitel 4.2.2 dargestellt wurden, hinaus getroffenen Annahmen werden ebenfalls natürlichsprachlich beschrieben.

4.3 Erstellen einer Fallsammlung aus realen Arbeitsplänen

Reale Arbeitspläne und NC-Programme stellen einen reichhaltigen Wissensschatz, über den jedes Fertigungsunternehmen verfügt, dar. Allerdings sind die Arbeitspläne in der in den Unternehmen vorliegenden Form für die rechnerunterstützte Planung nicht nutzbar, da sie letztendlich nur das Ergebnis der Planung dokumentieren, aber keine explizite Begründung der getroffenen Entscheidungen enthalten. Durch die Aufbereitung werden diese Entscheidungen aus den Arbeitsplänen wieder extrahiert und den Arbeitsplänen explizit hinzugefügt. Daher kann mit Hilfe dieser aufbereiteten Arbeitspläne neben der strukturierten und auch modellbasierten Erfassung von Wissen zur Arbeitsplanerstellung eine Detaillierung der Planungsergebnisse, wie sie mit den abstrakten Arbeitsplänen entstehen, vorgenommen werden.

Die Vorgehensweise zur Aufbereitung der Arbeitspläne ist allgemeingütig und daher auch bei der Erstellung einer Fallsammlung für prismatische Werkstücke oder bei Betrachtung der Planung auf anderen Abstraktionsebenen durchführbar. Ausgehend von den Arbeitsplänen, die eine Form vergleichbar dem REFA-Standardarbeitsplan [REFA74] besitzen, werden die Reihenfolge der Fertigungsverfahren und die Reihenfolge der Aufspannungen festgestellt. Dabei enthält der analysierte Arbeitsplan meist auch eine Kurzdokumentation der Fertigungsschritte und ein Verweis auf die verwendeten Ressourcen. Eine weitere Hilfe stellt die Auswertung von Zusatzdokumenten dar, wie z.B. NC-Programme, Einrichteblätter und Aufspannskizzen. Aus den NC-Programmen werden in Verbindung mit den Einrichteblättern detailliert die Fertigungsschritte und die im jeweiligen Fertigungsschritt genutzten Ressourcen entnommen. Eine Aufbereitung muß nun die Begründungen zu den einzelnen Schritten, den genutzten Verfahren, den Zwischenzuständen, den Reihenfolgen etc. herausarbeiten und dokumentieren.

Ein aufbereiteter Arbeitsplan eines Werkstückes kann grob in drei Bereiche gegliedert werden:¹

- Beschreibung des Initial- und des Terminalzustandes gegeben durch Rohteil- und Fertigteil-spezifikation anhand einer entwickelten Werkstückbeschreibung,
- begründete Beschreibung der verfolgten Bearbeitungsstrategie,
- begründete Beschreibung der verfolgten Aufspannstrategie,
- sonstige Annahmen und Randbedingungen.

1. Ein ausführliches Beispiel für einen solchen aufbereiteten Arbeitsplan befindet sich im Anhang C.

Die Beschreibung des Initial- und des Terminalzustandes sowie aller erreichten Zwischenzustände erfolgt innerhalb der aufbereiteten Arbeitspläne in Form leicht verständlicher Sinnbilder, die nicht nach den Regeln des technischen Zeichnens ausgeführt sind. Diese Form hat sich als praktikabel herausgestellt. Die drei letztgenannten Punkte sind z.Z. in Form einer natürlich-sprachlichen Beschreibung ausgeführt und den Sinnbildern der Zwischenzustände zugeordnet. Eine formale Ausführung dieser aufbereiteten Arbeitspläne, die wesentliche Vorteile einer modellbasierten Vorgehensweise bei der Aufbereitung in sich birgt, z.B. in Form einer sog. „Arbeitsplanbeschreibungssprache“, wurde noch nicht ausgeführt. Hier sind auch unter Beachtung der Anforderungen aus der Anwendungsdomäne entsprechende Sprachkonstrukte und Grammatiken zu entwickeln.

Zur Nutzung dieses Fallwissens wird jeder Arbeitsplan in das Klassifizierungsschema eingeordnet, so daß zu jedem Blatt einige Arbeitspläne existieren. Für den Planungsvorgang sind aus der Fallsammlung mit Hilfe des Klassifizierungsschemas die bekannten und aufbereiteten Lösungen (Arbeitspläne), also situationsrelevante Fälle, wieder auffindbar und auch nutzbar durch die Aufbereitung.

Auf die Darstellung weiterer Arbeitspakete, wie der Entwicklung einer adäquaten Werkstückbeschreibung zur Repräsentation von Initial-, Zwischen- und Terminalzuständen, wird an dieser Stelle verzichtet. Innerhalb der weiteren Abschnitte wird qualitativ dargelegt wie die abstrakten Arbeitspläne und die aufbereiteten Arbeitspläne im Sinne des Lösungskonzeptes zusammenwirken.

4.4 Definition des Planungsablaufes

Der Planungsablauf ist bestimmt durch die angewendeten Lösungsprinzipien und den Abhängigkeiten zwischen den oben genannten Inhalten. In Abhängigkeit des gewählten Lösungsprinzips wird vom rechnergestützten System zunächst versucht, eine „ähnliche“ Lösung, d.h. die vollständige Übernahme einer bestehenden Lösung auf der betrachteten Abstraktionsebene, d.h. der Aufspannplanung, zu finden. Um dies zu ermöglichen, wird auf das dafür entwickelte Klassifizierungsschema zurückgegriffen. Innerhalb der aufbereiteten Arbeitspläne sind zusätzlich die Bedingungen, die zu dieser Lösung führten, explizit repräsentiert, so daß sukzessive überprüft werden kann, in welchem Umfang die gewählte Lösung auf die aktuelle Situation übertragen werden kann und an welchen Stellen eine Anpassung erforderlich ist. Dieser Schritt wird auch *Replay* genannt. Kommt es bei dieser Überprüfung zu Konflikten, so muß entschieden werden, ob die Lösungsschritte bis zum aufgetretenen Konflikt teilweise übernommen werden oder andere „ähnliche“ Lösungen für das gerade betrachtete Ziel besser geeignet sind. Werden keine anderen Lösungen propagiert, ist eine Problemzerlegung erforderlich, um mit ähnlichen Lösungen, allerdings auf einer niedrigeren Abstraktionsebene oder auch generativ, weiteren Fortschritt in Richtung einer Lösung für die aktuelle Situation zu erzielen. Tritt auf einer der niedrigen Hierarchieebenen ein nicht lösbarer Konflikt auf, so muß auf der nächsthöheren Ebene eine andere Lösung gefunden werden.

