

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)  
der Technischen Universität München

**Methodik zur Strukturierung von  
Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung**

**Michael Franzkowiak**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, KIT Karlsruhe

Die Dissertation wurde am 16.12.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.07.2014 angenommen.



## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Geleitwort der Herausgeber .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Begriffsdefinitionen .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Lohnfertigung .....	1
1.2 Problem- und Aufgabenstellung .....	4
1.3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs .....	5
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	7
<b>2 Stand der Erkenntnisse und Problemformulierung.....</b>	<b>9</b>
2.1 Allgemeines .....	9
2.2 Grundlagen.....	9
2.2.1 Ziele und Aufgaben des Vorrichtungseinsatzes.....	9
2.2.2 Bauweisen und Einsatzgebiete von Vorrichtungen.....	12
2.2.3 Planung und Konstruktion von Vorrichtungen .....	14
2.3 Rationalisierungsmaßnahmen im Vorrichtungswesen.....	17
2.3.1 Überblick.....	17
2.3.2 Bauteilauslegung und Werkstückstandardisierung .....	18
2.3.3 Rechnerunterstützte Arbeitsplanung .....	19
2.3.4 Vorrichtungsstandardisierung .....	22
2.3.5 Variantenkonstruktion .....	23

2.3.6	Rechnerunterstützte Vorrichtungskonstruktion.....	24
2.3.7	Wiederverwendung von Vorrichtungen.....	28
2.3.7.1	Klassifikation wiederverwendbarer Vorrichtungen.....	28
2.3.7.2	Rekonfigurierbare Vorrichtungen.....	29
2.3.7.3	Flexible Komponenten und Vorrichtungen.....	31
2.3.7.4	Planung wiederverwendbarer Vorrichtungen.....	34
2.4	Problemformulierung und Zielstellung.....	37
2.4.1	Allgemeines.....	37
2.4.2	Zusammenfassung der Erkenntnisse und Problemformulierung....	37
2.4.3	Zielstellung.....	39
2.4.4	Lösungsvorgehen.....	40
<b>3</b>	<b>Anforderungen an die Methodik.....</b>	<b>43</b>
3.1	Allgemeines.....	43
3.2	Lohnfertigung.....	43
3.3	Produktionsmittel.....	44
3.4	Arbeitsplanung.....	45
3.5	Zusammenfassung der Anforderungen.....	46
<b>4</b>	<b>Konzeption der Methodik.....</b>	<b>47</b>
4.1	Allgemeines.....	47
4.2	Entwurf der Methodik.....	47
4.3	Entscheidungsvorgehen.....	51
4.3.1	Überblick.....	51
4.3.2	Charakterisierung der Entscheidungssituation.....	51
4.3.3	Synthese und Bewertung von Entscheidungskonzepten.....	53

---

4.3.4	Konzept des Entscheidungsverfahrens.....	55
4.4	Gruppenanalyse.....	57
4.4.1	Überblick.....	57
4.4.2	Randbedingungen und Anforderungen der Gruppenanalyse.....	57
4.4.3	Synthese und Bewertung von Gruppierungsverfahren.....	59
4.4.3.1	Überblick .....	59
4.4.3.2	Clusteranalytische Verfahren .....	61
4.4.3.3	Künstliche Neuronale Netze.....	64
4.4.3.4	Expertensysteme .....	66
4.4.4	Konzept zur Gruppierung von Spannaufgaben.....	67
4.5	Prognose von Fertigungsaufträgen.....	69
4.5.1	Überblick.....	69
4.5.2	Charakterisierung des Prognoseproblems.....	69
4.5.3	Synthese und Bewertung von Prognoseverfahren.....	71
4.5.4	Prognosekonzept.....	73
4.6	Informationsmodell .....	74
4.6.1	Überblick.....	74
4.6.2	Randbedingungen und Anforderungen des Informationsmodells .	75
4.6.3	Strukturierung des Informationsmodells .....	77
4.6.3.1	Beschreibung von Informationsmodellen .....	77
4.6.3.2	Objektstruktur .....	78
4.6.3.3	Beschreibung der Spanngeometrie .....	80
4.6.4	Konzept des Informationsmodells.....	82
4.7	Datenbeschaffung.....	83

4.7.1 Überblick .....	83
4.7.2 Randbedingungen und Anforderungen der Datenbeschaffung .....	84
4.7.3 Synthese und Bewertung von Datenbeschaffungsverfahren.....	84
4.7.4 Konzept der Datenbeschaffung.....	86
4.8 Konzept der Methodik .....	88
<b>5 Detaillierung der Methodik .....</b>	<b>93</b>
5.1 Allgemeines.....	93
5.2 Spezifikation des Informationsmodells .....	93
5.2.1 Überblick .....	93
5.2.2 Repräsentation des Fertigungsauftrags .....	93
5.2.3 Repräsentation der Spannaufgabe.....	94
5.2.4 Repräsentation der Werkstückanforderungen .....	95
5.2.4.1 Überblick.....	95
5.2.4.2 Spannmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke.	97
5.2.4.3 Weitere Spannmodelle.....	98
5.2.5 Repräsentation der Anforderungen des Bearbeitungskomplexes...	99
5.3 Auftragspezifischer Planungsablauf im Überblick.....	100
5.4 Datenbeschaffung .....	102
5.4.1 Überblick .....	102
5.4.2 Datenübernahme aus der konventionellen Vorrichtungsplanung	102
5.4.3 Erzeugung geometriebeschreibender Daten.....	103
5.5 Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben .....	104
5.5.1 Überblick .....	104
5.5.2 Datenaufbereitung.....	104

---

5.5.2.1	Sicherstellung der mathematischen Vergleichbarkeit ....	104
5.5.2.2	Sicherstellung der Gruppierungsqualität.....	105
5.5.3	Distanzberechnung .....	109
5.5.4	Clusterbildung .....	110
5.5.5	Analyse und Aufbereitung des Gruppierungsergebnisses .....	113
5.6	Ermittlung planungsrelevanter Spannaufgaben.....	114
5.6.1	Überblick.....	114
5.6.2	Expertengestützte Prognose einzelner Aufträge .....	115
5.6.3	Prognose einer Auftragsgruppe .....	115
5.6.4	Prognosegüte .....	117
5.6.5	Aufbereitung der Umweltentwicklung .....	118
5.7	Vorrichtungsplanung.....	119
5.7.1	Überblick.....	119
5.7.2	Bestimmung der Entscheidungsalternativen.....	119
5.7.2.1	Vorgehen .....	119
5.7.2.2	Analyse des Status quo.....	121
5.7.2.3	Optimierungspotential neuer Einzelvorrichtungen.....	122
5.7.2.4	Optimierungspotential neuer Gruppenvorrichtungen .....	124
5.7.2.5	Erstellung des Aktionsbaums .....	128
5.7.3	Bestimmung der Vorrichtungsart .....	130
5.8	Weiteres Vorgehen in der Vorrichtungsbeschaffung.....	136
<b>6</b>	<b>Umsetzung und Bewertung der Methodik.....</b>	<b>137</b>
6.1	Allgemeines .....	137
6.2	Informationstechnische Umsetzung .....	137

6.3 Technische Bewertung.....	141
6.4 Wirtschaftliche Bewertung .....	143
6.5 Fazit .....	147
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>149</b>
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>169</b>
9.1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	169
9.2 EXPRESS-G.....	170
9.3 Extraktion von Merkmalsausprägungen aus einer STEP-Datei .....	171
9.4 Clusteranalyse zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben.....	179
9.5 Fusionierungsalgorithmen der Clusteranalyse.....	181
9.6 Untersuchtes Teilespektrum.....	183
9.7 Analyseblatt für die Vorrichtungsplanung.....	187
9.8 Verzeichnis verwendeter Softwareprodukte .....	188

---

## Abkürzungsverzeichnis

In diesem Verzeichnis werden alle in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen erklärt, die nicht im DUDEN (2009) aufgeführt sind.

Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
BkS	Baukastensystem
BkV	Baukastenvorrichtung
CAD	Computer-Aided Design
CAFD	Computer-Aided Fixture Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAPP	Computer-Aided Process Planning
f.	folgende (Seite)
ff.	folgende (Seiten)
flV	flexible Vorrichtung
i. d. R.	in der Regel
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KNN	Künstliches Neuronales Netz
S.	Seite
SpV	Spezialvorrichtung
Std.	Stunde
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
StV	Standardvorrichtung
TAVG	Teilarbeitsvorgang
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.



---

## Formelverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
$A$	-	Konstante der Transformationsformel für Fusionsalgorithmen
$B$	-	Konstante der Transformationsformel für Fusionsalgorithmen
$b_{SpA}$	-	Faktor zur anteiligen Verrechnung der Beschaffungs- und Betriebskosten einer Vorrichtung auf die entscheidungsrelevanten Spannaufgaben
$B_V$	-	Bezugswert zur anteiligen Verrechnung von Beschaffungs- und Betriebskosten einer Vorrichtung
$BsK$	€	Beschaffungskosten
$BtK$	€	Betriebskosten
$d_{k,l}$	-	Distanz der Objekte $k$ und $l$
$D(R,P)$	-	Distanz zwischen zwei Clustern $R$ und $P$
$E$	-	Konstante der Transformationsformel für Fusionsalgorithmen
$EK$	€	Einsatzkosten
$G$	-	Konstante der Transformationsformel für Fusionsalgorithmen
$g_j$	-	Gewichtungsfaktor des Merkmals $j$
$g_{j,h}$	-	Gewichtungsfaktor des Merkmals $j$ auf Hierarchiestufe $h$
$h$		Hierarchiestufe der Merkmalgewichtung (Index)
$HK_{V,SpA}$	€	vorrichtungsinduzierte Herstellkosten einer Vorrichtung zur Erfüllung einer oder mehrerer Spannaufgaben
$HK_{V,SpA,r}$	€	vorrichtungsinduzierte Herstellkosten einer Vorrichtung zur Erfüllung einer oder mehrerer Spannaufgaben mit Berücksichtigung des Ausfallrisikos der jeweiligen Fertigungsaufträge
$K_{AH}$	€Std.	Arbeitsstundensatz

$N_h$	-	Anzahl gleicher Objekte einer Merkmalsgruppe des Merkmalsbaums
$N_{SpA}$	-	Stückzahlen eines Fertigungsauftrags bzw. der entsprechenden Spannaufgabe(n)
$N_{V,BtD}$	-	Stückzahlen einer Vorrichtung, veranschlagt für die gesamte Betriebsdauer
$R$	-	Minkowski-Konstante
$r_{SpA}$	%	Ausfallrisiko eines Fertigungsauftrags bzw. der entsprechenden Spannaufgabe(n)
$SpA$		Spannaufgabe (Index)
$T_N$	Std.	Maschinennutzungszeit
$x_j$	-	Wert des Merkmals $j$
$x_{j,g}$	-	gewichteter Wert des Merkmals $j$
$x_{kj}$	-	Wert des Merkmals $j$ bei Objekt $k$

---

## Begriffsdefinitionen

In diesem Verzeichnis werden allgemeine und untersuchungsspezifische Begriffe in alphabetischer Reihenfolge erläutert. Hier definierte Begriffe sind jeweils fett gedruckt.

### **Attribut**, auch Objektattribut

Eigenschaft eines durch ein Informations- bzw. Datenmodell abgebildeten Objekts, siehe auch **Merkmal** (ZAHN 1999, S. 41);

### **Ausführungsart**

Siehe **Vorrichtungsart**

### **Grenzdistanz**

Fusionierungsdistanz einer Clusteranalyse, bis zu der die **Spannaufgaben** des planungsrelevanten Clusters von einer integriert ausgeführten **Vorrichtung** erfüllt werden können;

### **Instanziierung**

Zuweisung eines objektbezogenen Wertes an ein **Attribut** eines Informationsmodells (ZAHN 1999, S. 40);

### **Lohnfertigung**

Auftragsfertigung von Teilen und/oder Komponenten für Endprodukthersteller oder deren System- und Modullieferanten durch einen Lieferanten ohne Verantwortung für die Entwicklung der Teile oder Komponenten;

### **Merkmal**, auch Objektmerkmal

Eigenschaft, die zum Beschreiben und Unterscheiden von Objekten dient (DIN 4002-2), im Rahmen dieser Arbeit v. a. im Zusammenhang mit der Gruppenanalyse von Objekten verwendet (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 490 ff.), siehe auch **Attribut**;

### **Spannaufgabe**

Anforderungen eines **Teilarbeitsvorgangs** an die Funktionen einer einzusetzenden **Vorrichtung**;

### **Spannplan, Spanngeometrie**

Geometrische Anordnung der Bestimm- und Spannungspunkte zur Erfüllung einer **Spannaufgabe**, ggf. unter Mitberücksichtigung der Stützpunkte;

### **Spannvorrichtung**

Siehe **Vorrichtung**

### **Teilarbeitsvorgang (TAVG)**

Bearbeitungsoperationen, die in einer Spann- lage des Werkstücks durchzuführen sind (MUTHSAM 2001), vgl. auch Unterarbeitsvorgang (SCHULZ 1993);

### **Umweltentwicklung**

Entwicklung des **Umweltzustands** an Zeitpunkten späterer Entscheidungen (LAUX 2007, S. 283);

### **Umweltzustand**

Gesamtheit der entscheidungsrelevanten Informationen zum Zeitpunkt der Entscheidung, die vom Entscheider nicht beeinflussbar sind, aber die Konsequenzen der Entscheidungsalternativen beeinflussen (LAUX 2007, S. 22);

### **Vorrichtung**

Betriebsmittel, mit dem Werkstücke in einer bestimmten Lage zum Werkzeug gerichtet bewegt, positioniert und fixiert werden (DIN 6300);

### **Vorrichtungsart**

Art der baulichen Ausführung der Vorrichtungsstruktur und -funktionsträger (VDI 1992, S. 7), beispielsweise Standard-, Spezial-, Baukasten- oder flexible **Vorrichtung**;

### **Vorrichtungsinduzierte Kosten**

Direkt durch eine **Vorrichtung** oder indirekt durch den Vorrichtungseinsatz und seinen Einfluss auf den Fertigungsablauf verursachte Kosten, d. h. Beschaffungskosten, Betriebskosten, Einsatzkosten und Fertigungsablaufkosten einer **Vorrichtung**;

### **Vorrichtungssystem**

Gesamtheit aller **Vorrichtungen** für ein Produktionssystem bzw. eine Fertigungsanlage;

# 1 Einleitung

## 1.1 Lohnfertigung

Angesichts der Globalisierung von Absatz- und Beschaffungsmärkten sowie stark differenzierter Konsumentenbedürfnisse stehen produzierende Unternehmen vor der Herausforderung, standortbedingte Kosten- und Know-how-Vorteile global auszuschöpfen, um kundenindividuelle Produkte mit hoher Qualität und zu günstigen Preisen anbieten zu können (VDI 2012; HOFBAUER ET AL. 2009, S. 4). Entwicklungs- und *Produktionsnetzwerke* stellen laut ZAHN (2011, S. 11) häufig die vorteilhafteste strategische Option dar, um in diesem Marktumfeld Wettbewerbsvorteile durch Kosteneffizienz und einen flexiblen Zugang zu externen Ressourcen und neuen Märkten zu erlangen. Dem folgend sind wandlungsfähige Unternehmen entstanden, an deren verteilter und vernetzter Produktentstehung eine Vielzahl an *Zulieferern* beteiligt ist (WESTKÄMPER 2006, S. 20 ff.; REINHART & ABELE 2011, S. 121 ff.).

Bei der Einbindung ihrer Zulieferer verfolgen produzierende Unternehmen verschiedene *Beschaffungsstrategien* (HEIMBROCK 2001, S. 218 ff.). Unter *Out-* und *Insourcing* wird eine Konzentration auf Kernkompetenzen verstanden, die sich meist auf die Produktgestaltung, die Montage und den produktbegleitenden Service bezieht (WESTKÄMPER 2005, S. 21). Die damit einhergehende Justierung der Fertigungstiefe ist die wirksamste Maßnahme zur Optimierung der Produktivität (LAY ET AL. 2009). Sie wird laut VDI (2012, S. 16) in Deutschland auch zukünftig zu einer Reduzierung der Wertschöpfungstiefe führen. Durch die Auslagerung der Teile- und Komponentenfertigung an spezialisierte Zulieferer können externe Leistungsvorteile genutzt, interne Kostenstrukturen flexibilisiert und die interne Komplexität reduziert werden (HEIMBROCK 2001, S. 57). *Local Sourcing* beschreibt in diesem Zusammenhang die Einkaufstätigkeit auf regionalen Beschaffungsmärkten. Dies birgt zwar ein kleineres Risiko, weist aber auch ein geringeres Rationalisierungspotential im Vergleich zum *Global Sourcing* auf, das weltweit auf den unternehmensspezifisch günstigsten Beschaffungsmärkten agiert (WILDEMANN 2009, S. 14 ff.).

Das *Multiple Sourcing*, von WILDEMANN (2008, S. 214) auch als traditionelle Art der Zusammenarbeit bezeichnet, zielt v. a. bei der Teilebeschaffung darauf ab, durch kurzfristige Lieferbeziehungen den Wettbewerbsdruck auf austauschbare Zulieferer zu erhöhen und Einkaufspreise zu reduzieren. Das *Single Sourcing* setzt dagegen auf eine langfristige, partnerschaftliche Zusammenarbeit mit Zulie-

ferern, von denen vollständige Module oder Systeme bezogen werden. Damit reagieren die Hersteller auf die steigende Variantenvielfalt und Komplexität ihrer Produkte und etablieren mit steigender Wertschöpfungsauslagerung Zulieferpyramiden, in denen die Beschaffung von Baugruppen, Komponenten und Teilen überwiegend an Modul- und Systemlieferanten ausgelagert ist (HOFBAUER ET AL. 2009, S. 28 f.).

Eine gängige Typologisierung von Lieferanten der produzierenden Industrie auf Basis ihrer technologischen Kompetenz und ihres Leistungsumfangs zeigt Tabelle 1. Teilefertiger und Produktionsspezialisten grenzen sich von Entwicklungs- und Wertschöpfungspartnern dahingehend ab, dass sie über wenig Produkt-Know-how verfügen und in den Entwicklungsprozess des Abnehmers nicht oder erst sehr spät eingebunden werden (VOEGELE 1997, S. 103). Sie werden in dieser Arbeit zusammenfassend als *Lohnfertiger* bezeichnet, sofern sie keine oder nur zu einem geringen Anteil eigene Produkte herstellen.

Kompetenz \ Leistungsumfang	Durch Abnehmer vordefinierte Produkte und Verfahren	System- und Problemlösungskapazität
Produktions-Know-how	Teilefertiger	Produktionsspezialist
	Lohnfertiger	
Produktions- und Produkt-Know-how	Entwicklungspartner	Wertschöpfungspartner

*Tabelle 1: Abnehmer-Lieferanten-Beziehungen nach WILDEMANN (2008, S. 217)*

*Teilefertiger* produzieren vom Abnehmer entwickelte, eher einfache und standardisierte Erzeugnisse, die kurzfristig und flexibel durch den Hersteller bezogen werden (VDA 4961). Aufgrund niedriger technologischer Eintrittsbarrieren in diesen zunehmend globalisierten Markt und einer hauptsächlich preisorientierten Lieferantenauswahl müssen Teilefertiger laut WILDEMANN (2008, S. 218) konsequent die Position der Kostenführerschaft anstreben. Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit nennt er als Grundvoraussetzungen eine hohe Produktivität unter Einhaltung der Qualitätsstandards sowie eine hohe Flexibilität angesichts der stark schwankenden Nachfrage seitens der Hersteller.