Der oben im allgemeinen beschriebene Ablauf soll an einem exemplarischen Beispiel in den folgenden beiden Bildern dargestellt werden. Bei rein fallbasierter Vorgehensweise wird eine gefundene Lösung vollständig übernommen, d.h. das Gesamtproblem wird auf das Finden der

Lösung und ihre Analyse auf die Anwendbarkeit in Bezug auf die konkrete Situation reduziert. Dieser Ablauf ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

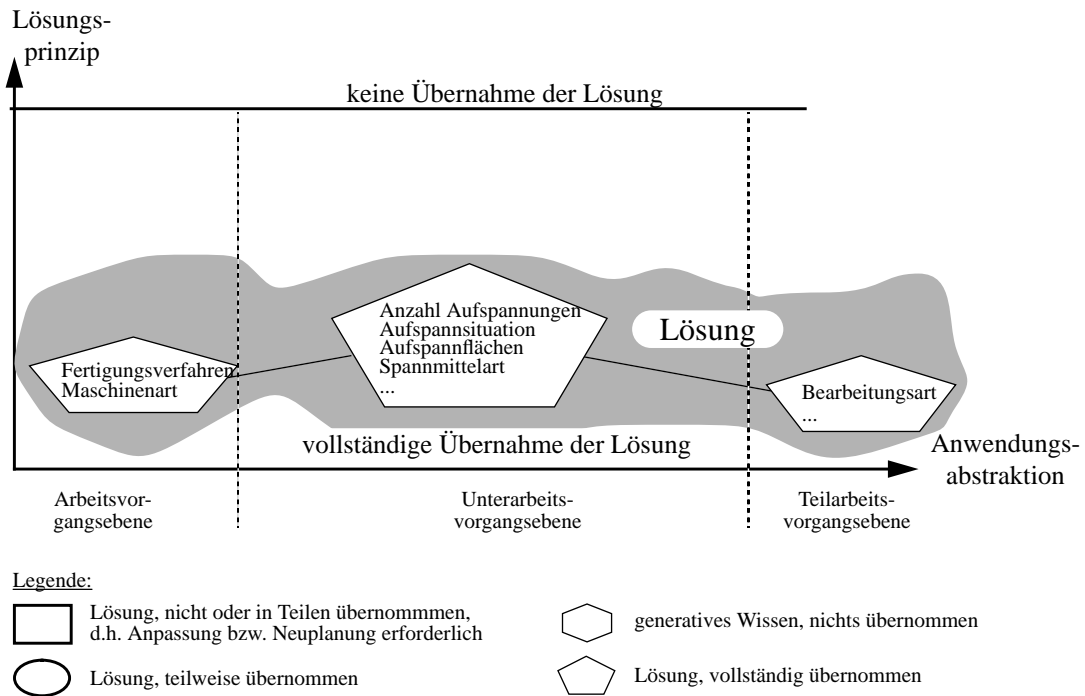


Bild 12: Darstellung der vollständigen Übernahme von bestehenden Lösungen auf der Abstraktionsebene der Aufspannplanung.

Werden, wie in Bild 13 dargestellt, mehrere Lösungen gefunden und können aber von jeder dieser Lösungen jeweils nur Teile übernommen werden, so ist eine Problemzerlegung erforderlich. Die Anpassung der Teillösungen erfolgt solange wie möglich mit fallbasierten Techniken. Die Ziele Fertigungsverfahren und Maschinenart auf der Arbeitsvorgangsebene werden wegen der geschilderten projektspezifischen Randbedingungen immer fallbasiert gelöst. Sie sind hier der Vollständigkeit wegen aufgeführt. Auf der Ebene der Unterarbeitsvorgänge wurde eine Problemzerlegung durchgeführt, wobei jedes der aufgeführten Ziele aus verschiedenen Lösungen entstammt. Einige der Teilziele (z.B. Spannmittelart, Anzahl Aufspannungen) werden direkt übernommen; für andere (z.B. Spannsituation) ist eine weitere Problemzerlegung (mittels generativen Wissens) zur Auflösung von bestehenden Konflikten erforderlich. Dabei wird unterschieden in die Situationsbeschreibung, z.B. Aufspannsituation einseitig oder zweiseitig, innen oder aussen, mit oder ohne Abstützung und in die Einflußparameterbeschreibung, z.B. Länge-Durchmesser-Verhältnis, Spanngenaugigkeit, Ausspannlänge, Bearbeitungsart, Spannmittelart, usw.

Mittels der Einflußparameter werden Zielkonflikte identifiziert. Erkennt das System im Replay einen solchen Zielkonflikt, hier am Beispiel Aufspannsituation - Spannmittelart - Bearbeitungsart eingezeichnet, so sind, wie in der Abbildung dargestellt, zwei Fälle zu unterscheiden:

- Das System kann diesen Zielkonflikt selbständig lösen, das bedeutet, daß der Benutzer nicht eingreifen muß, z.B. durch Übernahme der Spannmittelart („Spitzen“), die dann allerdings eine Restriktion zur Ermittlung der Aufspannsituation („zweiseitig“) darstellt.
- Der Zielkonflikt kann nur durch den Benutzer interaktiv gelöst werden, indem er das näch-

ste Ziel, für das eine Lösung herbeigeführt werden soll, auswählt, z.B. die Aufspannsituation („zweiseitig“), welches zur Folge hat, daß die Bearbeitungsart („keine Stirnseiten bearbeiten“) eingeschränkt wird. Entscheidet sich der Benutzer für die Bearbeitungsart („Stirnseiten bearbeiten“), so ist die Übernahme des Teilzieles Spannmittelart („Spitzen“) aus Lösung 2 nicht möglich. Das Wissen über diese komplexen und vielfältigen Konflikte ist z.Z. nicht vollständig erfaßt, so daß das System nur über eingeschränkte Möglichkeiten verfügt, den erfolversprechensten Weg zur Auflösung dieser Konflikte herauszufiltern.

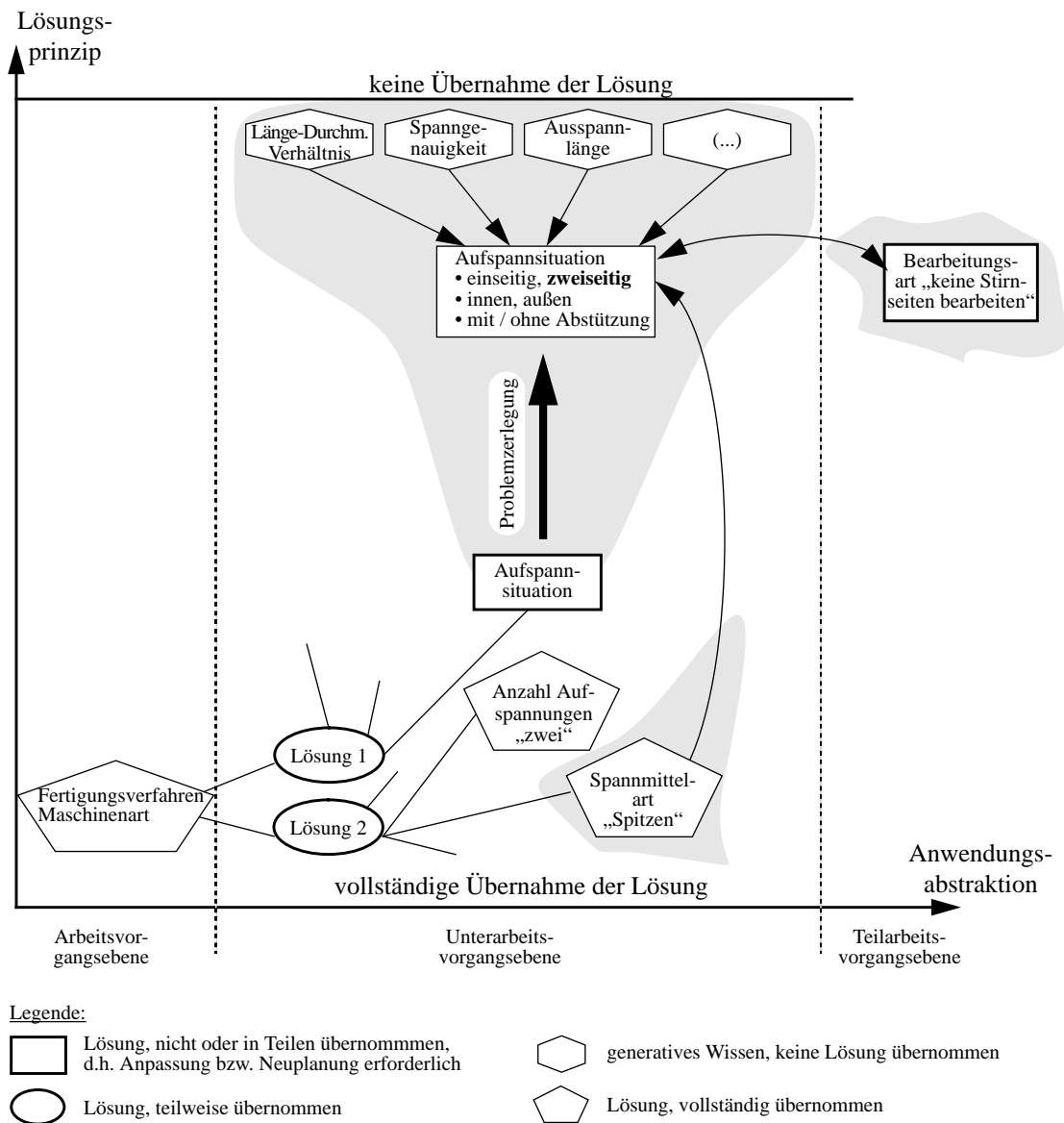


Bild 13: Darstellung der teilweisen Übernahme von Lösungen auf der Abstraktionsebene der Aufspannplanung.

Die dargestellte Vorgehensweise entspricht der Integration von fallbasierten und generativen Planungstechniken der KI auf einem Teilausschnitt der Arbeitsplanerstellung. In diesem speziellen Fall werden bekannte Teillösungen für die Anzahl an Aufspannungen und die Spannmittelart kombiniert mit einer neu erzeugten Lösung für das Teilziel Aufspannungssituation. Dabei werden die im Kapitel 2 beschriebenen Lösungsprinzipien der Arbeitsplanerstellung genutzt, wobei immer zuerst versucht wird, bekannte Lösungen zu finden und diese unter Anpassung auf die konkrete Situation anzuwenden.

5 Zusammenfassung und Bewertung

Ausgehend von der Erkenntnis, daß die Arbeitsplanung aus vielfältigen Gründen bereits ein „Flaschenhals“ der technischen Produktentstehung darstellt, wurde durch Anwendung einer strukturierenden, modellbasierten Vorgehensweise versucht, Konzepte zur effizienten rechnergestützten Erzeugung von Arbeitsplänen zu entwickeln und ihre Tragfähigkeit im Teilbereich der Aufspannplanung nachzuweisen. Für die gewählte Vorgehensweise sind die in der Literatur genannten Planungsmethoden (Neu-, Anpassungs-, Varianten-, Wiederholplanung) zu wenig differenziert. Es wurden drei fließend ineinander übergehende Planungsprinzipien identifiziert, die insbesondere in technischen Domänen mit ausgeprägtem Nutzen-Aufwand-Denken zur Lösungsfindung und -erzeugung eingesetzt werden. Sie ermöglichen in Verbindung mit geeigneten Abstraktionsebenen der Arbeitsplanerstellung zum einen die vier Planungsmethoden in einer Theorie zusammengeführt zu betrachten, zum anderen die Nachbildung von bereits analysierten Vorgehensweisen von Arbeitsplanern. Es wurde ein zweistufiges, realisierbares Konzept, basierend auf bekannten Planungstechniken der KI, entwickelt, welches insbesondere die Möglichkeiten des dynamischen Überganges zwischen den Planungsprinzipien und ihrer situationsadäquaten Anwendung berücksichtigt. Für die erste Phase der Problemaufbereitung wurde ein einfaches, direkt auf die Aufspannplanung bezogenes Klassifizierungsschema zur zielgerichteten Vorsondierung und Einschränkung der anzuwendenden Lösungsstrategie bei der Planung. Für die zweite Phase der Problemlösung wurden in dieses strukturierende Schema abstrakte Pläne, die die Lösungsstrategie repräsentieren sowie analysierte und aufbereitete Arbeitspläne als Fallbasis eingebracht. Ein wünschenswerter synergetischer Effekt wurde durch die Verwendung der gefundenen Einflußgrößen aus oben angeführter Arbeitsplananalyse für die Akquisition und Aufbereitung des Planungswissens auf der generativen Ebene erzielt, welches in Erscheinung tritt, wenn bekannte Lösungen angepaßt werden oder kein signifikantes Fallwissen angewendet werden kann.

Das entwickelte Konzept stellt ein formalisiertes Modell der Arbeitsplanerstellung dar, mit dessen Hilfe das Ziel einer effizienten Planerzeugung im betrachteten Ausschnitt der Anwendungsdomäne nachweislich erreicht wird; außerdem kann je nach Grad der Lösungsübernahme mit geringem Aufwand ein zumindest teilloptimaler, ausführbarer Plan erzeugt werden. Die Tragfähigkeit des Konzeptes bei prismatischen oder blechförmigen Werkstücken sowie seine Verwendbarkeit bei Groß- oder Massenfertigung und verschiedenen Fertigungsarten (Linienfertigung, Zellenfertigung) ist nicht untersucht. Nicht betrachtet wurde auch die Vollständigkeit der Vorgehensweise, z.B. bezüglich des gesamten Anwendungsbereiches oder der Bewertung von Alternativen hinsichtlich anderer Zielkriterien als technologischer, wie Kosten oder Zeit.

Ausgeklammert wurde bewußt die Untersuchung der Ähnlichkeit von Arbeitsplänen. Hier sind zum einen Defizite auf der Seite der Informatik bezüglich formaler Methoden und Algorithmen, zum anderen die Aufforderung an den Anwender, seine Vorstellung von Ähnlichkeit zu definieren.

Ein wesentlicher Vorteil der angewendeten modellbasierten Vorgehensweise und dieses Konzeptes liegt in der Verwendung von Arbeitsplänen zur Wissensakquisition, die innerhalb von Fertigungsunternehmen zum ersten verfügbar sind, zum zweiten in großer Zahl existieren, zum dritten unternehmensspezifische Aspekte berücksichtigen und zum letzten durch ihre Praxisnähe gegenüber bisher üblichen Regelsammlungen in geringerem Maße Akzeptanzprobleme beim Anwender zu verursachen scheinen. In Verbindung mit dem Klassifizierungsschema entsteht

eine strukturierte Wissenssammlung direkt aus betrieblichen Daten, die auch der Weiterentwicklung eines Unternehmens kontinuierlich folgt. Im Zusammenhang mit der Nutzung von Arbeitsplänen muß geprüft werden, ob zusätzliche Inhalte und Qualitäten in neuen Formen von Arbeitsplänen erforderlich sind, die neben den Entscheidungsergebnissen des Arbeitsplaners z.B. die Begründung und den Weg zu diesen Ergebnissen beinhalten. Die Bereitstellung rechnergestützter Werkzeuge zur Aufbereitung bestehender Arbeitspläne als auch zur Erstellung von neuen Arbeitsplänen durch die Informatik erscheint nutzbringend, nachdem die Anforderungen durch den Anwender definiert sind. In Zusammenhang mit einem inhaltlichen Job-Enrichment des Arbeitsplaners muß auch die Frage nach einer ausreichenden Qualifikation gestellt und beantwortet werden. Sie wurde innerhalb der Zielstellung des Projektes nicht behandelt, ebenso wie die Fragestellungen nach den organisatorischen Auswirkungen durch die Integration eines solchen Werkzeuges, z.B. durch das Entstehen neuer Funktionen (Pfege der Fallbasis).