*Produktionsspezialisten* unterscheiden sich vom Teilefertiger durch ihre Fähigkeit zur teilespezifischen Prozessinnovation, durch die sie temporär Monopolstellungen einnehmen können. Da sie ihren Abnehmern den Zugang zu Know-how und neuen Technologien verschaffen, besteht das Risiko, in späteren Produktle-

bensphasen durch günstiger produzierende Teilefertiger ersetzt zu werden (WILDEMANN 2008, S. 219). Dieses Substitutionsrisiko zwingt den Produktionsspezialisten zur stetigen Innovation im Bereich der Fertigungstechnologien und -mittel, um Zulieferleistungen auf höchstem technischem Niveau anbieten zu können.

Die Geschäftsmodelle von Teilefertigern und Produktionsspezialisten als Lohnfertiger führen zu *volatilen Produktionsprogrammen* mit *heterogenen Fertigungsaufträgen* (SCHMIDT 2007). Diese weisen eine hohe Varianz in Werkstückgeometrien und Bearbeitungsaufgaben auf und bestehen aus vielen Einzel- und Kleinserien sowie wenigen Großserien (WILDEMANN 1996, S. 11), deren Losgrößen tendenziell sinken und bei langfristigen Rahmenverträgen erheblich schwanken können (MÜCKE 2005). Solche Produktionsprogramme erfordern hochflexible Produktionsstrukturen, wie sie v. a. die Werkstattfertigung, aber auch rekonfigurierbare Fertigungszellen bieten (KLUßMANN 2009, S. 10; YOUNG & FATHIANATHAN 2009). Diese Strukturen sind unabhängig von unterschiedlichen Arbeitsablauf- und Verfahrensfolgen, weisen aber eine geringere Produktivität im Vergleich zu Linien- und Reihenstrukturen auf (KIENER ET AL. 2006, S. 72). So erzielen Unternehmen der verarbeitenden Industrie mit Einzel- und Kleinserienfertigung bzw. einer vom Kundenauftrag abhängigen Fertigung im Vergleich zum Branchendurchschnitt eine substantiell geringere Produktivität (LAY ET AL. 2009, S. 8). Dies ist u. a. auf lange Rüst- und Nebenzeiten, einen geringen Nutzungsgrad einer hohen Zahl an Betriebsmitteln, einen hohen Personalbedarf, hohen Ausschuss und eine aufwändige Qualitätssicherung zurückzuführen.

Die Rationalisierungs- und Innovationspotentiale für Teilefertiger und Produktionsspezialisten liegen daher v. a. im Anlagenbau, in der Handhabungstechnik und in der Vorrichtung- und Werkzeugkonstruktion (WILDEMANN 2008, S. 219). In diesem Umfeld bietet neben der Komplettbearbeitung auf Bearbeitungszentren mit fünf oder mehr Achsen besonders die *Kombinationsbearbeitung auf Mehrtechnologiemaschinen* ein hohes Potential zur Produktivitätssteigerung (SCHUH ET AL. 2009; REINHART & ABELE 2011, S. 94). Mehrtechnologiemaschinen vereinen unterschiedliche Fertigungsverfahren in sich und sind daher besonders geeignet, um auch bei kleinen Stückzahlen komplexe Teile mit hoher Qualität wirtschaftlich herzustellen (LÜTJENS 2008; MORIWAKI 2008). Sie werden unterschieden in flexible Mehrtechnologiemaschinen, deren Multifunktionalität fest in der Anlage integriert ist (ZÄH & FRANZKOWIAK 2006; LANDERS ET AL. 2006; REINHART ET AL. 2007; SCHOLZ-REITER ET AL. 2008; SCHUH ET AL. 2009), und rekonfigurierbare Mehrtechnologiemaschinen, die aufwandsarm umgebaut und

an verschiedene Fertigungsaufgaben angepasst werden können (KOREN ET AL. 1999; WÖRN & BAUER 2006; WEGENER ET AL. 2008).

Auf beiden Arten von Mehrtechnologiemaschinen können durchgängige Prozessketten in einer Aufspannung realisiert werden, die sich in Produktivitätssteigerungen gegenüber Einzweckmaschinen von bis zu 70% auswirken (MÜCKE 2005). Die entscheidende Rolle innerhalb einer durchgängigen Prozesskette nehmen die Handhabungs- und Spannvorrichtungen als Bindeglied zwischen Maschine, Werkzeug und Werkstück ein (SCHERRER & LAU 2009). Ein *Vorrichtungssystem*, das optimal an das jeweilige Auftragspektrum eines Lohnfertigers angepasst ist und zugleich die Leistungspotentiale der Fertigungsanlagen nutzbar macht, leistet daher einen substantiellen Beitrag zu der von HEIGL & RENNHAKE (2008, S. 47) geforderten kostenoptimalen Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte in der Lohnfertigung.

## 1.2 Problem- und Aufgabenstellung

Ein Lohnfertiger steht spätestens ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme einer neuen Fertigungsanlage vor vielfältigen Herausforderungen, wenn er das Rationalisierungspotential eines Vorrichtungssystems nutzen möchte, das in Bezug auf das Auftragspektrum und das Produktionssystem optimal strukturiert und ausgelegt ist (Abbildung 1).

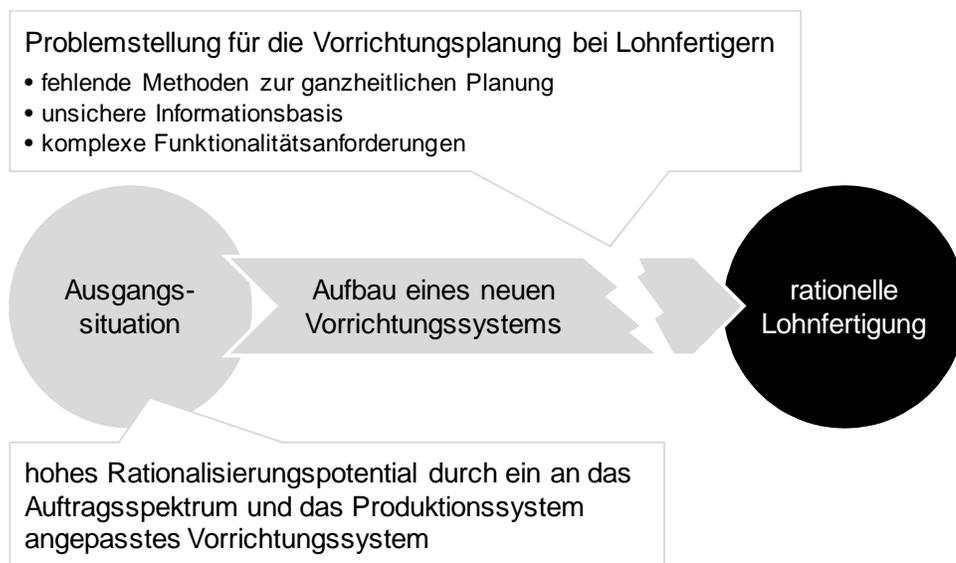


Abbildung 1: Ausgangssituation, Problem- und Aufgabenstellung dieser Arbeit

Der Aufbau eines neuen Vorrichtungssystems wird grundsätzlich dadurch erschwert, dass die gängigen Methoden zur Vorrichtungsplanung lediglich die einzelne Spannaufgabe betrachten und ganzheitliche Ansätze zur Strukturierung eines flexiblen Vorrichtungssystems fehlen (vgl. Abschnitt 2.3.7.4, S. 34). In der Lohnfertigung kommen das heterogene und volatile Auftragspektrum, aus dem keine sichere Informationsbasis für die Vorrichtungsplanung gewonnen werden kann (WILDEMAN 2008, S. 217 ff.), und die Herausforderung hinzu, die vorrichtungsinduzierten Kosten trotz sinkender Stückzahlen und steigender funktionaler Anforderungen durch die Fertigungsanlagen stetig zu reduzieren.

Vor dem Hintergrund dieser Ausgangssituation und Problemstellung stellt sich die vorliegende Arbeit die Aufgabe, eine *Methodik für den Aufbau von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung* zu entwickeln und somit einen Beitrag zur Rationalisierung des Vorrichtungswesens zu leisten.

### 1.3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Der für die Entwicklung der Methodik relevante Untersuchungsbereich kann anhand *objektbezogener* (Abbildung 2) sowie *prozess- und subjektbezogener Merkmale* (Abbildung 3) beschrieben werden.

Das direkte *Bestimmungsobjekt* der Methodik stellt die einzelne Vorrichtung mit ihren in einer bestimmten Ausführung umgesetzten spanntechnischen und kinematischen Funktionen dar. Das Vorrichtungssystem, d. h. die Gesamtheit aller Einzelvorrichtungen einer Fertigungsanlage bzw. eines Produktionssystems, ist ebenfalls Bestimmungsobjekt dieser Methodik, da nur durch diese übergeordnete Sicht die funktionale Ausführungsart der Einzelvorrichtung in Abhängigkeit ihres Einsatzbereichs bestimmt werden kann.

Zusätzlich hat die Methodik eine Reihe weiterer *Einflussobjekte* zu berücksichtigen, die auf den Aufbau eines Vorrichtungssystems einwirken oder Randbedingungen bzw. Anforderungen darstellen. Der Untersuchungsbereich beschränkt sich auf Unternehmen, deren Produktionsprogramm überwiegend durch die Lohnfertigung geprägt ist. Es wird angenommen, dass die Fertigung in diesen Betrieben nach den Prinzipien der Werkstattfertigung oder Inselfertigung strukturiert ist und auf Einzweck- oder Mehrtechnologiemaschinen durchgeführt wird. Als Fertigungsverfahren werden v. a. spanende Trennverfahren und strahlbasierte Verfahren zum Fügen und zum Ändern von Stoffeigenschaften berücksichtigt, die bei der Teilefertigung vorwiegend zum Einsatz kommen und einen intensiven Vorrichtungseinsatz erfordern.

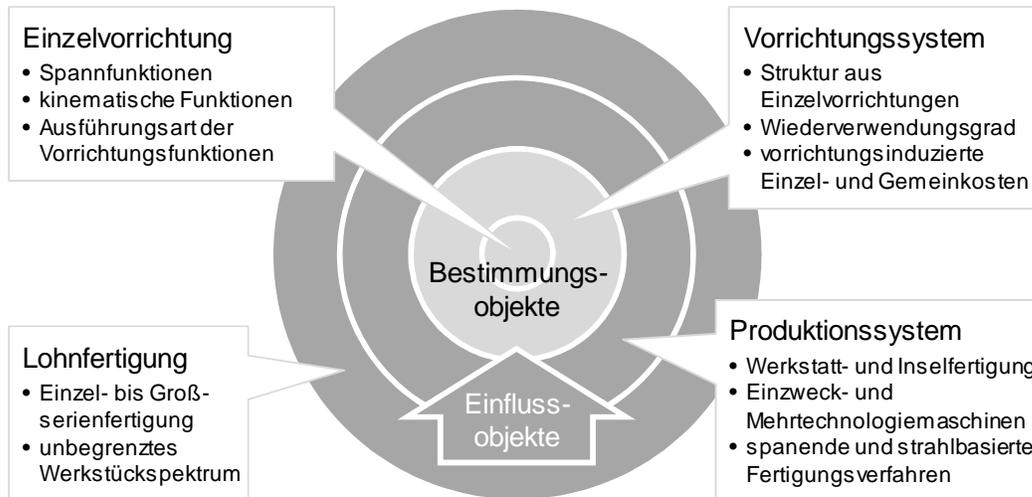


Abbildung 2: Objektbezogener Untersuchungsbereich dieser Arbeit

Das Spektrum der Aufträge in der Lohnfertigung zeichnet sich überwiegend durch kleine bis mittlere Stückzahlen aus, enthält aber vereinzelt auch Aufträge mit hohen Stückzahlen. Das Werkstückspektrum, das die Varianz der zu fertigenden Bauteilgeometrien beschreibt, wird als unbegrenzt angenommen.

Die *prozessbezogene Abgrenzung* des Untersuchungsbereichs orientiert sich am Ablauf der technischen Auftragsabwicklung (vgl. EVERSHEIM 1989a, S. 4 ff.). Die Problemstellung betrifft in der Arbeitsplanung die Bereiche der Fertigungsmittelplanung und der Vorrichtungs-konstruktion. Diese Funktionsbereiche weisen enge Schnittstellen zur Planungsvorbereitung und zur Arbeitsplanerstellung auf, in deren Verantwortungsbereichen die Teilarbeitsvorgänge und damit die funktionalen Anforderungen an eine Vorrichtung festgelegt werden.

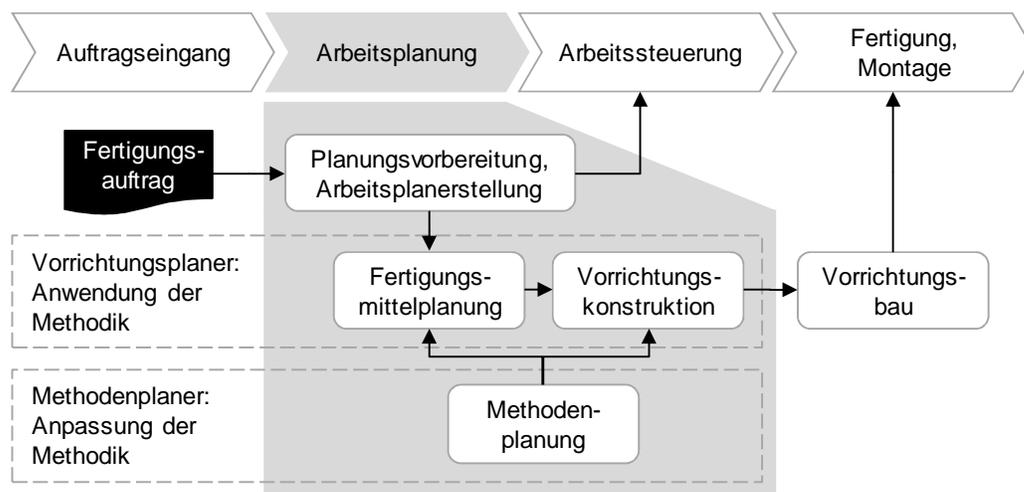


Abbildung 3: Prozess- und subjektbezogener Untersuchungsbereich dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll einen allgemeingültigen Ablauf zum Aufbau eines Vorrichtungssystems aufzeigen. Sie richtet sich daher zunächst an den für die Methodenentwicklung zuständigen *Arbeitsplaner*<sup>1</sup> und soll ihm als Grundlage dienen, das Einsatzpotential dieser Methodik für die unternehmenseigene Vorrichtungsplanung abzuschätzen und ggf. eine betriebsspezifische Anpassung und Detaillierung vorzunehmen. Schließlich ist der *Vorrichtungsplaner* Adressat der Methodik, dem sie als Anwender eine allgemeingültige Vorgehensweise aufzeigen soll.

### 1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird eine Planungsmethodik entwickelt, mit der ein Problem aus der Ingenieurspraxis effizient, effektiv und allgemeingültig gelöst werden soll. Der damit einhergehende Erkenntnisgewinn kann der angewandten Technikwissenschaft zugeordnet werden und hat daher folgende Anforderungen an die Vorgehensweise und die Ergebnisse zu berücksichtigen (SCHURZ 2006, S. 21 ff.; VOEGELE 1997, S. 120):

- die Nachvollziehbarkeit des Erkenntnisgewinns,
- die Wahrheit der Erkenntnisse,
- die Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse und
- die Ermöglichung eines wissenschaftlich fundierten Handelns durch den Menschen in der praktischen Anwendung.

Der Aufbau der Arbeit entspricht diesen Forderungen, indem die Vorgehensweise bei der Methodikentwicklung (Kapitel 1 bis 5), die Umsetzung und Anwendung (Kapitel 5 und 6) sowie die technische Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Methodik (Kapitel 6) detailliert beschrieben werden. Der Entwicklungsprozess der Methodik (siehe Abschnitt 2.4.4, S. 40) orientiert sich dabei an allgemeinen Vorgehensweisen zur Problemlösung (VDI 2221) und zur Entwicklung technischer und datenverarbeitender Systeme (DAENZER 1989; HENNING & KUTSCHA 1994).

In Kapitel 1 erfolgen die Beschreibung der Ausgangssituation und eine erste Formulierung der Problem- und Aufgabenstellung. Dort wird auch der Untersuchungsbereich eingegrenzt, um anschließend in Kapitel 2 für die Problemstellung relevante Erkenntnisse und Lösungsansätze gemäß dem Stand der Technik und Forschung vorzustellen. Die kritische Diskussion ihres Anwendungspotentials

---

<sup>1</sup> Soweit in dieser Arbeit personenbezogene Bezeichnungen in männlicher Form aufgeführt sind, beziehen sie sich auf beide Geschlechter in gleicher Weise.

führt am Ende von Kapitel 2 hin zu einer Präzisierung des zu lösenden Problems und der Zielstellung. Die bei der Lösungsfindung zu beachtenden Anforderungen und Randbedingungen werden in Kapitel 3 (S. 43) formuliert.

Die beiden darauf folgenden Kapitel bilden den Kern der Methodikentwicklung und gliedern sich in eine Konzeptions- und eine Detaillierungsphase. In Kapitel 4 (S. 47) wird das Gesamtproblem zunächst in seine Teilprobleme gegliedert und strukturiert, um Teillösungen zu identifizieren. Die miteinander verknüpften Einzelmethoden bilden das Grobkonzept der zu entwickelnden Methodik. Sie werden im folgenden Kapitel 5 (S. 93) an die Problemstellung angepasst, detailliert ausgearbeitet und in eine Gesamtmethodik integriert.

Die Umsetzung der Methodik in Form eines Softwareprototyps wird in Kapitel 6 (S. 137) dokumentiert. Es folgen eine allgemeingültige Anleitung zur Bewertung des Einsatzpotentials der Methodik und eine technisch-wirtschaftliche Bewertung. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 (S. 149) mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und einem Ausblick auf den problemrelevanten weiteren Forschungsbedarf.

## 2 Stand der Erkenntnisse und Problemformulierung

### 2.1 Allgemeines

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Problem- und Aufgabenstellung werden in diesem Kapitel relevante Ansätze aus der Forschung und der Praxis diskutiert, um mit diesem erweiterten Kenntnisstand zu einer konkretisierten Problemformulierung und Zielstellung zu gelangen.

Für ein allgemeingültiges Verständnis der folgenden Untersuchungen werden zunächst die relevanten Grundlagen zum Vorrichtungseinsatz vorgestellt (Abschnitt 2.2). Anschließend werden in Abschnitt 2.3 (S. 17) Rationalisierungsmaßnahmen im Vorrichtungswesen erläutert und ihre Anwendungspotentiale für das vorliegende Problem diskutiert. Das Fazit zu diesem Stand der Erkenntnisse beschreibt abschließend den weiteren Handlungsbedarf und führt zu der abgeleiteten, konkretisierten Zielstellung dieser Arbeit (Abschnitt 2.4, S. 37).

### 2.2 Grundlagen

#### 2.2.1 Ziele und Aufgaben des Vorrichtungseinsatzes

Vorrichtungen sind Betriebsmittel, die für die betriebliche Leistungserbringung eingesetzt werden. Zusammen mit Maschinen und Werkzeugen bilden sie die Gruppe der Fertigungsmittel, mit denen auf mechanische, physikalische oder chemische Art Form- und Zustandsänderungen an einem Material bzw. Werkstück ausgeführt werden (EVERSHEIM 1989a, S. 38). Der Vorrichtungseinsatz wird von BARDELEBEN (1972) auf drei Grundmotive zurückgeführt:

- die Ermöglichung der Fertigungsaufgabe,
- die Optimierung des Fertigungsablaufs und
- die Verallgemeinerung des Fertigungsablaufs (Abbildung 4).

Diese Motive zeigen, dass nahezu jede Einflussnahme auf den Fertigungsprozess den Anlass für einen Vorrichtungseinsatz bieten kann (VDI 1992, S. 3). In den meisten Fällen sind Vorrichtungen zumindest für die qualitätsgerechte Realisierung der Fertigungsaufgabe erforderlich, da das Werkstück in einer bestimmten Lage zum Werkzeug fixiert werden muss (DIN 6300).