6 Literatur

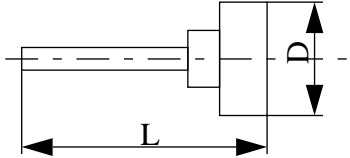
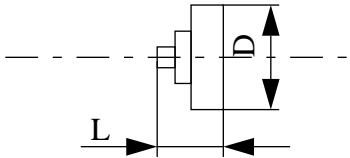
- [Alting89] Alting, L.; Zhang, H.:
Computer Aided Process Planning: The State-of-the-Art Survey.
In: International Journal of Production Research, vol. 27, no. 4, 1989.
- [Althoff u.a. 92] Althoff, K.-D.; Weiß, S.; Bartsch-Spörl, B.; Janetzko, D.; Maurer, F.;
Voß, A.:
Fallbasiertes Schließen in Expertensystemen: Welche Rolle spielen
Fälle für wissensbasierte Systeme ?
KI 4/92, S.14-21.
- [Currie/Tate89] Currie, K.; Tate, A.:
Using Domain Knowledge to Restrict Search in an AI Planner.
University of Edingburgh, AIAI-TR-70, 1989.
- [Eversheim89] Eversheim, W.:
Organisation in der Produktionstechnik, Band 3, Arbeitsvorbereitung,
2. Auflage.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- [Feller u.a. 88] Feller, H.; Jüttner, G.; Reiser, U.:
Wissensbasierte Systeme für die Arbeitsplanung. Vergleichsstudie
FAW Bericht B-8809-B, Ulm, 1988.
- [Dörner76] Dörner, D.:
Problemlösen als Informationsverarbeitung.
Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz: Kohlhammer, 1976.
- [Geitner91] Geitner, U.W.:
CIM-Handbuch, 2. Auflage.
Braunschweig: Vieweg, 1991.
- [Hammond89] Hammond, K. J.:
Case-Based Planning: Viewing Planing as a Memory Task.
Academic Press Inc., San Diego, 1989.
- [Ham88] Ham, I.:
Computer-Aided Process Planning: The Present and the Future.
In: Proceedings of the CIRP, Tokyo, 1988, S. 591-601.
- [Ham/Lu89] Ham, I.; Lu, S. C-Y.:
New Developments of CAPP in U.S.A. and Japan.
In: Proceedings of CIRP International Workshop on Computer Aided
Process Planning (CAPP), Hannover, 1989.
- [Hertzberg89] Hertzberg, J.:
Planen: Einführung in die Planerstellungsmethoden der Künstlichen
Intelligenz.
Mannheim, Wien, Zürich: BI-Wissenschaftsverlag, 1989.

- [Hook89] Hook, U.:
Erstellung eines Expertensystem-Prototypen zur Vorkalkulation der Werkzeugkosten bei der Bohrbearbeitung.
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation der Universität Kaiserslautern, 1989.
- [Humm u.a. 91] Humm, B.; Schulz, Ch.; Radtke, M.; Warnecke, G.:
A system for case-based process planning.
Computers in Industry, 17 (1991), S. 169-180.
- [Humm91] Humm, B.:
Entwicklung und Implementierung eines wissensbasierten Ähnlichkeitsmaßes für die fallbasierte Planung am Beispiel der Arbeitsplanung für die Teilefertigung.
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz der Universität Kaiserslautern, 1991.
- [Kluge84] Kluge, H.:
Systeme beurteilen und auswählen.
Industrieanzeiger 106 (1984), Nr. 41, S. 65-69.
- [Lutz67] Lutz, W.:
Entwicklung einer fertigungsbeschreibenden Systemordnung für das Drehen von Einzelteilen und Kleinserien.
Dissertation, TH Stuttgart, 1967.
- [Matsushima u.a. 82] Matsushima, K.; Okada, N.; Sata, T.:
The Integration of CAD and CAM by Application of Artificial Intelligence Techniques.
In: Annals of the CIRP, vol. 31, no. 1, 1982, S. 329-332.
- [Milberg92] Milberg, J. (Bd.-Hrsg.):
Von CAD/CAM zu CIM.
Reihe CIM-Fachmann, Bey, I. (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [Mitrofanov60] Mitrofanov, S.P.:
Wissenschaftliche Grundlage der Gruppentechnologie.
Berlin: VEB Verlag Technik, 1960.
- [Opitz66] Opitz, H.:
Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem.
Essen, Frankfurt/Main: W. Giradet, 1966.
- [Paulokat/Weß93] Paulokat, J.; Weß, S.:
Fallauswahl und fallbasierte Steuerung bei der nichtlinearen hierarchischen Planung.
In: Horz, A. (Hrsg.): Beiträge zum 7. Workshop Planen und Konfigurieren. Sankt Augustin: Arbeitspapiere der GMD 723, 1993.
- [Radtke/Schulz91] Radtke, M.; Schulz, C.:
HYPLAN - Ein hybrider Modellansatz für die Arbeitsplanung.

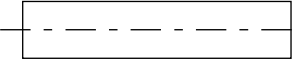
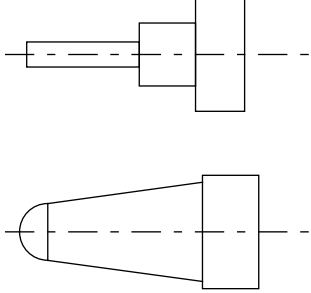
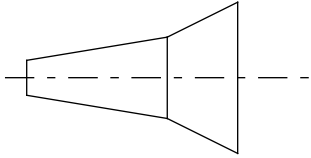
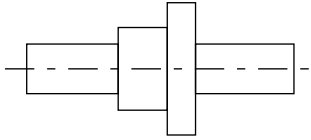
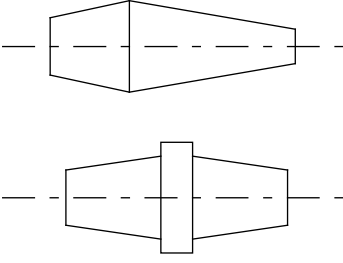
- In: Günter, A.; Cunis, R.: Beiträge zum 5. Workshop „Planen und Konfigurieren“. Universität Hamburg, Labor für Künstliche Intelligenz, LKI-M-1/91, 1991.
- [REFA74] REFA (Verband für Arbeitsstudien):
Methodenlehre der Planung und Steuerung. Teil 2: Planung.
1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1974.
- [Richter u.a. 93] Richter, M.M. u.a. :
Teilprojekt X9: Lernen und Analogie in technischen Expertensystemen.
In: Deussen, P. (Hrsg.): Arbeits- und Ergebnisbericht 1991-1993 des
SFB 314 „Künstliche Intelligenz - Wissensbasierte Systeme“.
- [Ruf91] Ruf, T.:
Featurebasierte Integration von CAD/CAM-Systemen.
Berlin: Springer, 1991.
- [Schulz88] Schulz, C.:
Wissensbasiertes Modul zur Maschinen- und Spannmittelauswahl bei
der Drehbearbeitung.
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorgani-
sation der Universität Kaiserslautern, 1988.
- [Schulz92] Schulz, C.:
Ein Referenzmodell für die Entwicklung wissensbasierter Systeme zur
Unterstützung der Arbeitsplanerstellung.
Kaiserslautern, Dissertation, 1992.
- [Stefik81] Stefik, M.:
Planning with Constraints (MOLGEN Part 1).
Artificial Intelligence 16 (1981), S. 111-140.
- [Wilkins88] Wilkins, D. E.:
Practical Planning: Extending the Classical AI Planning Paradigm.
Los Altos (CA): Morgan Kaufmann, 1988.
- [Zimmermann67] Zimmermann, D.:
ZAFO - Eine allgemeine Formenordnung für Werkstücke - Gestaltung,
Handhabung und Rationalisierungserfolg.
Stuttgart-Vaihingen: Günther Grossmann, 1967.