Darüber hinaus ist der Vorrichtungseinsatz in hohem Maße wirtschaftlich motiviert, da erst durch ihn eine effiziente Nutzung des Kapazitätsangebots der vorhandenen Maschinen und Anlagen erreicht werden kann (EVERSHEIM 1989b, S. 39). Vorrichtungen haben einen entscheidenden Einfluss auf den zeitlichen Fertigungsablauf und tragen durch kürzere Neben- und Hauptzeiten zu einer erheblichen Steigerung des Nutzungsgrades aller Fertigungsmittel bei (WESTKÄMPER 2005, S. 168). Sie erleichtern bei entsprechender Ausführung die Arbeit des Bedienungspersonals und erlauben die Fertigung hochwertiger Werkstücke im Regelfall selbst mit ungelernten Arbeitskräften. Außerdem werden Vorrichtungen eingesetzt, um Schäden an Werkzeugen oder Maschinen durch Überbeanspruchung oder unsachgemäße Bedienung zu verhindern und Ausfallrisiken zu senken. Schließlich kann der Vorrichtungseinsatz eine Verallgemeinerung des Fertigungsablaufs bewirken. Er erlaubt die Erweiterung des Einsatzspektrums von Fertigungseinrichtungen, da diese als flexible, rekonfigurierbare und/oder austauschbare Komponenten an vielfältige Fertigungsaufgaben angepasst werden können (VDI 1992).

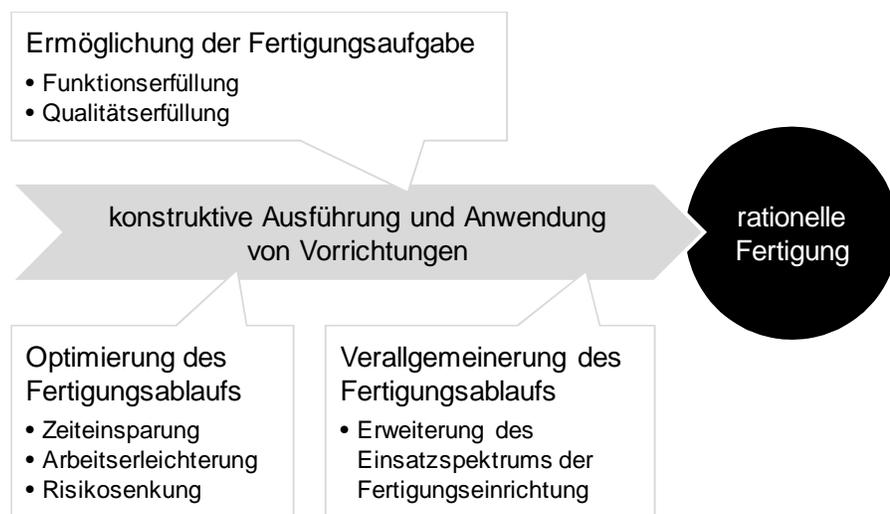


Abbildung 4: Ziele des Vorrichtungseinsatzes nach BARDELEBEN (1972)

Aus den Zielen des Vorrichtungseinsatzes und den jeweiligen Anwendungsfällen leiten sich die Vorrichtungsfunktionen ab. Diese können in werkstück-, fertigungsprozess-, werkzeug- und maschinenbezogene Funktionen gegliedert werden (Tabelle 2).

Die beiden *Hauptfunktionen einer Vorrichtung* sind das Bestimmen und das Spannen von Werkstücken (HOFFMAN 2004). Das Bestimmen, auch als Positionieren bezeichnet, stellt eine eindeutige räumliche Anordnung des Werkstücks relativ zum Werkzeug oder zur Maschine und bei Fügeoperationen zusätzlich

zum Fügepartner her. Es erfolgt durch den Entzug von jeweils drei translatorischen und rotatorischen Freiheitsgraden. Das Spannen ist eine dem Bestimmen zeitlich nachgeordnete Funktion, die das unter Einwirkung von Prozesskräften stehende Werkstück gegen Verschieben und Verdrehen sichert und dadurch für den Erhalt der räumlichen Anordnung sorgt (MAURI ET AL. 1986). Bei thermischen Fertigungsprozessen verhindert das Spannen zusätzlich, dass interne Spannungen unzulässige Schrumpfungen oder Verwerfungen des Werkstücks erzeugen (MARFELS & SCHNEIDER 1989).

Funktionsobjekt	Vorrichtungsfunktion	Funktionsobjekt	Vorrichtungsfunktion
Werkstück	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speichern</li> <li>• Sichern: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmen</li> <li>- Spannen</li> <li>- Stützen</li> <li>- Auswerfen</li> </ul> </li> <li>• Bewegen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Orientieren</li> <li>- Positionieren</li> <li>- Führen</li> </ul> </li> <li>• Schützen</li> </ul>	Fertigungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überwachen</li> <li>• Messen</li> <li>• Schützen</li> </ul>
		Werkzeug	Führen
		Maschine	Verbinden

Tabelle 2: Funktionen von Vorrichtungen

Je nach Einsatzart und Fertigungsverfahren übernehmen Vorrichtungen eine Reihe weiterer anwendungsspezifischer *Nebenfunktionen* (HOFFMAN 2004). In der flexibel automatisierten Auftragsfertigung dienen auf Paletten montierte Mehrfachvorrichtungen als Speicher für größere Werkstücklose (MICHEL 1990, S. 26; MÜCKE 2005). Neben den zuvor beschriebenen Sicherungsfunktionen des Bestimmens und Spannens werden Werkstücke zusätzlich gestützt, falls hohe Prozesskräfte oder das Werkstückeigengewicht unzulässige Verformungen oder Schwingungen erzeugen. Nach Beendigung des Teilarbeitsvorgangs ermöglichen oder erleichtern Auswurf Funktionen das Entnehmen des Werkstücks.

Für die Kombinationsbearbeitung in einer Aufspannung ist das Bewegen von Werkstücken eine wesentliche Vorrichtungsfunktion. Die verschiedenen Bearbeitungsoperationen einer Prozesskette erfordern unterschiedliche räumliche Anordnungen des Werkstücks relativ zum Werkzeug. In einem solchen Fall muss das Werkstück zwischen den Bearbeitungsschritten orientiert und positioniert<sup>2</sup> werden. Andere Bearbeitungsoperationen verlangen das Orientieren und Positio-

<sup>2</sup> Die Handhabungsfunktionen Orientieren und Positionieren stellen zusammen das Bewegen eines Körpers aus einer unbestimmten in eine vorgegebene räumliche Anordnung dar (VDI 2860).

nieren eines Werkstücks relativ zu einem anderen Werkstück, z. B. dem Fügepartner, oder das Führen<sup>3</sup> eines Werkstücks relativ zum Werkzeug. Die diese Bewegungsfunktionen ausführende Kinematik ist in der Regel fest in der Maschine installiert. Manche Freiheitsgrade werden aber auch durch Kinematiken realisiert, die direkt in die Vorrichtung integriert sind oder zusammen mit ihr auf einer Palette installiert werden (ZÄH & FRANZKOWIAK 2006). Bewegungen, die durch solche Kinematiken erzeugt werden, werden im Rahmen dieser Arbeit als Vorrichtungsfunktion betrachtet.

Spann- bzw. Fertigungsvorrichtungen aus dem Untersuchungsbereich dieser Arbeit erfüllen eine Reihe weiterer Funktionen des Fertigungsprozesses. In Vorrichtungen integrierte Sensorik kontrolliert das Fertigungsergebnis und überwacht den Fertigungsprozess, indem sie beispielsweise auf das Werkstück einwirkende Prozesskräfte misst (FLEISCHER ET AL. 2006). Vorrichtungen schützen einerseits das Werkstück vor unbeabsichtigten Einwirkungen durch das Werkzeug und andererseits das Werkzeug vor Einflüssen, die sich negativ auf den Bearbeitungsprozess auswirken können. In der spanenden Fertigung beispielsweise übernehmen Vorrichtungen u. U. auch die Spanabfuhr, die sonst zu Beschädigungen an Werkstück und Vorrichtung führen kann (MAURI ET AL. 1986). In der elektronenstrahlbasierten Fertigung schützen Vorrichtungen das Werkstück durch die Wärmeabfuhr vor thermischen Verzügen und den Elektronenstrahl durch die Ableitung von elektrischen Ladungen vor dem negativen Einfluss elektrostatischer Felder (SCHULTZ 2000, S. 77; BÄRTLE ET AL. 2009, S. 46).

### 2.2.2 Bauweisen und Einsatzgebiete von Vorrichtungen

Der Aufbau von Vorrichtungen wird allgemein in Funktions- und Teilfunktionsträger unterteilt (VDI 1992). *Funktionsträger*, wie Bestimm- und Spannelemente, stellen die Baugruppen einer Vorrichtung dar. Als *Teilfunktionsträger* werden die Verbindungselemente der Baugruppen, wie Grundplatten und -körper, sowie die Einzelkomponenten der Funktionsträger, z. B. Anlageprismen und Stützschrauben, bezeichnet.

Die *Ausführungsart* einer Vorrichtung bzw. der einzelnen (Teil-)Funktionsträger ist abhängig vom Verwendungszweck und folgt überwiegend aus dem Ziel der Optimierung und Verallgemeinerung des Fertigungsablaufs. Die Literatur unterscheidet drei Grundtypen der Vorrichtungsausführung: Standard-, Spezial- und

---

<sup>3</sup> Die Handhabungsfunktion Führen bezeichnet das Bewegen eines Körpers aus einer vorgegebenen in eine andere vorgegebene Position entlang einer definierten Bahn. Die Orientierung des Körpers ist dabei in jedem Punkt der Bewegung definiert (VDI 2860).

Baukastenvorrichtungen. Diese werden dabei insbesondere unter den Aspekten des Beschaffungs- und Einsatzaufwands und der Anpassbarkeit an unterschiedliche Aufgabenstellungen differenziert (EVERSHEIM 1989a, S. 86; ETSCHIEDT 1997).

*Standardvorrichtungen* sind spannaufgabenunabhängige, einfach aufgebaute Spannvorrichtungen, die aufwandsarm beschafft und für ein breites Werkstückspektrum eingesetzt werden können. Typische Vertreter sind Maschinenschraubstöcke oder Backenfutter, die für einfache Spannaufgaben die wirtschaftlichste Lösung darstellen (HOFFMAN 2004, S. 269).

*Spezialvorrichtungen* werden für eine einzelne oder eine kleine Gruppe von Spannaufgaben entwickelt, ohne dass eine anderweitige Verwendung vorgesehen ist. Sie erlauben daher eine optimale Auslegung hinsichtlich der technischen Anforderungen der Bearbeitungsaufgabe und des Fertigungsablaufs. Aufgrund der hohen Beschaffungszeiten und -kosten werden Spezialvorrichtungen nur dann eingesetzt, wenn die Komplexität einer Spannaufgabe eine Sonderanfertigung erfordert oder wenn der Fertigungsablauf durch den Vorrichtungseinsatz so sehr optimiert werden kann, dass der erhöhte Beschaffungsaufwand kompensiert wird (NEITZEL 1990). Spezialvorrichtungen kommen daher hauptsächlich bei hohen Auftragsstückzahlen in Betracht.

*Baukastenvorrichtungen* werden für eine bestimmte Spannaufgabe so weit wie möglich aus vorhandenen, standardisierten Bauelementen konstruiert, die über lösbare Verbindungen zusammengesetzt werden. Nach Beendigung des Fertigungsauftrags werden sie wieder demontiert, so dass die einzelnen Bauelemente für weitere Spannaufgaben wiederverwendet werden können. Baukastenvorrichtungen sind dazu geeignet, komplexere Spannaufgaben zu erfüllen, als dies Standardvorrichtungen vermögen, und können an fast jede Werkstückgeometrie angepasst werden (HOFFMAN 2004, S. 239). Sie werden daher vorwiegend in der Prototypen-, Einzel- und Kleinserienfertigung eingesetzt, wenn Standardvorrichtungen aus technischen und Spezialvorrichtungen aus wirtschaftlichen Gründen nicht verwendet werden können. Die hohen Anschaffungskosten eines Baukastensystems werden durch eingesparte Kosten kompensiert, die sonst bei der Beschaffung, Lagerung und Wartung alternativer Standard- oder Spezialvorrichtungen entstanden wären (HOFFMAN 1987).

Neben diesen drei Grundtypen wurden im Zuge der Flexibilisierung der Produktion weitere Spanntechnologien entwickelt, die eine feinere Abstimmung der Vorrichtungsfunktionen mit dem jeweiligen Aufgabenspektrum ermöglichen (Abbildung 5). *Flexible Vorrichtungen* haben eine überwiegend integrierte Bauweise mit anpassbaren und austauschbaren Funktionselementen (WILLY 1994),

beispielsweise NC-gesteuerte Matrix-Stößel-Systeme oder elektrorheologische Wirkmedien, die sich reversibel an die Werkstückkontur anpassen können und als flexible Bestimm-, Spann- oder Stützelemente verwendet werden (BI & ZHANG 2001; FLEISCHER ET AL. 2006). Diese integriert aufgebauten Vorrichtungen weisen zwar einen geringeren Einsatzbereich als ein modulares Baukastensystem auf, dafür reduzieren sich aber der einsatzabhängige Konfigurations- und der Montageaufwand erheblich. Flexible Vorrichtungen werden daher bevorzugt bei einer hohen, aber eingrenzbar Werkstückvielfalt und zahlreichen Umrüstvorgängen eingesetzt (NEE ET AL. 1995).

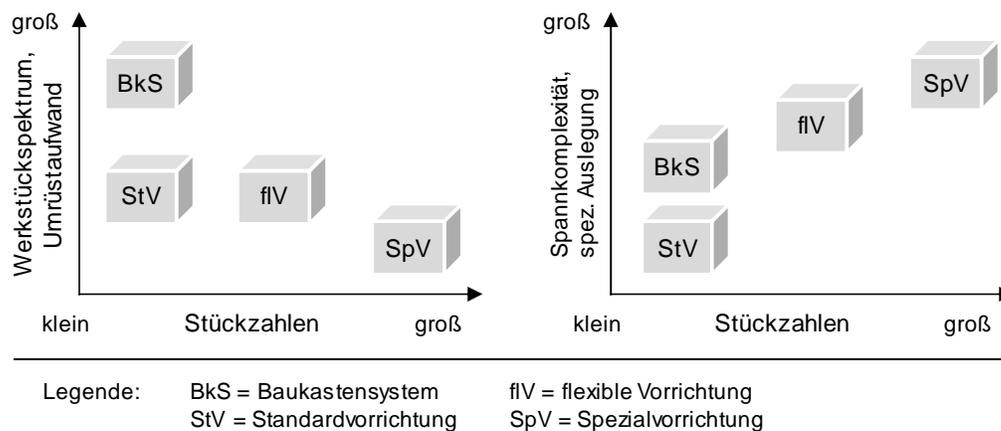


Abbildung 5: Einsatzgebiete und Charakteristika der Vorrichtungsarten

### 2.2.3 Planung und Konstruktion von Vorrichtungen

Die Vorrichtungsplanung und -konstruktion (Abbildung 6) sind Teilaufgaben der Arbeitsvorbereitung, die für die wirtschaftliche Auftragsabwicklung in den Unternehmensbereichen *Fertigung* und *Montage* verantwortlich ist (WESTKÄMPER 2005, S. 153 ff.). Im Rahmen der Arbeitsplanerstellung werden Maschinen, Werkzeuge und Fertigungsoperationen zu Teilarbeitsvorgängen zusammengefasst und somit die einzelnen Spannaufgaben eines Fertigungsauftrags definiert (MUTHSAM 2001, S. 19). Die Vorrichtungsplanung erfolgt in enger Absprache mit dem Vorrichtungs- bzw. Betriebsmittelbau, der entweder als Abteilung direkt der Arbeitsplanung zugeordnet ist oder als eigenständiger Unternehmensbereich organisiert ist. Dort werden im Anschluss an die Vorrichtungsplanung ggf. neue Vorrichtungen konstruiert und hergestellt.

Die Aufgabe der auftragsspezifischen *Vorrichtungsplanung* ist es, die technisch und wirtschaftlich optimale Vorrichtungsart zu bestimmen. Hierzu wird zunächst die Spannaufgabe auf Basis des Arbeitsplans, der Auftragsdaten und der Werk-

stückzeichnung analysiert. In dieser Planungsphase werden, falls es die Terminalsituation erlaubt, Änderungsvorschläge für die Bauteilkonstruktion formuliert, die einen wirtschaftlicheren Vorrichtungseinsatz erlauben. Das hohe Rationalisierungspotential einer spanngerechten Bauteilgeometrie macht eine frühzeitige Einbindung der Vorrichtungsplanung in den Produktentwicklungsprozess sinnvoll, um vorrichtungsinduzierte Kosten zu reduzieren und die Vorrichtungsplanung zu beschleunigen (EVERSHEIM 1989a, S. 87; MAURI ET AL. 1986).

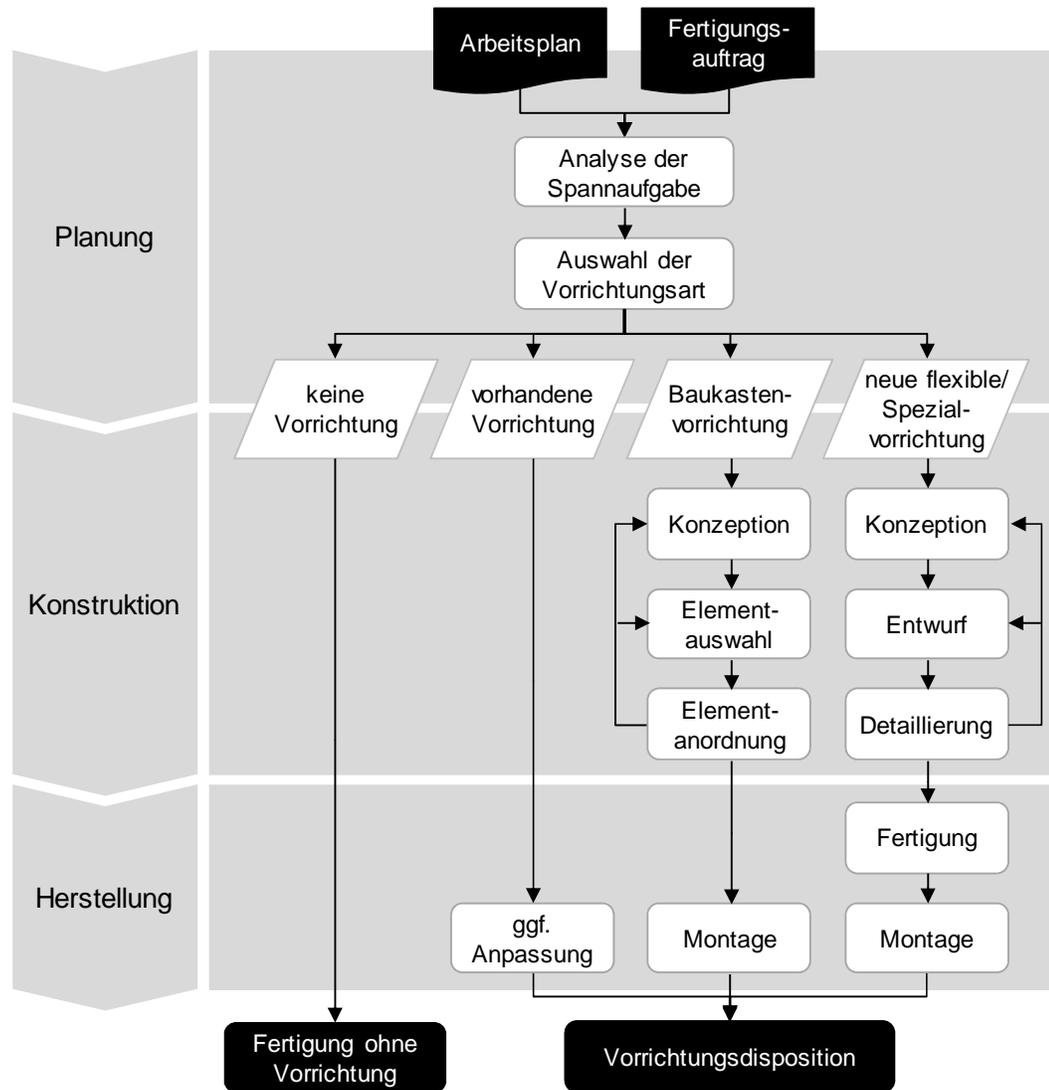


Abbildung 6: Planung und Beschaffung von Vorrichtungen (VDI 1992, S. 59 ff. & S. 119 ff.)

Im Anschluss an die Analyse der Spannaufgabe erfolgt die Ermittlung der Vorrichtungsalternativen, wobei Aspekte wie die technische Realisierbarkeit, die

Termin- und Kostensituation und die Kapazitätsauslastung eine rasche Eingrenzung ermöglichen. Als Alternativen kommen in Frage (VDI 1992, S. 60):

- der Verzicht auf einen Vorrichtungseinsatz,
- die Wiederverwendung oder Anpassung einer vorhandenen Vorrichtung,
- der Einsatz einer Baukastenvorrichtung oder
- die Neukonstruktion einer Spezial- oder einer flexiblen Vorrichtung.

Für die relevanten Vorrichtungsarten werden erste Konzepte erarbeitet, die beispielsweise die Funktionalität einer Vorrichtung, die Anzahl redundanter Vorrichtungen und die Anzahl an Werkstücken pro Vorrichtung enthalten (NEE ET AL. 1995, S. 19 ff.). Auf dieser Basis wird eine wirtschaftliche Bewertung der Entscheidungsalternativen durchgeführt, bei der die zeitlichen Einsparungen, zugehörige Aufwände und die Amortisationszeiträume miteinander verglichen werden (HOFFMAN 2004, S. 89 ff.). Die Vorrichtungsplanung entscheidet so über den Vorrichtungseinsatz und löst ggf. die Konstruktion einer neuen Vorrichtung aus.

Der *Konstruktionsprozess* von Vorrichtungen ist meist sehr komplex, er erfordert viel Erfahrung und methodisches Wissen und ist durch intuitive Entscheidungen des Konstrukteurs geprägt (WILLY 1994, S. 25; NEE ET AL. 1995, S. 11). HARGROVE & KUSIAK (1994) bezeichnen die Vorrichtungskonstruktion sowohl als Wissenschaft, die sich in den zahlreichen Prinzipien und Methoden zur automatisierten Vorrichtungskonstruktion und -optimierung widerspiegelt, als auch als Kunst, die vom Konstrukteur erst nach einer langen Zeit des Experimentierens und Beobachtens beherrscht wird.

Die Neukonstruktion einer Spezial- oder flexiblen Vorrichtung und die Konfiguration einer Baukastenvorrichtung richten sich im Wesentlichen nach der allgemeinen, in der Richtlinie VDI 2222 beschriebenen Vorgehensweise zur Produktentwicklung (VDI 1992, S. 119). In der Konzeptionsphase legt der Konstrukteur die räumliche Anordnung des Werkstücks, die Bestimfebene und die Bestimm-, Spann- und Stützpunkte auf der Werkstückoberfläche fest. Dabei berücksichtigt er die einzelnen Bearbeitungsoperationen, die Toleranzanforderungen sowie die auf das Bauteil wirkenden Kräfte und überprüft das Ergebnis anhand von Toleranzanalysen sowie Stabilitäts- und Deformationsuntersuchungen.

Im anschließenden Entwurfsschritt werden die Funktionsträger für jede Wirkstelle qualitativ und so weit wie möglich quantitativ beschrieben. Für eine Spezial- oder eine flexible Vorrichtung sind beim Entwurf der Funktionsträger theoretisch keine Grenzen gesetzt, während sich der Entwurf einer Baukastenvorrichtung auf die Auswahl standardisierter Elemente beschränkt. Gleiches gilt für die Verbin-

dung der Funktionsträger durch einen Vorrichtungskörper, der meist aus einer Grundplatte und verschiedenen Aufbauelementen besteht. Der vollständige Entwurf sollte einer Kollisionsuntersuchung unterzogen werden, um den ungehinderten Zugang des Werkzeugs zum Werkstück zu gewährleisten.

In der abschließenden Detaillierungsphase werden alle quantitativen Konstruktionsparameter bestimmt und die Fertigungszeichnungen für neue Bauteile erstellt. Nach der Freigabe durch die Arbeitsvorbereitung werden die neuen Vorrichtungen gefertigt und aufgebaut. Die Montage der Vorrichtungen erfolgt meist manuell. Speziell ausgelegte Baukastensysteme erlauben auch eine automatisierte, roboterbasierte Montage (ETSCHIEDT 1997).

An die Vorrichtungskonstruktion wird grundsätzlich die Forderung gestellt, die Fertigung eines Werkstücks in ausreichender Qualität bei minimalen Kosten zu ermöglichen. Dabei dürfen die Vorrichtungskosten für Beschaffung, Wartung und Lagerung nicht isoliert, sondern nur im Kontext der gesamten Herstellkosten betrachtet werden (NEE ET AL. 1995, S. 28). Ferner muss eine Vorrichtung einfach durch den Werker zu bedienen sein und den betrieblichen Standards entsprechen, die z. B. die Schnittstellen zum Materialflusssystem oder bestimmte Standardkomponenten vorgeben.

## 2.3 Rationalisierungsmaßnahmen im Vorrichtungswesen

### 2.3.1 Überblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem wirtschaftlichen Vorrichtungseinsatz in der Lohnfertigung. Daher werden in den folgenden Abschnitten relevante Rationalisierungsmaßnahmen aus der Praxis und der Forschung vorgestellt und ihre Anwendbarkeit für den Aufbau eines neuen Vorrichtungssystems diskutiert.

Rationalisierungsmaßnahmen im Vorrichtungswesen (Abbildung 7) betreffen die Planung, die Konstruktion, die Bereitstellung sowie den Betrieb und den Einsatz von Vorrichtungen und zielen auf die Verkürzung der Durchlaufzeiten, die Reduzierung von Beschaffungs-, Betriebs- und Einsatzkosten sowie die Reduzierung gebundenen Kapitals ab (EVERSHEIM 1989b, S. 113; HOFFMAN 2004). Anhand der Rationalisierungsziele kann keine Eingrenzung der zu untersuchenden Maßnahmen vorgenommen werden, da nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der vorrichtungsinduzierten Kosten ein wirtschaftlicher Vorrichtungseinsatz erreicht werden kann (NEE ET AL. 1995, S. 28). Die rechnerunterstützte Vorrich-

tungszuordnung und die automatisierte Vorrichtungsmontage werden im Folgenden nicht näher betrachtet. Sie rationalisieren zwar den operativen Vorrichtungseinsatz, werden aber erst nach erfolgter Vorrichtungsplanung wirksam und haben daher keinen Einfluss auf den Aufbau eines wirtschaftlichen Vorrichtungssystems.

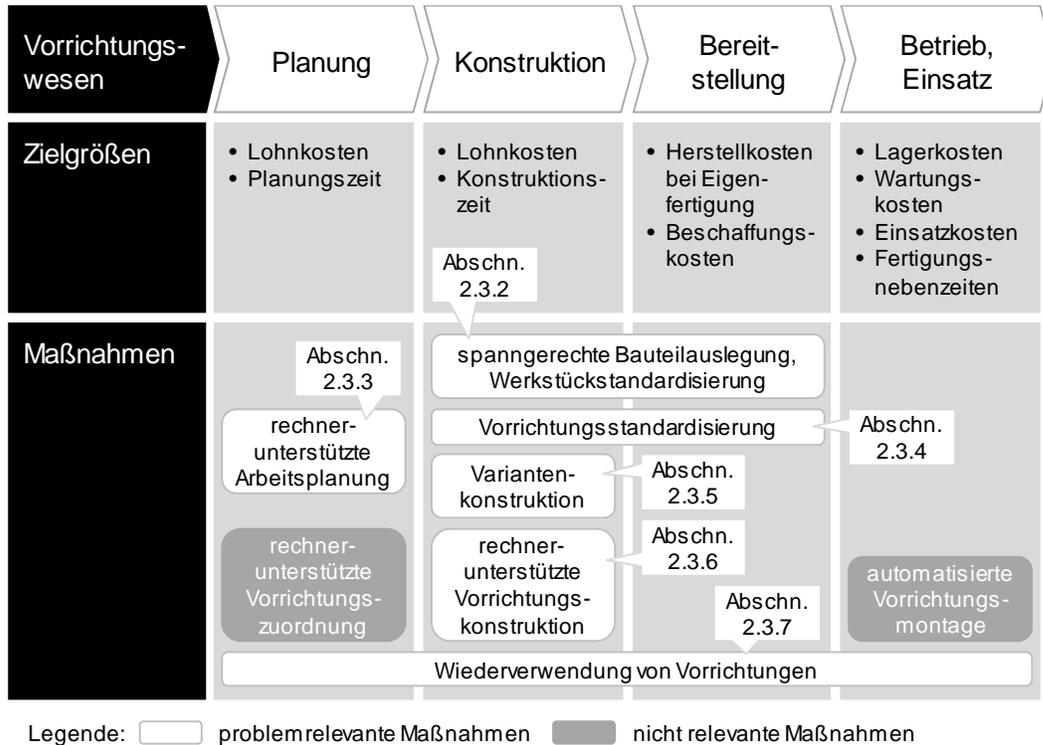


Abbildung 7: Zielgrößen und Maßnahmen der Rationalisierung im Vorrichtungswesen

### 2.3.2 Bauteilauslegung und Werkstückstandardisierung

*Werkstückseitige Maßnahmen* zur Rationalisierung des Vorrichtungswesens verfolgen eine spanngerechte Bauteilauslegung und zusätzlich eine Standardisierung der Werkstückgestalt.

Eine spanngerechte Bauteilauslegung erhöht einerseits die Fertigungsqualität, indem beispielsweise ein verzugsfreies Spannen ermöglicht wird, und optimiert andererseits den Fertigungsablauf, wenn z. B. Lage- und Formtoleranzen so festgelegt werden, dass eine Komplettbearbeitung oder schnellere Prozessgeschwindigkeiten realisiert werden (VDI 1992, S. 18 ff.).

Die Standardisierung der Werkstückgestalt mit einheitlichen Bestimm- und Spannungspunkten, z. B. durch zusätzliche Spannnocken, zielt auf die Senkung vorrichtungsbezogener Kosten ab. Für entsprechend ausgelegte Werkstücke wird eine geringere Vielfalt an Vorrichtungen benötigt, so dass die Kosten für Beschaffung, Lagerung und Wartung sowie die Kapitalbindungskosten beträchtlich reduziert werden können. Des Weiteren besteht für standardisierte Werkstücke eine schnellere Vorrichtungsverfügbarkeit, was den Fertigungsstart beschleunigen kann (EVERSHEIM 1989b, S. 114; HOFFMAN 2004; ANDERSON 2008).

Für die Umsetzung einer spanngerechten Bauteilauslegung und einer Standardisierung von Bestimm- und Spannungspunkten ist eine enge und frühzeitige Absprache der Produktentwicklung mit der Arbeits- und Vorrichtungsplanung erforderlich (VDI 1992). Das Rationalisierungspotential dieser werkstückseitigen Maßnahmen ist in der Lohnfertigung sehr beschränkt. Aufgrund der Vielzahl an Auftraggebern würde ein hoher Abstimmungsaufwand mit den einzelnen Konstruktionsabteilungen anfallen. Ferner erlauben kurzfristige Anfragen oder die späte Einbindung des Teilefertigers nach der Konstruktionsfreigabe bzw. der Fertigungsplanung keine Änderungen mehr an der Bauteilgestalt (VOEGELE 1997, S. 103). Dennoch sollten mit Kunden, die regelmäßig Fertigungsaufträge erteilen, so weit wie möglich werkstückseitige Standardisierungsmaßnahmen vereinbart werden.

### 2.3.3 Rechnerunterstützte Arbeitsplanung

Die Aufgaben einer Spannvorrichtung werden durch die Bestimmung der Teilarbeitsvorgänge im Rahmen der Arbeitsplanerstellung festgelegt. Eine automatisierte, *rechnerunterstützte Ermittlung der Spannhalte* wird durch CAPP-Systeme<sup>4</sup> ermöglicht, die zur Aufwandsreduzierung und Qualitätsverbesserung in der Arbeitsplanung eingesetzt werden (EVERSHEIM & SCHUH 1996, S. 7-84). Die spannplanungsrelevanten Ergebnisse dieser Systeme bestehen aus der Gestalt und der räumlichen Anordnung des zu spannenden Werkstücks und den Bearbeitungsschritten eines Teilarbeitsvorgangs.

Die rechnerunterstützte Arbeitsplanung verarbeitet die Informationen über das Werkstück und die verfügbaren Fertigungsmittel durch ein hinterlegtes Planungs- und Prozesswissen und bestimmt auf diese Weise (Teil-)Arbeitsvorgänge und ihre Reihenfolge, einzusetzende Fertigungsmittel sowie Technologie- und Zeitdaten (ZAHN 1999). Damit Wissen, Fertigungsmittel- und Werkstückinformationen miteinander verknüpft werden können, werden in CAPP-Systemen überwie-

---

<sup>4</sup> Computer-aided Process Planning (CAPP) = rechnerunterstützte Fertigungs- bzw. Arbeitsplanung

gend featurebasierte Werkstückbeschreibungen verwendet (HAMELMANN 1996; JEBARAJ & SINGH 2005). Ein *Feature* wird allgemein als „Aggregation von Geometrieelementen und/oder Semantik“ definiert (VDI 2218). Verschiedene Sichtweisen auf ein Produkt entlang seines Lebenszyklus haben zu der Entwicklung unterschiedlicher Arten von Features geführt, die von der Konstruktion bis zum Recycling eingesetzt werden. In der Arbeitsplanung, dem ursprünglichen Anwendungsgebiet der Feature-Technologie, werden Fertigungsfeatures eingesetzt. Sie stellen die „kleinsten geometrischen Baueinheiten der Werkstückform“ dar, denen eine Fertigungsanweisung zugeordnet werden kann (KEDZIERSKI 1968). Beispielsweise beschreiben sie das Zerspanungsvolumen einer Bohrung zusammen mit der Werkzeugausrichtung und den Fertigungstoleranzen oder die Merkmale einer Schweißverbindung, d. h. Art, Geometrie und räumliche Anordnung der Naht (LUSZEK 1990). Solche Fertigungsfeatures ermöglichen eine automatische, generative Arbeitsplanerstellung, da ihnen bauteilneutrale, featurespezifische Bearbeitungsparameter und Planungsregeln zugeordnet werden können.

Die rechnerunterstützte Arbeitsplanung (Abbildung 8) gliedert sich in

1. die Identifizierung der Fertigungsfeatures,
2. die Bestimmung der Teilarbeitsvorgänge und
3. die spanntechnische Bewertung möglicher Spannpläne.

Je nachdem, welches CAD-Modell des Werkstücks vorliegt, wird in *Feature-Identifizierung* bei einer rein geometrischen Beschreibung des Fertigteils oder in *Feature-Transformation*, falls bereits featurebasiert konstruiert wurde, unterschieden. Ein Großteil der Verfahren zur Feature-Identifizierung ist beschränkt auf proprietäre CAD-Formate (BANSAL ET AL. 2008), indirekte Verfahren können aber auch neutrale Datenformate, wie STEP<sup>5</sup> oder IGES<sup>6</sup>, verarbeiten (FU ET AL. 2003).

Die Arbeitsvorgänge werden im Anschluss an die Feature-Erzeugung durch eine Verknüpfung der Fertigungsfeatures mit den vorhandenen Fertigungsverfahren und Arbeitssystemen bestimmt. Die Spanninhalte sind entweder bereits durch einen Arbeitsvorgang definiert oder die Bearbeitungsschritte eines Arbeitssystems werden weiter in *Teilarbeitsvorgänge* unterteilt, um Werkzeuge und Vorrichtungen zuordnen zu können (HAMELMANN 1996). Die Gruppierung der Fertigungsfeatures und die damit verbundene räumliche Anordnung des Werkstücks

---

<sup>5</sup> STEP = Standard for the Exchange of Product Model Data (ISO 10303), Produktdatenaustauschformat u. a. für CAD/CAM/PDM-Systeme

<sup>6</sup> IGES = Initial Graphics Exchange Specification, Geometriedatenaustauschformat für CAD-Systeme

erfolgen in erster Linie anhand der Zugangsrichtung der Werkzeuge (JEBARAJ & SINGH 2005). Weitere Kriterien sind Toleranz- und Reihenfolgebeziehungen zwischen Fertigungsfeatures, allgemeine Fertigungsregeln, Randbedingungen des Maschinenarbeitsraums und spanntechnische Anforderungen (BANSAL ET AL. 2008; YAO ET AL. 2007). Die übergeordnete Zielfunktion verfolgt dabei die Minimierung der Fertigungskosten, der Fertigungszeit und/oder der Anzahl an Teilarbeitsvorgängen (JEBARAJ & SINGH 2005).

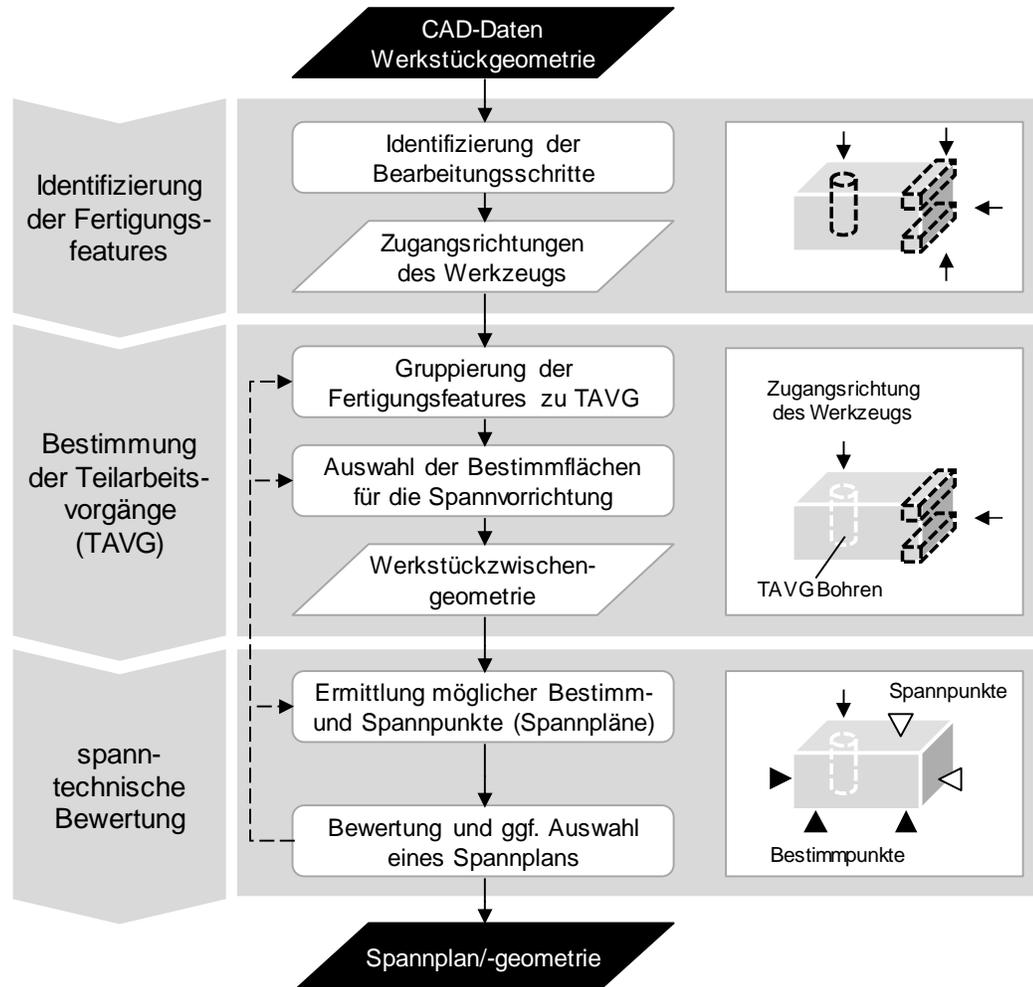


Abbildung 8: Ablauf der automatisierten Planung von Spannhalten mit angeschlossener spanntechnischer Bewertung (ZHANG & PENG 2005)

Aufgrund des erheblichen Einflusses des Vorrichtungseinsatzes auf die Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Fertigung wurden Planungssysteme mit integrierter *spanntechnischer Bewertung* entwickelt, welche die Bestimmung der Teilarbeitsvorgänge direkt mit Verfahren der rechnergestützten Vorrichtungskonstruktion koppeln. Damit wird gewährleistet, dass für jeden Teilarbeitsvorgang anforderungsgerechte Spannpläne realisiert werden können (ZHANG & PENG 2005).