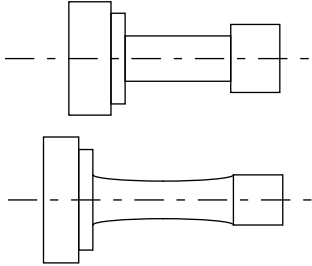
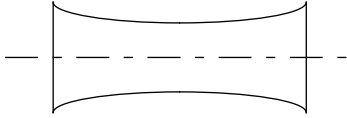
Anhang A: Kodierungstabellen

Kodierungstabelle für das Länge-Durchmesser-Verhältnis:

Kode	Beispiel(e)	Definition
1		Das Werkstück wird als Welle bezeichnet, wenn seine Länge zu seinem maximalen Durchmesser größer oder gleich 1,2 und kleiner als 6 ist.
2		Das Werkstück wird als Scheibe bezeichnet, wenn seine Länge zu seinem maximalen Durchmesser kleiner 1,2 ist.

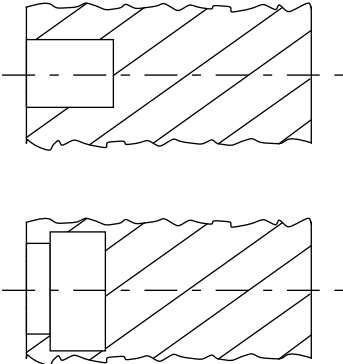
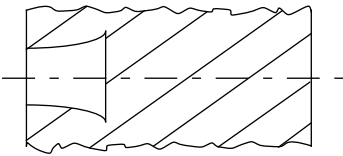
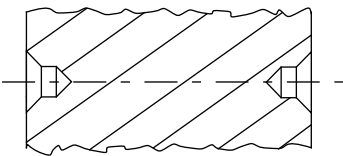
Kodierungstabelle für die äußere Grundform:

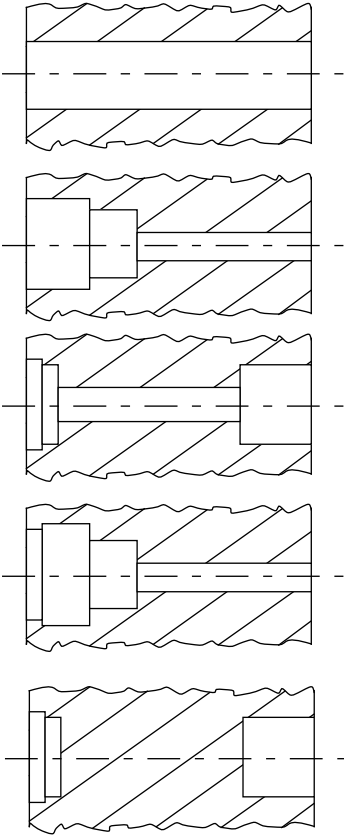
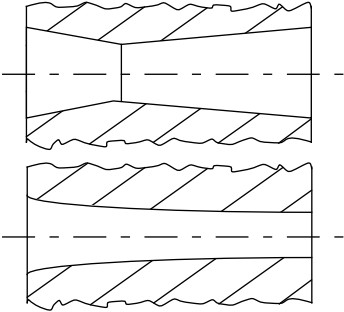
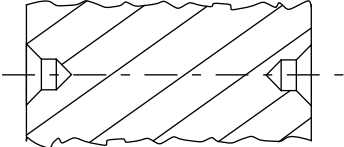
Kode	Beispiel(e)	Definition
1		Das Teil besitzt eine achsensymmetrische Außenkontur.
2		Das Teil ist einseitig steigend und besteht ausschließlich aus Stufen oder besitzt mindestens eine Stufe an einem Ende.
3		Das Teil ist einseitig steigend und besteht ausschließlich aus Freiformflächen (nicht zylindrischen Flächen) oder besitzt an keinem der beiden Enden eine Stufe (zylindrische Spannfläche).
4		Das Teil ist zur Mitte steigend und besteht ausschließlich aus Stufen oder besitzt mindestens eine Stufe an einem Ende.
5		Das Teil ist zur Mitte steigend und besteht ausschließlich aus Freiformflächen (nicht zylindrischen Flächen) oder besitzt an keinem der beiden Enden eine Stufe (zylindrische Spannfläche).

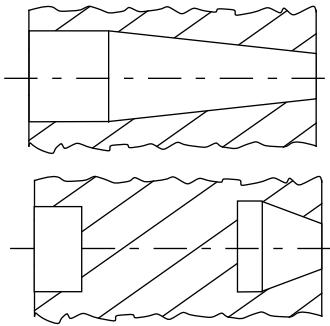
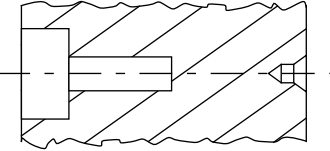
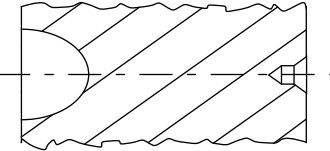
Kode	Beispiel(e)	Definition
6		Das Teil ist zur Mitte fallend und besteht ausschließlich aus Stufen oder besitzt mindestens eine Stufe an einem Ende.
7		Das Teil ist zur Mitte fallend und besteht ausschließlich aus Freiformflächen (nicht zylindrischen Flächen) oder besitzt an keinem der beiden Enden eine Stufe (zylindrische Spannfläche).

Kodierungstabelle für die innere Grundform

:

Kode	Beispiel(e)	Definition
0		Das Teil besitzt keine Innenkontur.
1		Das Werkstück besitzt an genau einer Stirnseite eine Innenkontur, die an einer Stirnseite eine Stufe hat.
2		Das Werkstück besitzt an genau einer Stirnseite eine Innenkontur, die an einer Stirnfläche eine Freiformfläche hat.
3		Das Werkstück besitzt an jeder seiner zwei Stirnseiten eine Zentrierbohrung.