BANSAL ET AL. (2008) stellen ein Planungssystem vor, das, ausgehend von der indirekten Feature-Erkennung, Teilarbeitsvorgänge bestimmt und diese direkt anhand des jeweils optimalen Spannplans, bestehend aus Bestimm-, Spann- und Stützpunkten, bewertet. Dies geschieht nach den Kriterien der Eindeutigkeit der Werkstückbestimmung, der maximalen Stabilität und der Einfachheit des Be- und Entladens. Falls die Bewertungskriterien nicht zufriedenstellend erfüllt sind, werden in einer Iterationsschleife neue Teilarbeitsvorgänge ermittelt und spanntechnisch bewertet. Diese Teilmethoden der automatisierten Vorrichtungskonstruktion werden in Abschnitt 2.3.6 detailliert vorgestellt.

Ein in der Lohnfertigung eingesetztes System zur automatisierten Bestimmung der Spanninhalte müsste neutrale CAD-Werkstückdaten verarbeiten, eine umfassende werkstückunabhängige und fertigungsprozessspezifische Feature-Bibliothek enthalten und das betriebsspezifische Planungs- und Prozesswissen abbilden. Für eine Lohnfertigung mit einem klar eingrenzbaeren Fertigungsangebot können heute verfügbare Systeme diese funktionalen Anforderungen erfüllen. Allerdings ist der Aufwand für die Entwicklung und die Pflege eines Arbeitsplanungssystems sehr hoch, so dass der Einsatz eines erfahrenen Arbeitsplaners für Fertigungsaufträge mit wenigen Arbeitsvorgängen und Bearbeitungsschritten die wirtschaftlichere und qualitativ bessere Alternative darstellt. Dies gilt insbesondere für die spanntechnische Bewertung der Teilarbeitsvorgänge, da die vielfältigen Anforderungen des Vorrichtungswesens noch nicht umfassend durch automatisierte Systeme berücksichtigt werden können.

### 2.3.4 Vorrichtungsstandardisierung

Die Konstruktion neuer Vorrichtungen aus standardisierten Funktions- und Teilfunktionsträgern, wie DIN-Normteile (DIN 1978), Werksnormteile oder Teile eines vorhandenen Baukastensystems, verfügt laut NEITZEL (1990, S. 10) über ein hohes Rationalisierungspotential im Vergleich zur Neuentwicklung aller Komponenten. Standardisierte Vorrichtungselemente führen aufgrund der Einschränkung der Lösungsalternativen zu geringeren Entwicklungszeiten und -kosten und tragen zu einer Reduzierung der Herstellkosten für Vorrichtungen bei, da sie in größerer Stückzahl kostengünstiger produziert werden können (CAMPBELL 1994).

Eine konsequente *Standardisierung einzelner Teilfunktionsträger* empfiehlt sich daher für den Betriebsmittelbau eines Lohnfertigers, der häufig neue Spezial- und flexible Vorrichtungen bereitstellen muss. Diese Standardelemente können auf der Grundlage einer systematischen Analyse bestehender Vorrichtungen hinsicht-

lich ähnlicher, häufig wiederkehrender Funktionen ermittelt und ausgelegt werden (VDI 1992, S. 160).

### 2.3.5 Variantenkonstruktion

Der Planungs- und Konstruktionsprozess einer Vorrichtung jeglicher Ausführungsart kann durch die Bereitstellung bekannter und erprobter Lösungen eines ähnlichen Problems unterstützt werden. Zur Verwaltung und Identifizierung solcher Lösungen werden in der Praxis Klassifikationssysteme eingesetzt, welche die Bearbeitungsaufgaben, repräsentiert durch Werkstück-, Prozess- und Fertigungsmittelmerkmale, und die zugehörigen Vorrichtungen kodieren. Die Klassifikationsschlüssel basieren entweder auf der Gruppentechnologie, deren Kodierung für einfache Fälle einsetzbar ist (JIANG ET AL. 1988), oder auf der Feature-Technologie, deren strukturierte Beschreibung die Repräsentation komplexer Objekte erlaubt (NEE ET AL. 1992). Zur Identifizierung ähnlicher Spannaufgaben werden u. a. Methoden der künstlichen Intelligenz, wie das fallbasierte Schließen, angewendet (CHEN ET AL. 2007).

Die Variantenkonstruktion unterstützt die Vorrichtungsplanung bei der Identifikation vorhandener Vorrichtungen, die für einen aktuellen Fertigungsauftrag wiederverwendet oder angepasst werden können. Falls dies nicht möglich ist und eine neue Vorrichtung beschafft werden muss, beschleunigen ähnliche Lösungen den Konstruktionsprozess von Spezialvorrichtungen und die Konfiguration von Baukastenvorrichtungen (SUN & CHEN 1995), da Teillösungen direkt oder leicht geändert übernommen werden können. In der Praxis haben sich vor allem Montagekarten bewährt, welche die Konfiguration von Baukastenvorrichtungen visualisieren (EVERSHEIM 1989b, S. 115 f.). Neben der Verkürzung von Planungs- und Konstruktionszeiten hat die Variantenkonstruktion auch einen positiven Einfluss auf die Qualität der entwickelten Vorrichtungen, da Erfahrungswerte mit ähnlichen Konstruktionen in die neue Lösung einfließen.

Die Variantenkonstruktion mit ihren verschiedenen Ausprägungen ist ein etabliertes Verfahren im Vorrichtungswesen und verfügt gerade in der Lohnfertigung mit ihren zahlreichen Spannaufgaben über ein hohes Potential zur Beschleunigung und Kostensenkung der Vorrichtungsbeschaffung und zur Verbesserung der Spannqualität.

### 2.3.6 Rechnerunterstützte Vorrichtungskonstruktion

Der Entwicklungsprozess von Vorrichtungen ist komplex und weitgehend abhängig vom Wissen und von der Erfahrung des Konstrukteurs (HUNTER ET AL. 2006). Um diese Abhängigkeit zu reduzieren, den Konstrukteur von Routinearbeiten zu entlasten und die Vorrichtungskonstruktion zu systematisieren, wurden seit den 1980er Jahren Modelle und Methoden entwickelt, die das Konstruktionswissen repräsentieren und eine (Teil-)Automatisierung der Vorrichtungskonstruktion ermöglichen (PEHLIVAN & SUMMERS 2008; BI & ZHANG 2001; CECIL 2001; HARGROVE & KUSIAK 1994; TRAPPEY & LIU 1990).

Die rechnerunterstützte Vorrichtungskonstruktion<sup>7</sup> kann in die drei Schritte

1. Problemdefinition,
2. Vorrichtungssynthese und
3. Vorrichtungsanalyse

gegliedert werden (Abbildung 9). Im ersten Schritt wird die Konstruktionsaufgabe, die abstrahiert einem Optimierungsproblem entspricht, durch ihre Parameter und Nebenbedingungen sowie eine Zielfunktion beschrieben. Tabelle 3 gibt einen Überblick auf die möglichen Beschreibungsgrößen, die je nach Anwendungsbereich variieren können. Die *Problemdefinition* erfolgt auf Basis von Beschreibungsmodellen, mit denen das Werkstück, die Fertigungsprozesse und die zu konstruierende Vorrichtung abgebildet werden. Hierbei kommen vorwiegend CAD- oder featurebasierte Geometriemodelle für die Werkstück- und Vorrichtungsbeschreibung und Kraftmodelle zur Repräsentation der Fertigungsprozesse zum Einsatz (PEHLIVAN & SUMMERS 2008).

Konstruktionsparameter	Nebenbedingungen	Zielfunktion
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spannplan aus Bestimm-, Spann- und Stützpunkten</li> <li>• Bestimm-, Spann- und Stützelemente:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Art</li> <li>- räumliche Anordnung</li> <li>- funktionale Parameter</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einlegen und Entnehmen des Werkstücks</li> <li>• Art des Formschlusses</li> <li>• Zugangsrichtungen des Werkzeugs</li> <li>• Fertigungstoleranzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungsqualität:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionierfehler</li> <li>- Werkstückdeformation</li> </ul> </li> <li>• Produktionskosten</li> <li>• Produktivität</li> </ul>

Tabelle 3: Auswahl an Beschreibungsgrößen für das Problem der automatischen Vorrichtungskonstruktion (BI & ZHANG 2001)

<sup>7</sup> In der englischsprachigen Fachliteratur wird für die rechnerunterstützte Vorrichtungskonstruktion der Begriff *Computer-aided Fixture Design* (CAFD) verwendet.

Im Rahmen der *Vorrichtungssynthese* werden die Ausprägungen der Konstruktionsparameter unter Berücksichtigung der Bedingungen und Zielkriterien bestimmt. Dieser Konstruktionsprozess gliedert sich in die Ermittlung eines Spannplans, bestehend aus Bestimm-, Spann- und Stützpunkten, und in die anschließende Auswahl, Anordnung und Auslegung der Vorrichtungselemente.

Die Spannpläne werden auf Basis von Bestimm- und Spannprinzipien aufgestellt, die dem Werkstück systematisch alle Freiheitsgrade entziehen und Verschiebungen verhindern (TRAPPEY & LIU 1990; KANG & PENG 2008). Eine detaillierte Beschreibung dieser Prinzipien erfolgt in Abschnitt 4.6.3.3 (S. 80).

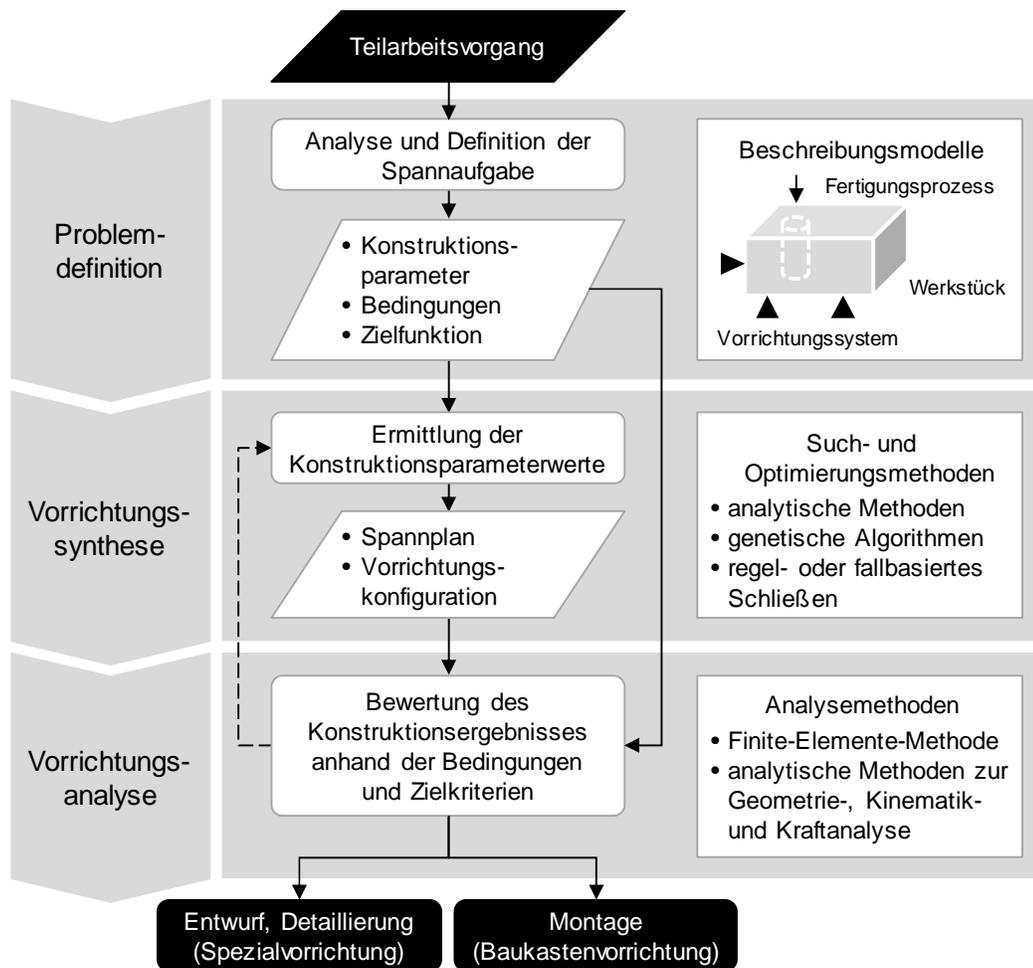


Abbildung 9: Allgemeiner Ablauf der rechnerunterstützten Vorrichtungskonstruktion (BI & ZHANG 2001; PEHLIVAN & SUMMERS 2008)

Das für die Vorrichtungssynthese erforderliche Wissen kann auf vielfältige Arten repräsentiert und zur Lösung der Konstruktionsaufgabe angewendet werden. Eine Möglichkeit dazu stellen analytische Modelle dar, die Geometrie, Kinematik, Kräfte und/oder Werkstückdeformationen des Systems aus Vorrichtung und

Werkstück abbilden und unter Einbeziehung der problemspezifischen Bedingungen und Zielkriterien eine optimale Lösung erzeugen (ZHENG & CHEW 2010; KANG & PENG 2008; TIAN ET AL. 2006; QIN ET AL. 2006). Regelbasierte Methoden erweitern die Wissensbasis rechnerunterstützter Systeme, indem sie Heuristiken der Vorrichtungskonstruktion in Form iterativer Algorithmen für die Vorrichtungssynthese nutzen (NEE ET AL. 1995, S. 28 ff.). Beide Methoden ermöglichen schnelle, effiziente und hochwertige Lösungen und werden in den meisten Konstruktionssystemen verwendet. Sie sind dabei allerdings limitiert in ihrem Anwendungsbereich und Lösungsspektrum, da sie auf starren, nur schwer erweiterbaren Algorithmen basieren (PEHLIVAN & SUMMERS 2008).

Im Gegensatz dazu analysieren genetische Algorithmen einen wesentlich größeren Lösungsraum auf der Suche nach einer geeigneten Vorrichtungskonfiguration. Diese heuristischen Optimierungsverfahren erzeugen eine Menge an zufälligen Konstruktionslösungen, die anhand einer Zielfunktion bewertet werden. Die besten Lösungen dieser Population werden anschließend untereinander kombiniert und verändert, so dass eine neue Generation an Vorrichtungslösungen entsteht. Dieser evolutionäre Prozess wird so lange durchgeführt, bis er eine zufriedenstellende Konstruktionslösung hervorgebracht hat. Genetische Algorithmen werden für die Ermittlung von Spannplänen (KAYA 2006; PRABHAHARAN ET AL. 2007; HAMED 2005) und für die Konfiguration des Vorrichtungsaufbaus eingesetzt (MERVYN ET AL. 2005). Ihre Anwendung ist wesentlich einfacher und flexibler im Vergleich zu analytischen oder regelbasierten Methoden. Dafür können sie nicht garantieren, die optimale Konstruktion zu finden, da ihr Lösungsvorgehen zufallsbasiert ist.

Einen anderen Ansatz als die generativen Verfahren verfolgen fallbasierte Methoden, die in Anlehnung an die Variantenkonstruktion ähnliche Spannaufgaben suchen und deren Lösungen an das aktuelle Problem anpassen (SUN & CHEN 1995). Dies geschieht beispielsweise durch das Verschieben von Spannungspunkten oder den Austausch von Funktionsträgern. Da sie hochwertige Lösungen erzeugen, aber in ihrem Anwendungsfeld auf ähnliche Spannaufgaben beschränkt sind, ergänzen sie sich sehr gut mit generativen Konstruktionssystemen (CHEN ET AL. 2007).

Im abschließenden Schritt des rechnerunterstützten Konstruktionsprozesses, der *Vorrichtungsanalyse*, werden der Spannplan und die Vorrichtungskonfiguration hinsichtlich der aufgestellten Bedingungen und Zielkriterien bewertet und ggf. zur weiteren Optimierung einer Iterationsschleife unterzogen. Im Fokus der Vorrichtungsanalyse stehen bei den meisten Systemen die zu erwartenden Verschiebungen und Deformationen des Werkstücks, da aus ihnen die erreichbaren Ferti-

gungstoleranzen abgeleitet werden können (PEHLIVAN & SUMMERS 2008). Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird in der Regel für die Berechnung der Werkstückdeformationen unter statischen und dynamischen Prozesskräften verwendet (SIEBENALER & MELKOTE 2006; AMARAL ET AL. 2005). Eine Vielzahl weiterer geometrie- und kinematikorientierter Methoden wurde entwickelt, um die Werkstückverschiebungen, Fertigungstoleranzen und die Werkstückzugänglichkeit zu analysieren (KANG ET AL. 2003; LI ET AL. 2006).

Je nach Größe des Anwendungsbereichs variiert der Automationsgrad der Konstruktionssysteme. NEE ET AL. (1995, S. 127 f.) unterscheiden in interaktive Systeme, die lediglich den Konstruktionsprozess in einer CAD-Umgebung visualisieren, halb-automatische Systeme, die für einige der oben beschriebenen Prozessschritte auf das Wissen des Menschen zurückgreifen, und automatische Systeme, die aufgrund der limitierten Wissensrepräsentation nur für einen kleinen Anwendungsbereich eingesetzt werden können.

Der *Anwendungsbereich* entlang des Konstruktionsprozesses ist je nach Vorrichtungsart unterschiedlich groß. Die Bestimmung von Positionierebenen und Wirkstellen kann weitgehend vorrichtungsneutral erfolgen. Die Auswahl und Verbindung von Funktionsträgern ist aber nur möglich, wenn ein Vorrichtungsmodell und ein Funktionsträgerkatalog vorhanden sind. Der Einsatz rechnerunterstützter Konstruktionssysteme beschränkt sich daher bei der Neukonstruktion von Spezialvorrichtungen auf die Konzeptionsphase (vgl. Abbildung 6, S. 15), während die Konstruktion von Baukastenvorrichtungen komplett unterstützt werden kann. Ein Großteil der Arbeiten auf dem Gebiet der rechnergestützten Vorrichtungskonstruktion beschäftigt sich daher mit der Neu- oder Variantenkonstruktion von Baukastenvorrichtungen (KANG & PENG 2008; CHEN ET AL. 2007; LI ET AL. 2006).

Systeme zur (teil-)automatisierten Vorrichtungskonstruktion können den Konstrukteur bei Teilproblemen schnell und effizient unterstützen, insbesondere bei der Ermittlung von Bestimm-, Spann- und Stützpunkten und bei der Konfiguration neuer Vorrichtungen aus standardisierten Bauelementen. Dies ist aber nur in einem klar definierten Anwendungsfeld möglich, das durch den Umfang der Wissensrepräsentation eingegrenzt und durch die planbaren Werkstückgeometrien, Fertigungsprozesse und Vorrichtungsarten sowie durch die zu berücksichtigenden Zielkriterien und Randbedingungen charakterisiert wird (PEHLIVAN & SUMMERS 2008). Umfassend einsetzbare, kommerzielle Systeme sind noch nicht am Markt verfügbar, allerdings werden spezielle Systeme von Herstellern kommerzieller Baukastensysteme für die halbautomatisierte Vorrichtungskonfiguration angeboten (HORST WITTE 2010). Hier liegt ein hohes Einsatzpotential rech-

nerunterstützter Verfahren, da sie den manuellen Konstruktionsprozess von Baukastenvorrichtungen, der wesentlich durch Ausprobieren gekennzeichnet ist, beschleunigen und verbessern können (BI & ZHANG 2001).

Mögliche Einsatzgebiete für rechnerunterstützte Konstruktionssysteme in der Lohnfertigung sind die Neu- und Variantenkonstruktion verschiedener Vorrichtungsarten. Sie müssten neutrale CAD-Daten verarbeiten können und eine möglichst hohe Flexibilität in Bezug auf die zu spannende Werkstückgeometrie aufweisen. Aufgrund der limitierten Wissensrepräsentation, vor allem hinsichtlich unterschiedlicher Werkstückgeometrien, ist ein umfassender Einsatz nach dem derzeitigen Stand nicht möglich. Der zielgerichtete Einsatz, z. B. für die Konfiguration eines häufig verwendeten Baukastensystems oder für die Ermittlung toleranzoptimierter Spannpläne in der Präzisionsfertigung, ist jedoch technisch möglich. Die Wirtschaftlichkeit ist im Einzelfall zu prüfen, da die kommerzielle Verfügbarkeit sehr eingeschränkt ist und die Entwicklung und Wartung eines unternehmensspezifischen Systems für einen kleinen oder mittelständischen Lohnfertiger mit sehr viel Aufwand verbunden ist und zudem Spezialwissen erfordert.

### **2.3.7 Wiederverwendung von Vorrichtungen**

#### **2.3.7.1 Klassifikation wiederverwendbarer Vorrichtungen**

Wiederverwendbare Vorrichtungen werden aus rein wirtschaftlichen Motiven in der Fertigung eingesetzt. Dies gilt insbesondere für die Produktion in kleinen oder mittleren Stückzahlen, bei der die Beschaffungskosten für Spezialvorrichtungen i. d. R. 10 bis 20% der Fertigungsmittelkosten ausmachen und durch einen höheren Wiederverwendungsgrad bis zu 80% dieser Kosten eingespart werden können (KANG & PENG 2008). Um dieses Potential zu nutzen, müssen wiederverwendbare Vorrichtungen die technologischen Anforderungen nur in einem ausreichenden Maß erfüllen. Ihre Hauptanforderungen sind stattdessen eine schnelle Verfügbarkeit und ein größtmöglicher Wiederverwendungsgrad, um im Vergleich zu Spezialvorrichtungen geringere vorrichtungsinduzierte Stückkosten zu erzeugen (NEE ET AL. 1995).

Die Wiederverwendbarkeit von Vorrichtungsmitteln kann erhöht werden, indem

- passive durch aktive, flexible Funktionsträger ersetzt werden, die an unterschiedliche Fertigungsaufgaben angepasst werden können, oder
- austauschbare, modulare Funktionsträger in mehreren Vorrichtungen eingesetzt werden.

In der Fachliteratur werden wiederverwendbare Vorrichtungen meist als flexible Vorrichtungen bezeichnet und in Systeme mit modularer oder monolithischer Struktur gegliedert (BI & ZHANG 2001; WILLY 1994). In Anlehnung an die im Bezug auf Fertigungsmittel voneinander abgegrenzten Begriffe der Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit (ABELE ET AL. 2006; WIENDAHL 2009) werden im Rahmen dieser Arbeit Vorrichtungen bzw. ihre Funktionsträger nur dann als flexibel bezeichnet, wenn ihre Funktionalität mit geringem Umrüstaufwand und ohne einen substantiellen Komponentenaustausch an verschiedene Aufgaben angepasst werden kann. Wird die Funktionalität einer Vorrichtung überwiegend durch austauschbare Bauelemente bestimmt, so wird sie als modulare oder rekonfigurierbare Vorrichtung bzw. Baukastenvorrichtung bezeichnet. Abbildung 10 zeigt eine Klassifikation dieser Vorrichtungen, die in dieser Arbeit mit dem Überbegriff *wiederverwendbare Vorrichtung* bezeichnet werden.

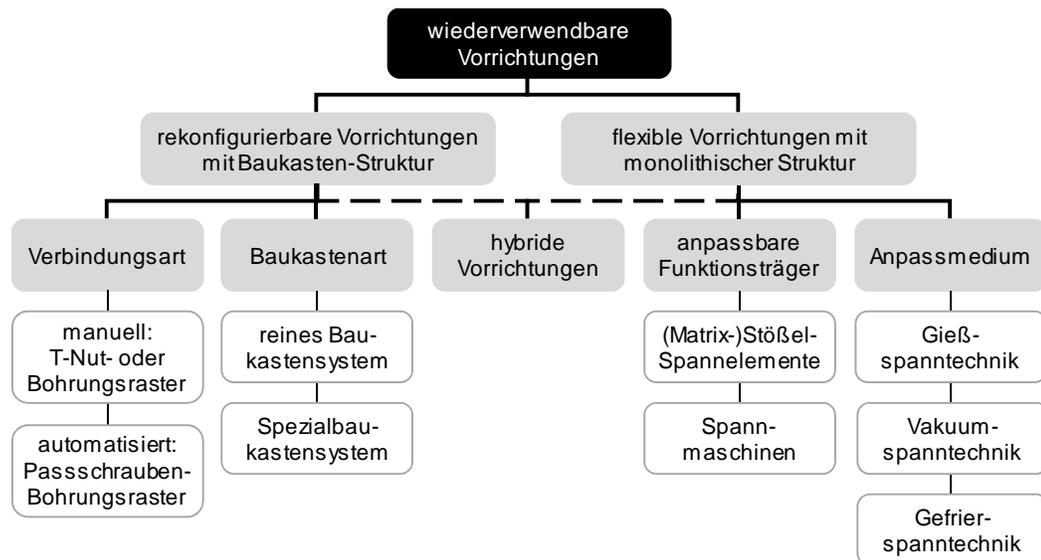


Abbildung 10: Klassifikation wiederverwendbarer Vorrichtungen

In den folgenden Abschnitten werden die technischen Ausführungen und Einsatzkriterien rekonfigurierbarer und flexibler Vorrichtungen vorgestellt. Anschließend werden die Methoden zur Planung und Konstruktion wiederverwendbarer Vorrichtungen analysiert.

### 2.3.7.2 Rekonfigurierbare Vorrichtungen

Der Rationalisierungseffekt eines Vorrichtungsbaukastens wird durch die wiederholte Verwendung seiner Elemente in verschiedenen Vorrichtungen erzielt. Hierfür sind standardisierte Modulschnittstellen erforderlich, die eine leichte Montage und Demontage ermöglichen und gleichzeitig die für die Werkstück-

fixierung geforderte Präzision und Stabilität gewährleisten. Die gebräuchlichsten Baukästen verwenden T-Nut- oder Bohrungsraaster, die nur für die manuelle Montage geeignet sind (VDI 1992, S. 136 ff.; NEE ET AL. 1995, S. 90 & 104). Baukastensysteme, die automatisiert montiert werden können, nutzen speziell ausgelegte Schnittstellen, wie z. B. Passschraubenraaster (ETSCHIEDT 1997, S. 21).

Die Bauelemente eines modularen Vorrichtungssystems sind nach ihrer Funktion gegliedert und bilden Grundkörper, Bestimm-, Stütz-, Spann- und Verbindungselemente (HOFFMAN 2004). Industriell eingesetzt werden kommerzielle, reine Baukastensysteme, die durch unternehmensspezifische Bauelemente ergänzt werden können, oder Spezialbaukästen, die von Grund auf für ein bestimmtes Aufgabenspektrum ausgelegt sind (BI & ZHANG 2001).

Die Anschaffungskosten für Baukastensysteme sind im Vergleich zu anderen Vorrichtungsarten sehr hoch (BI & ZHANG 2001). Sie zeichnen sich aber bei wiederholter Verwendung der Bauelemente durch geringe Stückkosten und eine hohe Verfügbarkeit für ein geometrisch quasi unbegrenztes, aber fertigungstechnisch limitiertes Einsatzspektrum aus (Abbildung 11).

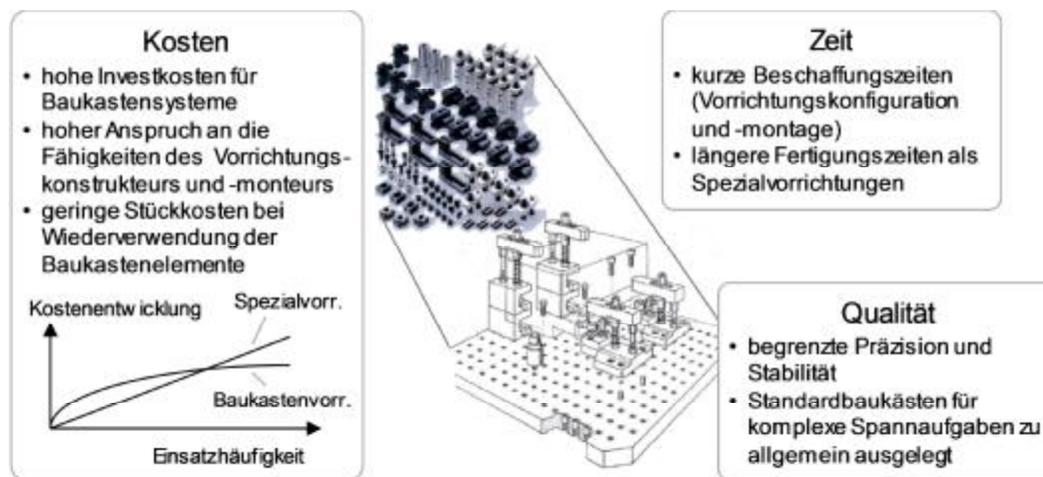


Abbildung 11: Kosten-, Zeit- und Qualitätsaspekte des Einsatzes von Baukastensystemen, Bild aus FLEISCHER ET AL. (2006)

Die Beschaffung einer Baukastenvorrichtung beschränkt sich auf die Konfiguration der Funktionsträger und deren Montage. Daher ist die kurzfristige Verfügbarkeit einer Baukastenvorrichtung ein wesentlicher Vorteil gegenüber Spezialvorrichtungen (HOFFMAN 2004, S. 255; LUGGEN 1991). Die Konfiguration und Montage stellen hohe Anforderungen an das Know-how des Konstrukteurs und des Monteurs, insbesondere bei engen Toleranzen (BI & ZHANG 2001). Zudem ist die manuelle Konstruktion stark von Ausprobieren geprägt (BANSAL ET AL.

2008). Diese beiden Aspekte zeigen den Bedarf einer rechnerunterstützten Vorrichtungskonfiguration auf, die den Prozess systematisiert und beschleunigt sowie zu qualitativ hochwertigeren Vorrichtungen führt (NEE ET AL. 1995).

Der Kompromiss aus Wiederverwendbarkeit und Funktionalität eines Baukastensystems macht sich in der erreichbaren Fertigungsqualität und u. U. in längeren Fertigungszeiten bemerkbar. Ungenauigkeiten der Bauelemente und eine geringere Stabilität führen dazu, dass die Bearbeitungspräzision im Vergleich zu Spezialvorrichtungen geringer ist (BANSAL ET AL. 2008; NEE ET AL. 1995, S. 82). Die verminderte Kraftaufnahmefähigkeit kann sich ebenfalls negativ auf die realisierbaren Schnitttiefen und damit auf die Hauptfertigungszeit auswirken. Zudem ist der Umbauungsgrad modularer Vorrichtungen in der Regel höher als bei einer Spezialvorrichtung. Dies kann den Einsatz längerer Werkzeuge oder aufgrund der verminderten Erreichbarkeit durch das Werkzeug zusätzliche Aufspannungen bzw. Teilarbeitsvorgänge erfordern.

Als Reaktion auf eine gestiegene Teilevielfalt und sinkende Losgrößen hielten Baukastenvorrichtungen zeitgleich mit mehrachsigen Werkzeugmaschinen und flexiblen Produktionssystemen Einzug in die industrielle Produktion (BI & ZHANG 2001). Mit den Produktionsanlagen mussten auch die Vorrichtungssysteme an das turbulenteren Umfeld angepasst werden, um den steigenden Vorrichtungskosten und -beständen entgegen zu wirken. Für Baukastenvorrichtungen gelten aufgrund ihrer kosten- und zeitspezifischen Vorteile folgende Einsatzkriterien (VDI 1992, S. 134 ff.):

- hoher Termindruck und kurze Auftragsdurchlaufzeiten,
- große Teilevielfalt,
- große Intervalle der Auftragswiederholung,
- kleine bis mittelgroße Lose und
- keine Einsatzmöglichkeit für Standardvorrichtungen.

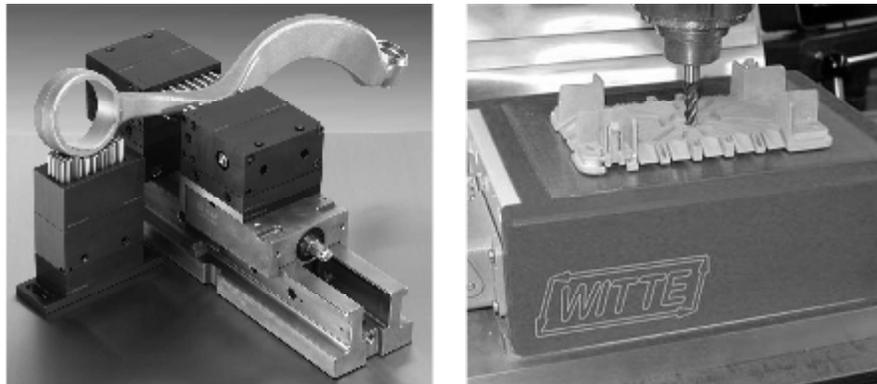
Dementsprechend kommen Baukastenvorrichtungen als Ersatz für Spezialvorrichtungen, die aufgrund von Reparatur- oder Wartungsarbeiten temporär nicht verfügbar sind, und in der Prototypen-, Einzel-, Klein- und Mittelserienfertigung zum Einsatz (NEE ET AL. 1995, S. 88 f.).

### **2.3.7.3 Flexible Komponenten und Vorrichtungen**

Im Vergleich zu modularen Vorrichtungen wird die Wiederverwendung flexibler Vorrichtungen nicht durch den Austausch von Funktionsträgern, sondern durch integrierte, anpassbare Funktionsparameter erreicht. Wie in Abbildung 10 (S. 29) dargestellt, kann diese Spannflexibilität entweder durch das Zusammenwirken

mehrerer, starr verbundener flexibler Funktionsträger oder durch ein formvariables Anpassmedium erreicht werden, das durch Kraft- bzw. Formschluss die Hauptspannfunktionen erfüllt.

Flexible Funktionsträger für das Bestimmen, Spannen oder Stützen bestehen aus einzelnen oder mehreren Verfahrenselementen, die automatisiert oder manuell betätigt werden können. Integriert aufgebaute Vorrichtungen, wie z. B. automatische Spannmaschinen mit hydraulischen Spannzyklindern (ZHANG 1993, S. 8; MICHEL 1990, S. 32 ff.) oder das von WILLY (1994) entwickelte pneumatische Lamellenkissen, können sich an unterschiedliche Oberflächentopologien und in begrenztem Maße an Form- und Größenvariationen der Werkstücke anpassen. Werden flexible Spannelemente modular ausgelegt, wie die in Abbildung 12 links dargestellten Matrix-Stößel-Spannbacken, kann ein breiteres Spektrum an Werkstückformen und -größen abgedeckt werden, da sich die Spannelemente an beliebigen Positionen einer Vorrichtungsbasis montieren lassen (JONSSON ET AL. 2008; AOYAMA & KAKINUMA 2005; CHAN & LIN 1996).



*Abbildung 12: Baukastenvorrichtung mit flexiblen Bestimm- und Spannelementen nach dem Matrix-Stößel-Prinzip (links, MATRIX 2010) und Gefrierspannvorrichtung (rechts, HORST WITTE 2012)*

Die Sonderverfahren des Gieß-, Gefrier- und Vakuumspannens nutzen jeweils die geometrische Anpassungsfähigkeit eines Mediums, um hochflexibel unterschiedliche Werkstückgeometrien zu spannen. *Gießspannvorrichtungen* verwenden ein phasenwechselndes Medium, das im flüssigen Zustand eine beliebige Werkstückform aufnehmen und durch einen Wechsel in den festen Aggregatzustand fixieren kann. Hierfür werden metallische Legierungen mit niedrigem Schmelzpunkt oder elektro- bzw. magnetorheologische Flüssigkeiten verwendet (TANG ET AL. 1999; HAZEN & WRIGHT 1997). Ihr industrieller Einsatz ist beschränkt auf Werkstücke mit Sonderformen, die durch klassische Vorrichtungen

nicht gespannt werden können, oder fragile Werkstücke, deren Bearbeitung erst durch das spannungsarme Fixieren ermöglicht wird.

*Gefrierspannvorrichtungen* nutzen einen ähnlichen Effekt. Als Anpassmedium fungiert eine Flüssigkeit, die durch den Entzug von thermischer Energie in den gefrorenen Zustand versetzt wird und so einen Kraftschluss zwischen Vorrichtung und Werkstück erzeugt. Das spannungsarme Verfahren wird in der Makro- und Mikrofertigung eingesetzt (WULFSBERG & LEHMANN 2003). Die mit diesem Prinzip zu spannenden Werkstücke müssen eine ebene, ausreichend große Auflagefläche aufweisen, sind aber sonst kaum in ihrer Geometrie beschränkt (Abbildung 12, rechts). Ein vergleichbares Einsatzspektrum haben *Vakuumschneidvorrichtungen*, welche die Umgebungsluft als formflexibles Medium verwenden, um das Werkstück auf einen Vakuumschneidertisch zu drücken. Auch dieses Spannprinzip erfordert lediglich eine genügend große Auflagefläche, die mit Vakuum beaufschlagt werden kann. Die Haupteinsatzgebiete der Vakuumschneidertechnik liegen in der Kunststoff-, der Nichteisenmetall- und der Holzbearbeitung (AMF 2009).

Flexible Vorrichtungen mit integrierter Struktur sind im Vergleich zu Baukastenvorrichtungen schneller verfügbar, da bei ihnen die Konfiguration und Montage entfällt und nur ein sehr geringer Umrüstaufwand getätigt werden muss (WILLY 1994, S. 19). Die schnelle Verfügbarkeit wird begleitet von einer geringeren Einsatzflexibilität, da das spannbare Werkstückspektrum durch die Flexibilitätskorridore der einzelnen Funktionsträger begrenzt ist. Flexible Vorrichtungen mit einer starren Struktur werden in der Regel für eine Teilefamilie konstruiert und sind daher spezifischer ausgelegt als ein Baukastensystem. Dies ermöglicht eine bessere Gestaltung des Fertigungsablaufs und der Fertigungsqualität, was sich z. B. bei hydraulischen Spannmaschinen in kürzeren Taktzeiten, reproduzier- und überwachbaren Spannkräften und einer höheren Funktionssicherheit auswirkt (MICHEL 1990, S. 32 f.).