Kode	Beispiel(e)	Definition
4		<p>Das Werkstück hat an jeder seiner Stirnseiten eine Eintrittsfläche für die Innenkontur. Dabei kann die Innenkontur durchgängig oder getrennt sein. Beide stirnseitigen Elemente sind Stufen.</p>
5		<p>Das Werkstück hat an jeder seiner Stirnseiten eine Eintrittsfläche für die Innenkontur. Dabei kann die Innenkontur durchgängig oder getrennt sein. Beide stirnseitigen Elemente sind Freiformflächen.</p>
6		<p>Das Werkstück besitzt an jeder seiner zwei Stirnseiten eine Zentrierbohrung.</p>

Kode	Beispiel(e)	Definition
7		<p>Das Werkstück hat an jeder seiner Stirnseiten eine Eintrittsfläche für die Innenkontur. Dabei kann die Innenkontur durchgängig oder getrennt sein. Ein stirnseitiges Element ist eine Stufe, das andere ist eine Freiformfläche.</p>
8		<p>Das Werkstück hat an jeder seiner Stirnseiten eine Eintrittsfläche für die Innenkontur. Dabei kann die Innenkontur durchgängig oder getrennt sein. Ein stirnseitiges Element ist eine Stufe, das andere ist eine Zentrierbohrung.</p>
9		<p>Das Werkstück hat an jeder seiner Stirnseiten eine Eintrittsfläche für die Innenkontur. Dabei kann die Innenkontur durchgängig oder getrennt sein. Ein stirnseitiges Element ist eine Freiformfläche, das andere ist eine Zentrierbohrung.</p>

Anhang B: Beispiel eines Lösungsteils des Klassifizierungsschemas

Klassifikation: 111

- Außenkontur achsparallel
- Innenkontur einseitig vorhanden
- L/D im Bereich 1,2 ... 6

Aufspannung:

- Anzahl geschätzt: zwei
- Spannsituation: einseitig
- Spannflächen: rechts und links am Rohteil sind zylindrische Spannflächen vorhanden
- Spannmittel: Futter (selbstzentrierend), Spannzange

Spann- und Bearbeitungsstrategie:

- Aufspannen auf der linken Werkstückseite mit Futter. Dabei sind alle Anforderung zu berücksichtigen, die vom verwendeten Spannmittel Futter an die Aufspannfläche (erforderliche Durchmesser, Zylindrizität, ...) gestellt werden.
- Plandrehen der rechten Stirnseite als erster Bearbeitungsschritt. Dabei wird eine ebene Bezugsfläche für alle axialen Innen- und Außenmaße des Werkstückes hergestellt.
- Innenbearbeitung gliedert sich im allgemeinen in die Arbeitsfolgen Anbohren, Vorbohren, Innendrehen oder Bohren, Kante zur Stirnseite entgraten, wobei die gesamte Innenbearbeitung nach dem Plandrehen erfolgt, um die Maße auf die plangedrehte Stirnfläche beziehen zu können.
- Längsdrehen der Mantelfläche, wobei diese Bearbeitung im allgemeinen nach der Planbearbeitung der Stirnfläche erfolgt, um eine ebene Bezugsfläche zu haben.
Der Längsdrehvorgang wird in zwei Anteile gegliedert: den Schruppvorgang, der die grobe Kontur erzeugt und daran anschließend der Schlichtvorgang, der die geforderten Maße, Toleranzen und Oberflächengüten erzeugt.
Das Längsdrehen könnte auch nach dem Plandrehen erfolgen, wenn keine axialen Maße einzuhalten sind.
Zwischen Längsbearbeitung und Innenbearbeitung ist im allgemeinen keine Zwangsreihenfolge (Sonderfälle, wie zu dünne Wandstärken ausgenommen) zu beachten.
- Entgraten, Fasen, Kantenbrechen, nachdem die beiden aneinandergrenzenden Flächen hergestellt sind. Es wird häufig versucht, das Werkzeug des letzten Arbeitsvorganges mitzubeneutzen. Eine entsprechende zeitliche Anordnung der Arbeitsgänge, die die angren-

zenden Flächen herstellen, sollte genutzt werden.

- Aufspannungswechsel, der ein Umdrehen des Drehwerkstückes erfordert, wenn das Roh-
teil ein Stück war. Hierbei ist zu beachten, daß das Werkstück mit der bearbeiteten Stirn-
fläche an einen definierten Anschlagpunkt am Spannmittel zur Anlage kommt, so daß
axiale Maße noch genau zu ermitteln sind. Es müssen die Anforderungen des Spanmit-
tels an die Aufspannfläche erfüllt werden.

Wird Stangenmaterial verwendet, so kann ein Aufspannungswechsel entweder ein defi-
niertes axiales Verschieben des Werkstückes auf einen Anschlag oder auch ein Umdrehen
bedeuten. Letzteres impliziert, daß das Werkstück vorher von der Stange abgetrennt
wurde.

Falls auf dem bearbeiteten Längsdrehbereich gespannt werden soll, muß dieser länger als
die erforderliche Einspannlänge sein.

- Plandrehen der zweiten Stirnseite. Voraussetzung ist, daß alle Arbeitsgänge der ersten
Aufspannung und das Umspannen korrekt abgeschlossen sind. Dies gilt nur unter der
Einschränkung, daß Stückrohnteile verwendet wurden.
- Längsbearbeitung der verbleibenden Mantelfläche.
- Entgraten, Fasen, Kantenbrechen unter gleichen Randbedingungen wie oben angeführt,
durchführen, nachdem die beiden aneinandergrenzenden Flächen hergestellt sind.




Annahmen:

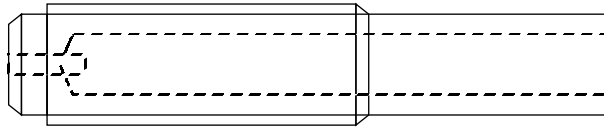
- Die Stückzahlen sollten gering sein, da die Fertigung durch das Umspannen aufwendig
ist. wird von der Stange gearbeitet mit der Voraussetzung, daß die Auspannlänge des
Gesamt-Werkstückes noch zulässig ist, so können von der Stange auch größerer Stück-
zahlen mit „relativ“ geringerem Pro-Stück-Aufwand hergestellt werden.
- Beide Stirnseiten sind zu bearbeiten.
- Die Längsbearbeitung soll über die gesamte axiale Länge durchgeführt werden. Das
bedeutet, daß ein Umspannen erforderlich ist, wobei die zweite Aufspannung auf einer
bereits bearbeiteten Fläche erfolgt, d.h. es sind weiche Spannbacken o.ä. zu verwenden.
Anforderungen, die vom verwendeten Spannmittel abhängen, sind zusätzlich zu berück-
sichtigen.
- Die Wandstärke im Bereich der Innen- und Längsbearbeitung ist nicht dünnwandig. Ist
das Werkstück in diesem axialen Bereich trotzdem als dünnwandig zu bezeichnen, dann
muß die Innenbearbeitung vor der Längsbearbeitung erfolgen und das Längsdrehwerk-
zeug sollte einen Einstellwinkel nahe 90° , um die Zerspankräfte quer zur Rotationsachse
gering zu halten.

Anhang C: Beispiel für einen aufbereiteten Arbeitsplan

Beschreibung der Fertigungsschritte und der Aufspannungstrategie

Die folgenden schematischen Darstellungen dienen der Verdeutlichung der Erklärung. Sie sind nicht nach den Regeln des technischen Zeichnens ausgeführt. Folgende Schattierungssymbolik wird vereinbart:

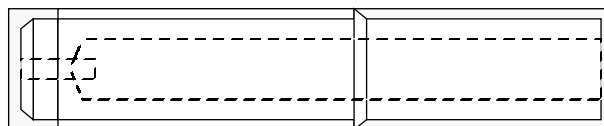
	bereits zerspannte Bereiche
	noch zu zerspannende Bereiche
	aktuelle Bereiche

Ausgangssituation:

Die Festlegung des Sollzustandes erfolgt durch den Konstrukteur. Der Sollzustand wird in Form der technischen Zeichnung dokumentiert und bildet eine Eingangsinformation zur Arbeitsplanungerstellung. Weitere Eingangsinformationen sind z.B. Stückzahlen und Fertigstellungstermine.

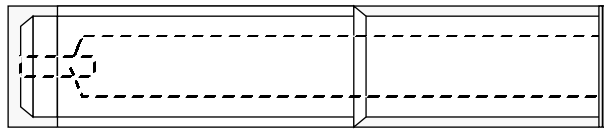
Grobanalyse der Konstruktionszeichnung des Werkstückes mit Bezug auf die geltenden Einschränkungen:

- Das Werkstück ist in seiner Hauptform rotationssymmetrisch, d.h. Anwendung des Fertigungsverfahrens Drehen ist erforderlich.
- Das Werkstück hat kein prismatisches Element. Dies würde die Wahl der Fertigungsverfahrens Fräsen bedingen.
- Das Werkstück erfordert Einsatzhärtung und Schwarzfärbung. Beide Fertigungsverfahren sind hier ausgegrenzt.
- Die Maße des Fertigeteiles sind Durchmesser 13 mm und Länge 75 mm.
- Der Werkstoff ist 9S Mn Pb 28 K.
- Das Werkstück hat ein Gewinde an einer Außenfläche.
- Das Werkstück hat eine durchgängige Stufenbohrung auf der Werkstückrotationsachse. Diese Stufenbohrung hat zu beiden Seiten recht unterschiedliche Durchmesser.
- Das Werkstück hat keine „großen“ Kontursteigungen (minimaler zu maximaler Durchmesser) in seiner Außenkontur. Die Außenkontur stellt sich „fast“ als Achsparallele dar.
- Spannende Bearbeitung von einigen Werkstückoberflächen ist erforderlich.

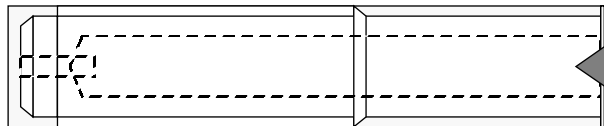
Rohteilauswahl:

Als Rohteil wurde Stangenmaterial mit Durchmesser 13 mm und aus dem Werkstoff 9S Mn Pb 28 K gewählt. Begründung:

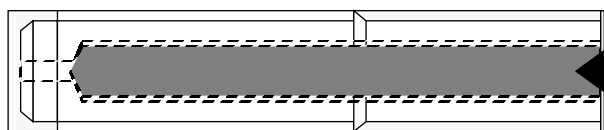
- Werkstoff kann direkt aus der Konstruktionszeichnung entnommen werden. 9S Mn Pb 28 K ist ein üblicher und gut zerspanbarer Automatenstahl.
- Hauptform rotationssymmetrisch, deshalb rundes Stangenmaterial.
- Maße des Fertigeteils Durchmesser 13 und Länge 75 mm. Der Außendurchmesser des Werkstückes ist identisch mit dem gewählten Stangendurchmesser.
- Stückzahl ist hoch, d.h. der Fertigungsprozeß soll schnell und möglichst automatisiert ablaufen.

Plandrehen:

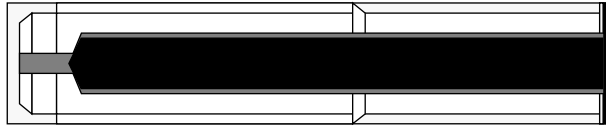
- Die rechte Stirnseite ist ein Plandrehbereich an einem Ende des Werkstückes.
- Die Bearbeitung der rechten Strinseite muß vor der linken Stirnseite erfolgen, weil zum ersten die Bohrung mit dem großen Durchmesser nur von rechts erfolgen kann und zum zweiten das linksseitige Gewinde in der letzten Ausspannung zu einem späteren Zeitpunkt günstiger zu fertigen ist. Mit der Herstellung des Gewindes verliert man eine Fläche zum Aufspannen.
- Dieser Bearbeitungsschritt ist als Erster auszuführen, denn es wird eine definierte Fläche am rechten Werkstückende erzeugt. Diese kann als Bezugsfläche für einige Fertigmaße des Werkstückes dienen.
- Interaktionen zu anderen Fertigungsschritten sind nicht vorhanden.

Anbohren:

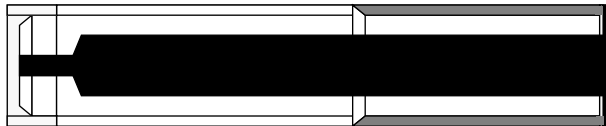
- Das Anbohren ist immer der erste Fertigungsschritt zum Herstellen von Bohrungen, die genau an einem spezifizierten Ort innerhalb des Werkstückes plaziert sein müssen.
- Das Anbohrwerkzeug selbst ist spitzer, kürzer und dicker als sonst übliche Bohrer, so daß die Bohrung nicht „verläuft“.
- Bei nachfolgendem Vorbohren wird der Bohrer innerhalb des Anbohrkegels plaziert, so daß er nicht seitlich ausweichen kann.

Vorbohren:

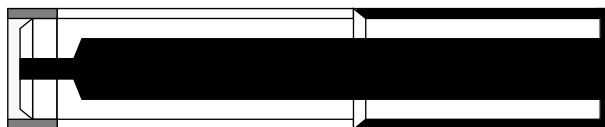
- Der Vorgang des Vorbohrens läuft oszillierend ab, d.h. der Spiralbohrer dringt eine bestimmte Tiefe in das Werkstück hinein und wird dann wieder zurückgezogen, die Späne werden dadurch abtransportiert. Das geschieht solange, bis das angestrebte Maß erreicht ist.
- Bei einer Bohrung dieses Durchmessers und dem geforderten Mittenrauhwert $Ra = 3.2$ ist das Vorbohren erforderlich, da bei direktem Fertigbohren zuviele Späne abtransportiert werden müssen, die die Oberfläche beschädigen würden. Ein Mittenrauhwert $Ra = 3.2$ wäre nicht einzuhalten.
- Insbesondere bei großen Bohrungen kann die Maschinenleistung nicht ausreichend sein zum direkten Fertigbohren.
- Der Vorgang des Vorbohrens erfolgt im Anschluß an den Vorgang des Anbohrens. Sind Bohrmuster zu bearbeiten, so wird das Muster im allgemeinen komplett angebohrt, ehe das vorbohren oder andere Fertigungsschritte erfolgen.