Die Einsatzkriterien flexibler Vorrichtungen gleichen denen einer Baukastenvorrichtung im Bezug auf

- hohen Termindruck und kurze Auftragsdurchlaufzeiten,
- kleine bis mittelgroße Lose und
- fehlende Einsatzmöglichkeiten für Standardvorrichtungen.

Sie unterscheiden sich aber in einer

- eingegrenzten statt quasi unbegrenzten Teilevielfalt und
- kleinen statt großen Intervallen der Auftragswiederholung innerhalb des geplanten Teilespektrums.

Flexible Vorrichtungen finden daher in der Klein- bis Mittelserienfertigung Anwendung, falls Standardvorrichtungen nicht eingesetzt werden können und Baukastenvorrichtungen einen zu hohen Umrüstaufwand bedeuten. Ein Einsatz in der Lohnfertigung ist abhängig von der Kenntnis zukünftiger Fertigungsaufträge und von der Existenz ähnlicher Spannaufgaben, welche die Einsatzkriterien flexibler Vorrichtungen erfüllen. D. h. das Vorhandensein einer soliden Planungsgrundlage ist entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz flexibler Vorrichtungen.

### **2.3.7.4 Planung wiederverwendbarer Vorrichtungen**

Die Analyse der Einsatzgebiete wiederverwendbarer Vorrichtungen zeigt, dass diese Systeme wirtschaftlich und technisch jeweils für ein bestimmtes Auftragspektrum geeignet sind. Ein Lohnfertiger mit einem quasi unbegrenzten Werkstückspektrum und variablen Stückzahlen muss daher verschiedene, am Auftragspektrum ausgerichtete Vorrichtungen in der Produktion einsetzen, um möglichst rationell zu fertigen.

Die Planung neuer, wiederverwendbarer Vorrichtungen für ein Spektrum an Fertigungsaufträgen wird laut BI & ZHANG (2001) in der Fachliteratur nur vereinzelt betrachtet. Stattdessen verfolgen die meisten Methoden zur Vorrichtungsplanung und -konstruktion das Ziel, die ideale technische Lösung für eine einzelne Fertigungsaufgabe zu ermitteln. Ihre Ergebnisse führen entweder zu neuen Spezialvorrichtungen oder zu neuen Vorrichtungen, die auf der Basis vorhandener (Baukasten-)Systeme für die aktuelle Spannaufgabe konfiguriert werden. Diese Methoden sind nur bedingt anwendbar, wenn eine neue Fertigungsstätte aufgebaut wird, neue Produkte oder Produktionsanlagen eingeführt werden oder wenn die Fertigungsart von der Serien- auf die Einzel- und Kleinserienfertigung umgestellt wird (BI & ZHANG 2001). Ihr rein auftragsorientierter Planungsansatz berücksichtigt nicht die Neubeschaffung modularer oder flexibler Vorrichtungen und führt in den beschriebenen Fällen zu einem hohen Anteil an Standard- und Spezialvorrichtungen. Die Planung wiederverwendbarer Vorrichtungen darf daher nicht nur den aktuellen Fertigungsauftrag betrachten, sondern sie muss alle zukünftigen Spannaufgaben und deren Synergiepotential berücksichtigen. Solch ein holistischer Ansatz hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- die Identifizierung von Spannfamilien zur Definition der Spannaufgabe,
- die Bestimmung der Ausführungsart der Vorrichtung und der einzelnen Funktionsträger und
- die Konstruktion der wiederverwendbaren Vorrichtung.

Derzeit werden diese Aufgaben von keiner Methodik umfassend und durchgängig umgesetzt. Lediglich für Einzelaspekte wurden Lösungen entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

### **Identifizierung von Spannfamilien**

Die Spannaufgabe einer wiederverwendbaren Vorrichtung wird nicht nur aus einem, sondern aus mehreren Fertigungsaufträgen abgeleitet. Insbesondere für flexible Vorrichtungen, die einen klar definierten Einsatzbereich aufweisen, sind die Identifizierung solcher Spannfamilien des Produktionsprogramms und die damit einhergehende Definition der Spannaufgabe von Bedeutung.

Die Spannfamilie einer wiederverwendbaren Vorrichtung besteht aus ähnlichen Spannaufgaben, die in der gleichen Vorrichtung erfüllt werden können. Die Ähnlichkeit im Sinne einer flexiblen, monolithischen Vorrichtung drückt sich durch nah beieinander im Raum angeordnete potentielle Bestimm-, Spann- und Stützpunkte aus. Die Suche nach Spannfamilien mit ähnlichen Spannplänen ist vergleichbar mit der Teilefamilienbildung für gruppentechnologische Fertigungsstrukturen, bei der Werkstücke mit ähnlichen geometrischen und fertigungstechnischen Eigenschaften gruppiert werden (MITROFANOW 1960).

JIANG ET AL. (1988) präsentieren einen der wenigen Ansätze zur Teilefamilienbildung, auf dessen Grundlage wiederverwendbare Gruppenvorrichtungen konstruiert werden sollen. Die Beschreibung der Werkstücke erfolgt durch einen gruppentechnologiebasierten Klassifizierungsschlüssel. Solche alphanumerischen Schlüssel sind jedoch nicht geeignet, komplexe Objekte zu beschreiben. Zur Repräsentation komplexer Spannaufgaben sind strukturierte, beschreibende Modelle auf Basis der Feature-Technologie besser einsetzbar (NEE ET AL. 1995). Allerdings ist keine Gruppierungsmethode für Fertigungsaufträge auf Basis strukturierter Beschreibungsmodelle bekannt, mit der die Planung und Konstruktion wiederverwendbarer Vorrichtungen unterstützt wird.

### **Bestimmung der Ausführungsart**

Für die Ermittlung und Bewertung alternativer, wiederverwendbarer Vorrichtungsarten für die potentiellen Auftragsfamilien können die bewährten Methoden der auftragsorientierten Vorrichtungsplanung herangezogen werden. Als Entscheidungskriterium zwischen einem Baukastensystem und einer flexiblen Vorrichtung dienen die vorrichtungsinduzierten Stückkosten, die bei der Herstellung der Spannfamilie anfallen. Für deren Ermittlung werden in der Praxis Relativkostenkataloge oder firmenspezifische Berechnungsformeln verwendet (VDI 1992, S. 155 ff.). Die Haupteinflussgrößen auf diese Kosten sind die Losgrößen und die Wiederholhäufigkeiten der betrachteten Aufträge (HOFFMAN 2004).

### **Konstruktion wiederverwendbarer Vorrichtungen**

Die Methoden zur Konstruktion wiederverwendbarer Vorrichtungen für eine Teilfamilie sind zum großen Teil in der Praxis etabliert, in einzelnen Aspekten aber noch Gegenstand der Forschung.

Baukastensysteme werden von produzierenden Unternehmen in der Regel von kommerziellen Anbietern bezogen und ggf. durch betriebsspezifische Komponenten erweitert (HOFFMAN 1987, S. 165 f.; VDI 1992, S. 143 ff.). LIU (1994) präsentiert eine Methode für die systematische und schrittweise Überführung von Spezialvorrichtungen in ein neues Baukastensystem. Hierfür werden die Funktionen vorhandener Spezialvorrichtungen analysiert und zu modularen Funktionselementen zusammengefasst. Nachteilig an der Analyse von Vorrichtungsfunktionen anstelle von Spannaufgaben ist, dass das Synergiepotential nicht voll ausgeschöpft werden kann, weil vorgedachte Einzellösungen anstelle lösungsneutraler Anforderungen betrachtet werden. Dies trifft auch auf die Arbeit von LOCK (1984) zu, in der vorhandene Baukastenelemente durch ein Verfahren der multidimensionalen Skalierung gruppiert werden, um ein effizienteres Baukastensystem zu entwickeln.

Die Konzeption einer monolithischen Vorrichtung aus mehreren flexiblen Funktionsträgern besteht aus der Bestimmung der durch die Auftragsfamilie geforderten Flexibilitätskorridore. Dies betrifft insbesondere die räumliche Anordnung der Bestimm- und Spannelemente, die mit Hilfe von Superpositionsverfahren für eine Auftragsfamilie optimiert werden kann (KONG & CEGLAREK 2006; ZHUANG & GOLDBERG 1997).

Ein Literaturüberblick über Planungsmethoden für Vorrichtungen zeigt, dass im Vergleich zur Systematisierung und Automation des Konstruktionsprozesses für einzelne Fertigungsaufträge nur wenig Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Planung wiederverwendbarer Vorrichtungen für Auftragsfamilien getätigt wurde (KONG & CEGLAREK 2006; BI & ZHANG 2001). Es fehlt eine Methodik, die die ganzheitliche Planung eines aus verschiedenen Vorrichtungsarten bestehenden Vorrichtungssystems beschreibt und dabei die Volatilität eines Produktionsprogramms berücksichtigt, das zu keinem Zeitpunkt vollständig bekannt ist und sich mit jedem neuen Fertigungsauftrag ändern kann.

## **2.4 Problemformulierung und Zielstellung**

### **2.4.1 Allgemeines**

In den vorangehenden Abschnitten dieses Kapitels wurden die Grundlagen des Vorrichtungseinsatzes vorgestellt und Ansätze aus der Praxis und Forschung auf ihre Anwendbarkeit für das vorliegende Problem untersucht. Auf Grundlage dieser Situationsanalyse werden im Folgenden ein Maßnahmenkatalog für die Rationalisierung der Lohnfertigung präsentiert und die Anwendungsdefizite vorhandener Planungsmethoden herausgestellt. Damit kann das vorliegende Problem präzisiert und die Zielstellung dieser Arbeit formuliert werden. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung des weiteren Lösungsvorgehens.

### **2.4.2 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Problemformulierung**

Angesichts des stetig steigenden Kosten- und Zeitdrucks, dem ein Lohnfertiger in einem globalisierten und dynamischen Markt ausgesetzt ist, müssen alle Mittel ausgeschöpft werden, um die Wettbewerbsvorteile einer schnellen und günstigen Auftragserfüllung stetig auszubauen. Die Untersuchung des Vorrichtungseinsatzes hat gezeigt, dass Vorrichtungen einen wesentlichen Einfluss auf die Herstellkosten und die Bearbeitungszeit eines Fertigungsauftrags und damit auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Lohnfertigers ausüben (WILDEMAN 2008, S. 219).

Durch die Analyse der Abläufe des Vorrichtungswesens und der aktuellen Vorrichtungstechnologien wurden die Zusammenhänge zwischen der Vorrichtungsart, ihrem Einsatzbereich und den beeinflussten Auftragskosten und -zeiten dargestellt. Mit diesen Erkenntnissen kann für das heterogene Auftragspektrum in der Lohnfertigung geschlossen werden, dass ein Vorrichtungssystem die gesamte Bandbreite an Ausführungsarten nutzen sollte, um das Auftragspektrum unter Nutzung der Leistungspotentiale des Produktionssystems wirtschaftlich abzudecken. Die Analyse von Rationalisierungsmaßnahmen des Vorrichtungswesens zeigt, dass ein aus Spezial-, Standard-, Baukasten- und flexiblen Vorrichtungen optimal strukturiertes Vorrichtungssystem das größte Potential aufweist, den Fertigungsablauf zu optimieren und Kosten zu reduzieren.

Derzeit existiert keine Methodik zur umfassenden Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung. Die klassischen Methoden zur Vorrichtungsplanung sind auftrags- bzw. bauteilspezifisch und verfolgen daher allein das Ziel, die ideale Vorrichtung für eine einzelne Fertigungsaufgabe zu entwickeln. Die übergeordnete Planung von neuen, wiederverwendbaren Vorrichtungssystemen für eine Gruppe

## 2 Stand der Erkenntnisse und Problemformulierung

von Fertigungsaufträgen wird nur in Einzelaspekten, z. B. bei der Ermittlung von Gruppenspannplänen für flexible Vorrichtungen, betrachtet.

Für ein optimal strukturiertes Vorrichtungssystem bedarf es einer auftragsbezogenen und zugleich vorausschauenden, ganzheitlichen Bestimmung der Vorrichtungsart (Abbildung 13), bei der das wirtschaftliche Potential wiederverwendbarer Vorrichtungen berücksichtigt wird. Die Hauptprobleme in der Realisierung eines solchen Planungsvorgehens liegen in der *unsicheren Planungsgrundlage* und in fehlenden Methoden zur *Bestimmung von ähnlichen Spannaufgaben*, anhand derer alternative Vorrichtungsarten ermittelt werden können.

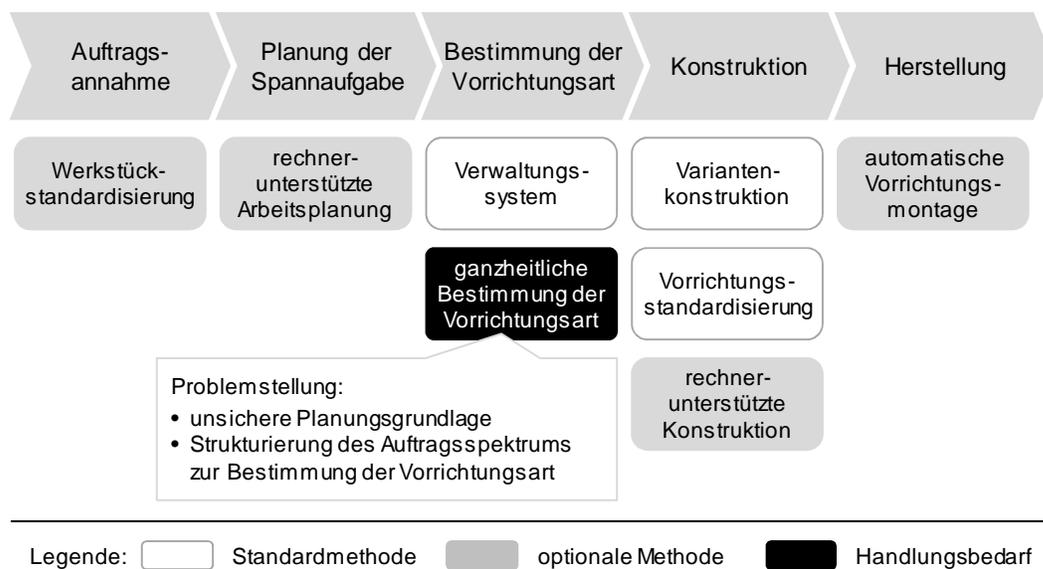


Abbildung 13: Maßnahmenkatalog und Handlungsbedarf zur Rationalisierung des Vorrichtungswesens in der auftragsorientierten Fertigung

Begleitend sollten folgende Rationalisierungsmaßnahmen verfolgt werden:

- der Einsatz eines Vorrichtungsverwaltungssystems zur Sicherstellung eines hohen Wiederverwendungsgrades,
- die Variantenkonstruktion und die Vorrichtungsstandardisierung bei der Entwicklung neuer Vorrichtungen und
- die Werkstückstandardisierung bei langfristigen bzw. regelmäßig wiederkehrenden Aufträgen.

Diese zusätzlichen Maßnahmen werden bei der folgenden Zielsetzung und Lösungsfindung berücksichtigt, sie stehen aber nicht im Fokus der Arbeit, da sie in der betrieblichen Praxis etabliert sind und keine nennenswerten Optimierungspotentiale mehr aufweisen. Im Gegensatz dazu besteht bei automatisierten Verfahren zur Planung von Spannhalten sowie zur Ermittlung von Spannplänen

und Vorrichtungskonfigurationen noch erheblicher Forschungsbedarf, um ihr begrenztes Einsatzspektrum hinsichtlich Werkstück- und Vorrichtungsvielfalt zu erweitern. Diese Einschränkungen machen einen Einsatz in der Lohnfertigung momentan nur bedingt möglich.

### 2.4.3 Zielstellung

Die in der Einleitung allgemein formulierte Aufgabe der Rationalisierung der Lohnfertigung durch ein an das Auftragspektrum und das Produktionssystem angepasstes Vorrichtungssystem kann nun auf Basis der Problemformulierung in eine konkrete Zielstellung überführt werden (Abbildung 14).

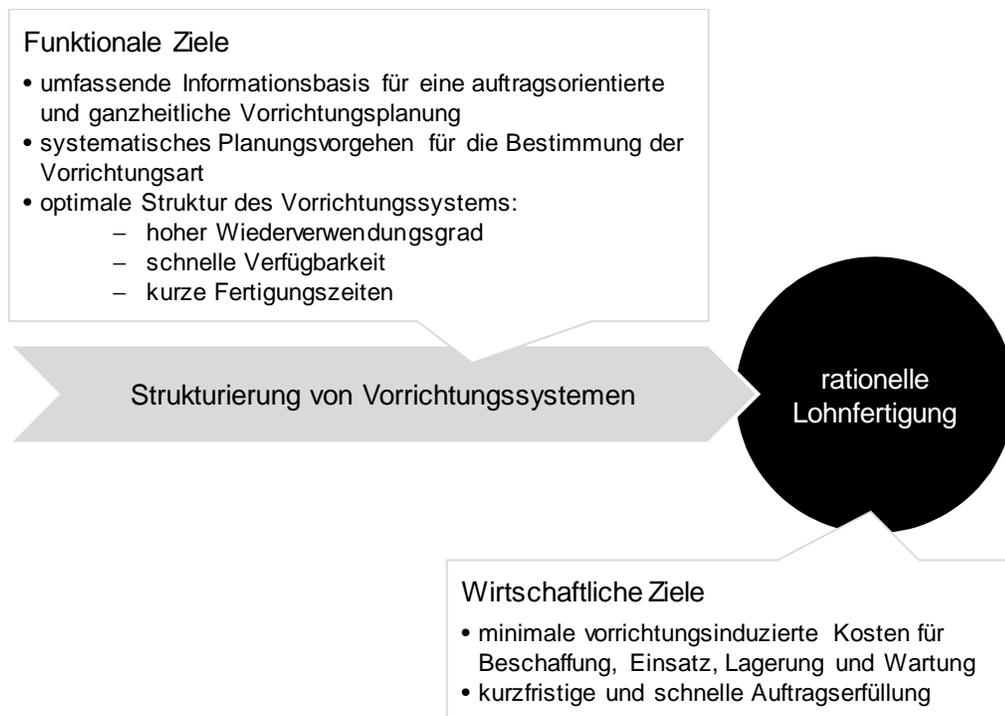


Abbildung 14: Konkretisierte Zielstellung dieser Arbeit

Das *funktionale Ziel* stellt ein Vorrichtungssystem dar, mit dessen Struktur aus Standard-, Baukasten-, Spezial- und flexiblen Vorrichtungen ein hoher Wiederverwendungsgrad, eine schnelle Verfügbarkeit und kurze Fertigungszeiten unter Einhaltung der Qualitätsstandards erreicht werden können. Für den Aufbau eines solchen Vorrichtungssystems sollen dem Vorrichtungsplaner eine umfassende Informationsbasis und ein systematisches Vorgehen zur Verfügung stehen, um im volatilen Umfeld der Lohnfertigung eine auftragsorientierte und zugleich ganzheitliche Vorrichtungsplanung durchführen zu können.

Die *wirtschaftlichen Ziele* eines optimal strukturierten Vorrichtungssystems sind abgeleitet aus den Wettbewerbsvorteilen eines Lohnfertigers und bestehen aus minimalen kumulierten vorrichtungsinduzierten Kosten aller Fertigungsaufträge und der Gewährleistung einer kurzfristigen und schnellen Auftragserfüllung.

### 2.4.4 Lösungsvorgehen

Die allgemeine Vorgehensweise dieser Untersuchung und der daraus folgende Aufbau der vorliegenden Arbeit wurden bereits in Abschnitt 1.4 (S. 7) vorgestellt. Mit Kenntnis der präzisen Zielstellung wird im Folgenden das konkrete Lösungsvorgehen dargestellt.