Fertigbohren:

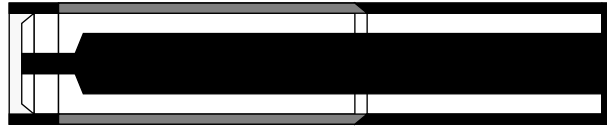
- Das Fertigbohren der Stufenbohrung erfolgt in der Regel direkt im Anschluß an das Vorbohren. Das vorgebohrte Loch übernimmt die genaue Führung des Bohrwerkzeuges.
- Die Geometrie der ersten und zweiten Bohrungsstufe, nämlich Durchmesser 3 mm für erste Stufe und Durchmesser 8,7 mm für zweite Stufe, wird mit Hilfe eines Spezialwerkzeuges Stufenbohrer abformend erzeugt.
- Durch das Spezialwerkzeug wird ein Werkzeug und damit auch ein Arbeitsgang gegenüber „normaler“ Herstellung der Stufenbohrung eingespart. Ein Verändern der Spannlage, wie bei „normaler“ Herstellung dieser Bohrung (linksseitig und rechtsseitig einbohren), wird auch nicht erforderlich.
- Der geforderte Mittenrauhwert $Ra = 3,2$ kann erreicht werden, da nur mit geringer Spanabnahme gebohrt wird..

Längsdrehen:

- Die folgenden Fertigungsschritte dienen dem Ziel der Fertigbearbeitung der Außenkontur.
- Erster Schritt hierzu ist die Zerspanung des Längsdrehbereiches auf der rechten Seite des Werkstückes, weil dieser Bereich am weitesten vom Hauptspannmittel entfernt ist.
- Es wird kein Nebenspannmittel auf der rechten Seite des teilbearbeiteten Werkstückes verwendet, da die Verbiegung des Werkstückes unter den Zerpankräften beim Längsdrehen als gering einzustufen ist. Hinweise auf diese Abschätzung sind gegeben durch kleine vorhandene Auspannlänge und ausreichenden Querschnitt des Werkstückes.

Einstechen:

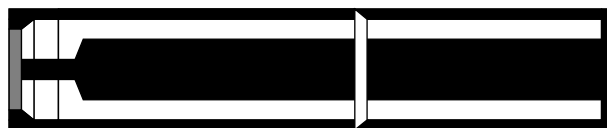
- Vor dem Einstechen ist ein Aufspannungswechsel erforderlich.
- Kann vor der Bearbeitung des Gewindes erfolgen, weil durch den Einstechschritt der linke Gewindeauslauf vorbereitet wird. Wenn zuerst das Gewinde gefertigt wird, dann könnte der Gewindeauslauf (letzten ein oder zwei Gewindgänge) durch das nachfolgende Einstechen beschädigt werden, und die Funktion der Stellschraube wäre beeinträchtigt, da sie sich nicht über die volle Gewindelänge in ein Bohrloch einschrauben ließe.
- Der Fertigungsschritt Einstechen ist durchaus üblich, um einen kurzen linksliegenden Längsdrehbereich ohne hohe Oberflächengüte zu bearbeiten. Unüblich wäre hier ein rechter Längsdrehmeißel, dessen Verwendung zusätzlich die Gefahr der Kollision mit dem Spannmittel hätte.
- Der Einstechvorgang bereitet hier auch das Abstechen vor.
- Es wird das Fertigen ohne Verändern der Spannlage möglich, was Zeiten und Kosten reduziert.
- Einstechen muß nach dem Längsdrehen erfolgen, da dieser Bearbeitungsschritt eine Schwächung des tragenden Querschnittes in der Nähe des Spannmittels bedeutet.

Gewindestrehlen:

- Anwendung des Fertigungsverfahrens Gewindestrehlen, um das Gewinde sauberer zu bearbeiten als dies mit Gewindedrehen der Fall wäre.
- Eine Zerspanung der Zylinderfläche auf Außendurchmesser des Gewindes ist nicht erforderlich, da diese Fläche des Rohteil diesen Durchmesser hat. Durch die geschickte Wahl des Rohteiles konnte ein Fertigungsschritt eingespart werden.
- Das Gewindestrehlen erfolgt nach der Herstellung der rechts und links angrenzenden Bearbeitungsbe-
reiche.
- Das Gewindestrehlen muß vor einer weiteren Verkleinerung des Materialzusammenhaltes an der linken
Seite des Werkstückes erfolgen.

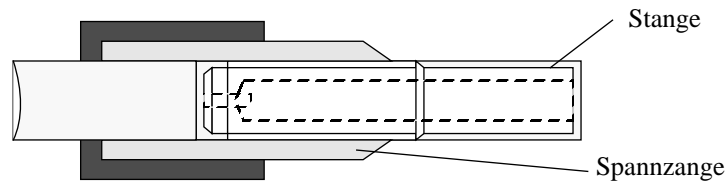
Fasen:

- Dieser Fertigungsschritt dient der Herstellung von noch verbliebener Geometrie.
- Fasen am linken Werkstückende muß unmittelbar vor dem Abstechen erfolgen, da sonst eine zu starke
Schwächung des tragenden Querschnittes in der Nähe des Spannmittels die Folge wäre. Damit folgt
auch, daß dieser Fertigungsschritt nach den vorgehend beschriebenen erfolgen muß.

Abstechen:

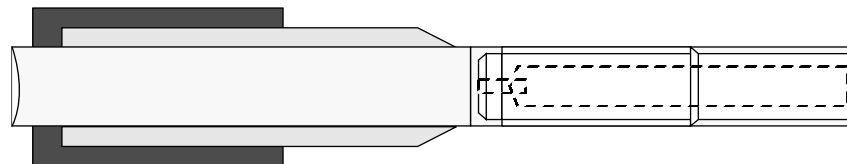
- Standardarbeitsgang zum Abtrennen eines Werkstückes, wenn ausgehend von Stangenmaterial gearbei-
tet wird.
- Dieser Arbeitsgang schließt hier den spanenden Teil der Herstellung des Werkstückes ab und ist folglich
der letzte betrachtete Arbeitsgang.

Aufspannung 1:



- Aus den Bearbeitungsbereichen geht hervor, daß Außen-, Innen- und Seitenbearbeitungen durchgeführt werden müssen.
- Stufenbohrung kann nur in der Spannlage wie oben dargestellt (Aufspannung 1) bearbeitet werden.
- Wegen großer Tiefe der Bohrung, darf die Auskraglänge nicht groß sein, sonst ist die Verbiegung des Werkstückes unter den Zerspankräften zu groß.
- Innerhalb dieser Aufspannung werden durchgeführt:
 - Planearbeitung der rechten Stirnseite
 - Anbohren
 - Vorbohren
 - Fertigbohren
 - Längsdrehen

Aufspannung 2:



- Restliche Bearbeitungsstellen müssen für Werkzeuge zugänglich sein.
- Das Werkstück wird automatisch zu einem Anschlag vorgeschoben, so daß die rechte Stirnseite wieder Bezugsfläche für die Werkstückmaße ist.
- Durch die zweite Aufspannung können bei kleiner Auskraglänge das Gewinde und die Fase bearbeitet und das Abtrennen des Werkstückes vorgenommen werden. Die verbliebenen Bearbeitungsstellen sind also für Werkzeuge zugänglich.
- Innerhalb dieser Aufspannung werden folgende Bearbeitungen durchgeführt:
 - Einstechen
 - Gewindestrehlen
 - Fasen
 - Abstechen.