Die Zielsetzung erfordert die Entwicklung einer Planungsmethodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung. Die Analysen der Planungsprozesse im Vorrichtungswesen und der Auftragsstruktur in der Lohnfertigung zeigen, dass der Schwerpunkt solch einer Planungsmethodik auf der Datenbeschaffung und -analyse liegen muss, um dem Entscheider eine umfassende Informationsbasis zur Verfügung zu stellen. Das Lösungsvorgehen dieser Arbeit orientiert sich daher neben den allgemeinen Methoden der Problemlösung (VDI 2221) und des Systems Engineering (DAENZER 1989) an Methoden zur Entwicklung datenverarbeitender Systeme (HENNING & KUTSCHA 1994).

Das angewendete Vorgehen zur Methodikentwicklung (Abbildung 15) gliedert sich in

- die Aufstellung der Anforderungen (Kapitel 3, S. 43),
- den Entwurf von Teilproblemen und entsprechenden Teilzielen (Abschnitt 4.2, S. 47),
- die Auswahl und Strukturierung von Teillösungen zu einem Grobkonzept (ab Abschnitt 4.3, S. 51) und
- die abschließende Detaillierung der Methodik (Kapitel 5, S. 93).

Durch die Aufstellung der Anforderungen werden Randbedingungen und Bewertungskriterien für die Gesamt- und die Teillösungen der Methodik formuliert. Sie werden aus dem Anwendungsfeld der Methodik abgeleitet.

Die Vorgehensweise vom Entwurf über ein Grobkonzept zur Detaillierung basiert auf dem Grundsatz „Vom Groben ins Detail“. Zunächst werden Teilprobleme bzw. -ziele identifiziert, die als Funktionsmodule der Methodik auf hohem Abstraktionsgrad einen ersten Lösungsweg beschreiben. Die Funktionsmodule sollen möglichst unabhängig voneinander entwickelt werden können, um eine

fokussierte und weitgehend isolierte Lösung der Teilprobleme zu ermöglichen, ohne das Gesamtziel aus dem Blick zu verlieren.

Die Teillösungen werden schrittweise durch eine Teilziel- und Anforderungsformulierung und anschließende Synthese-, Analyse-, Bewertungs- und Auswahlprozesse ermittelt. Die auf diese Weise identifizierten Methoden und Modelle werden zu einem Grobkonzept zusammengefasst, mit dem der gesamte Planungsprozess beschrieben wird. In der Detaillierungsphase werden die Teillösungen ausgearbeitet und die allgemeinen Methoden und Modelle problemspezifisch angepasst.

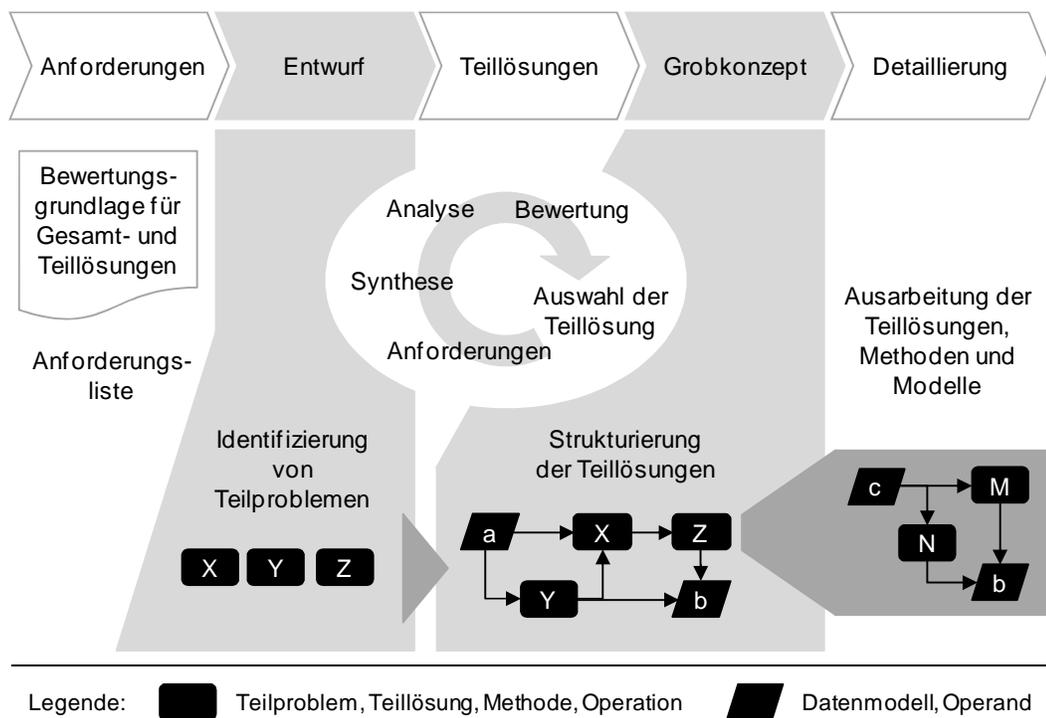


Abbildung 15: Vorgehen bei der Methodikentwicklung



## 3 Anforderungen an die Methodik

### 3.1 Allgemeines

Um eine zielgerichtete Methodikentwicklung zu gewährleisten, werden in diesem Kapitel forschungsleitende Randbedingungen und Anforderungen formuliert. Dadurch wird eine Grundlage für die Bewertung möglicher Teillösungen und der Gesamtlösung geschaffen. Die Randbedingungen und Anforderungen werden aus dem Anwendungsfeld der Methodik abgeleitet, das durch das Geschäftsmodell der Lohnfertigung, die eingesetzten Produktionsmittel und die Prozesse der Arbeitsplanung bestimmt wird.

### 3.2 Lohnfertigung

Die Lohnfertigungsbranche besteht überwiegend aus kleinen Unternehmen (EIGNER & FAIBT 2009; GRIENITZ ET AL., S. 51) mit entsprechend begrenzten Finanz- und Wissensressourcen in der Arbeitsplanung und im Vorrichtungsbau. Bei der Entwicklung der Methodik soll daher beachtet werden, dass der *initiale Kapitaleinsatz* zur Umsetzung und Einführung der Methodik und das *methodenspezifische Wissen* zur betrieblichen Anpassung und Anwendung möglichst gering gehalten werden.

Die Unternehmen der Lohnfertigung bieten sehr unterschiedliche Fertigungskompetenzen am Markt an, von allgemeinen Zerspanungsdienstleistungen bis hin zu speziellen Fertigungstechnologien (SCHMIDT 2007). Damit die Methodik breit einsetzbar ist, muss sie eine *allgemeingültige* und an die betrieblichen Randbedingungen *anpassbare Lösung* bereitstellen. Der Detaillierungsgrad der Methodik soll den Methodenplaner der Arbeitsvorbereitung befähigen, auf Basis der vorgestellten allgemeinen Lösung ein betriebspezifisches Planungsvorgehen zu entwickeln.

Das Geschäftsmodell eines Lohnfertigers besteht u. a. darin, als Zulieferer Teile oder Baugruppen von Endproduktherstellern zu fertigen. Statt eines plan- und eingrenzbareren Produktionsprogramms muss die Lohnfertigung ein breit gefächertes Auftragsportfolio einer Vielzahl an Kunden in kurzen Durchlaufzeiten verarbeiten (SCHMIDT 2007). Das Auftragspektrum ist zudem einem stetigen Wandel unterworfen, da sich ein Lohnfertiger kontinuierlich und reaktionsschnell an geänderte Marktsituationen anpassen muss, will er eine konstant hohe Nachfragesituation halten (WILDEMANN 2008, S. 217 ff.). Für einen umfassenden Einsatz

muss die Methodik daher *flexibel* auf das gesamte Auftragsspektrum eines Lohnfertigers *anwendbar* und *aufwandsarm* für ein sich änderndes Auftragsspektrum *erweiterbar* sein.

Das übergeordnete wirtschaftliche Ziel dieser Methodik ist die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit eines Lohnfertigers durch eine schnellere und günstigere Auftragserfüllung. Das Vorrichtungswesen kann die Erreichung dieses Ziels durch die kurzfristige Verfügbarkeit geeigneter Vorrichtungen, die Ermöglichung kurzer Taktzeiten und durch geringe vorrichtungsinduzierte Auftragskosten unterstützen. Diese Teilziele können nur durch eine Vorrichtungsplanung verfolgt werden, die auftragsbezogen und zugleich ganzheitlich ausgerichtet ist. Der Vorrichtungsplaner strebt grundsätzlich an, die für den aktuellen Auftrag anfallenden Vorrichtungskosten zu minimieren. Um zusätzlich vorrichtungsinduzierte Kosten zu reduzieren, ist eine ganzheitliche Perspektive auf zukünftige Fertigungsaufträge erforderlich, die das langfristige, auftragsübergreifende Rationalisierungspotential wiederverwendbarer Vorrichtungen im Blick hat. Aufgrund des transienten und damit zum Teil unsicheren Auftragsportfolios muss diese *ganzheitliche Planung mit jedem neuen Auftrag* durchgeführt werden, um den neuen Kenntnisstand über die zukünftigen Aufträge berücksichtigen zu können. Die aus diesem Vorgehen resultierenden Anforderungen an die Planungsergebnisse werden im folgenden Abschnitt unter Berücksichtigung der eingesetzten Fertigungsanlagen hergeleitet.

### 3.3 Produktionsmittel

In der Lohnfertigung werden neben klassischen Ein-Technologie-Maschinen vermehrt Universalmaschinen eingesetzt, die mehrere Fertigungstechnologien in sich vereinen und daher sehr gut für die Bearbeitung verschiedenster Fertigungsaufträge geeignet sind (LÜTJENS 2008). Die Kombinationsbearbeitung auf diesen Maschinen stellt hohe funktionale Anforderungen an die eingesetzte Vorrichtung, da diese die maximalen Anforderungen der einzelnen Bearbeitungsschritte erfüllen und zusätzlich deren Verkettung ermöglichen muss. Die Verkettung erfolgt durch die Herstellung der vom nachfolgenden Prozessschritt geforderten räumlichen Anordnung des Werkstücks. Die Anforderungen der Kombinationsbearbeitung bestehen folglich in einer *Prozess-* und der *kinematischen Flexibilität* der Vorrichtungsfunktionen.

Um zusätzlich den Rationalisierungseffekt eines hohen Wiederverwendungsgrads zu nutzen, müssen die Vorrichtungen darüber hinaus auch die *Anforderungen unterschiedlicher Werkstückgeometrien* erfüllen. Dies kann neben einer fle-

xiblen auch durch eine rekonfigurierbare Ausführung der Vorrichtungsfunktionen erreicht werden, wodurch eine Vorrichtung zwischen zwei Fertigungsaufträgen durch den Austausch von Funktionsträgern an neue Anforderungen angepasst werden kann.

### 3.4 Arbeitsplanung

Bei der Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung der Vorrichtungsplanung müssen die betrieblichen Arbeitsplanungsprozesse berücksichtigt werden, um eine reibungslose Integration sicherzustellen. Hierfür sind die Schnittstellen der Methodik mit den betrieblichen Prozessen zu klären und funktionale Anforderungen aufzustellen, durch die der zusätzliche Planungsaufwand minimiert wird.

Die Anwendung der Methodik erfolgt für jeden neuen Fertigungsauftrag im Rahmen der Fertigungsmittelplanung eines Lohnfertigers. Die Eingangsschnittstellen bestehen daher zur *Arbeitsplanerstellung* und zum *Vertrieb*, die einerseits die Auftragsdaten und den Arbeitsplan für die anstehenden Planungsaufgaben und andererseits Informationen über das zukünftige Auftragsportfolio als Grundlage für die langfristige Vorrichtungsplanung zur Verfügung stellen. Die Ausgangsschnittstellen bestehen mit der *Kostenplanung*, die von der Methodik die erforderlichen Informationen für die nachhaltige Bestimmung der Beschaffungsart erhält, und mit dem *Vorrichtungsbau*, der im Falle einer Neukonstruktion über die Funktionalität und die wirtschaftlichste Ausführungsart der Vorrichtung informiert wird.

Die Effizienz der zu entwickelnden Methodik zeigt sich in einem möglichst geringen Zusatzaufwand zur konventionellen Vorrichtungsplanung. Sie soll daher die bereits *vorhandenen Abläufe und Ressourcen* so weit wie möglich nutzen und wenig *zusätzliches Wissen, Arbeitsleistung* und *technische Ressourcen* in Anspruch nehmen. Dies ist grundsätzlich durch die Verwendung von in der Praxis etablierten Planungsmethoden und -modellen, den Einsatz marktgängiger Standardsoftware für die DV-technische Umsetzung und die Nutzung von neutralen Datenformaten möglich, die eine flexible Verarbeitung unterschiedlicher Eingangsinformationen erlauben. Neue, methodikspezifische Prozesse sollen aus Effizienzgründen so weit automatisiert werden, wie es die geforderte Flexibilität zulässt.

### 3.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Die in den vorangehenden Abschnitten aus dem Anwendungsfeld hergeleiteten Anforderungen an die Methodik werden in Abbildung 16 zusammengefasst. Sie beziehen sich auf die Eingangsdaten und Ressourcen, die Vorgehensweise und die Ergebnisse der zu entwickelnden Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung. Damit liegen alle Informationen vor, um im nachfolgenden Kapitel 4 das Konzept der zur entwickelnden Methodik aufzustellen.

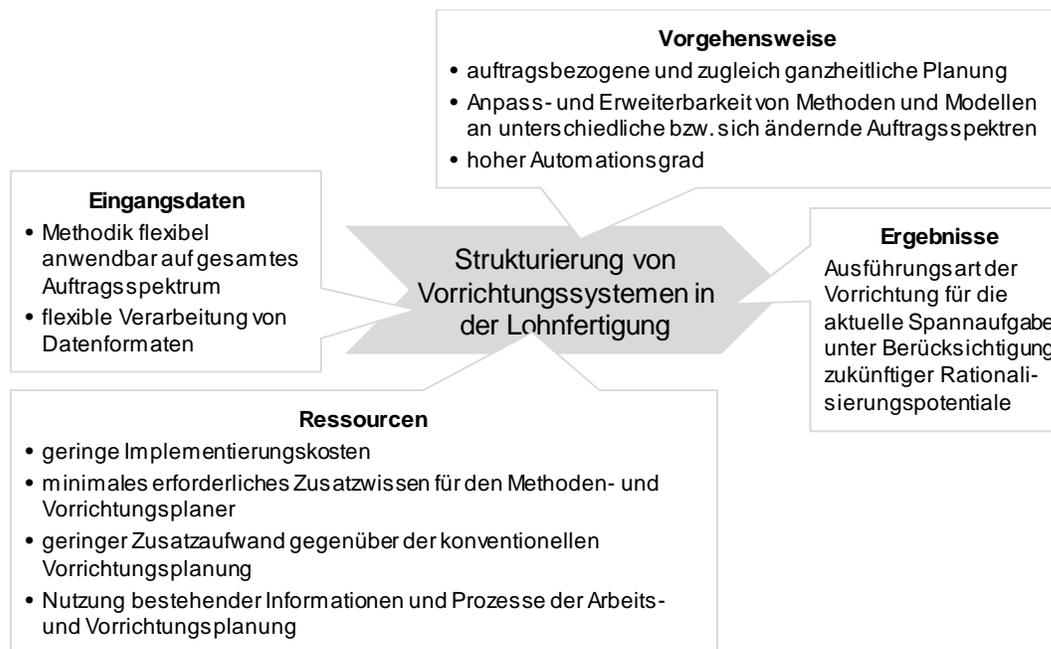


Abbildung 16: Anforderungen an eine Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung

## 4 Konzeption der Methodik

### 4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird das Konzept für die Strukturierung eines Vorrichtungssystems in der Lohnfertigung erarbeitet. Dies erfolgt auf Basis der in den vorhergehenden Kapiteln formulierten Ziele, Randbedingungen und Anforderungen und mit den Erkenntnissen aus der in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchung des Vorrichtungswesens.

Das Konzept einer Methodik legt dar, wie und womit, d. h. mit welchen Methoden, Modellen und Ressourcen, die angestrebten Ziele erreicht werden sollen. Auf dem Weg zum Methodikkonzept wird im folgenden Abschnitt zunächst ein Entwurf erarbeitet, der das Planungsproblem in seine Teilprobleme zerlegt und grob strukturiert. In den darauf folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Teillösungen erarbeitet und abschließend in einem Konzept zusammengeführt. Die detaillierte Ausgestaltung dieses Lösungswegs erfolgt in Kapitel 5 (S. 93).

### 4.2 Entwurf der Methodik

Die für das formulierte Planungsproblem zu lösenden Teilprobleme können von der allgemeinen Vorgehensweise zur Fertigungsmittelplanung bzw. Strukturplanung eines Produktionssystems abgeleitet werden (Abbildung 17). Dabei werden ausgehend von der Beschreibung aller Fertigungsaufgaben sinnvolle, technologische Teilegruppen gebildet, denen anforderungsgerechte Fertigungsmittel mit teilgruppenspezifischen Eigenschaften, wie Kapazität und Flexibilität, zugeordnet werden (EVERSHEIM 1999, S. 10-36 ff.).

Dieser Planungsprozess ermittelt die Struktur und die Eigenschaften der Fertigungsmittel in einem Schritt und setzt damit voraus, dass das zukünftige Produktionsprogramm und seine zeitliche Entwicklung in ihrer Gesamtheit vorhersehbar sind. Eine solche Informationsbasis kann in der Lohnfertigung nicht vorausgesetzt werden, so dass ein singulärer, ganzheitlicher Planungsprozess als Lösungsansatz zur Strukturierung eines Vorrichtungssystems nicht geeignet ist. Stattdessen muss ein ganzheitlicher Ansatz fest in die auftragspezifische Vorrichtungplanung integriert werden, um

- schrittweise mit jedem neuen Fertigungsauftrag sowie
- ganzheitlich und vorausschauend

die Strukturierung eines Vorrichtungssystems zu unterstützen. Unter Berücksichtigung der Forderung nach einer auftragsorientierten Vorgehensweise lassen sich die in Abbildung 17 dargestellten Teilprobleme der Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung aus dem konventionellen Ablauf der Fertigungsmittelplanung ableiten.



Abbildung 17: Ableitung der Aufgaben einer Methodik zur auftragsorientierten Strukturierung eines Vorrichtungssystems in der Lohnfertigung

Die Teilprobleme werden im Folgenden in einen geeigneten Planungsablauf eingeordnet, der den Entwurf der Methodik bildet (Abbildung 18). Dies erfolgt rückwärtsgerichtet, beginnend mit den Ergebnissen der Methodik, um den Entwurfsprozess transparent darzustellen.

Die Methodik soll die Bestimmung der Vorrichtungsart im Rahmen der auftragspezifischen Vorrichtungsplanung unterstützen. Abstrahiert gesehen stellt diese Aufgabe ein *Entscheidungsproblem* dar, für das ein geeignetes Vorgehen gesucht wird (Abschnitt 4.3, S. 51). Ein Entscheidungsprozess kann in die Schritte

1. Problemformulierung,
2. Präzisierung des Zielsystems,
3. Erforschung der Handlungsalternativen,
4. Auswahl einer Alternative und
5. Entscheidungen in der Realisierungsphase

unterteilt werden (LAUX 2007, S. 8). Neben der Entwicklung eines allgemeingültigen Entscheidungsverfahren liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem dritten Schritt dieser Systematik, der Erforschung der Handlungsalternativen. In der Vorrichtungsplanung bestehen diese aus den verschiedenen Vorrichtungsarten. Ihre Identifizierung ist nur anhand entscheidungsrelevanter Informationen möglich, die bei einer auftragsbezogenen und ganzheitlichen Vorrichtungsplanung aus dem aktuellen Fertigungsauftrag und den zukünftigen Fertigungsaufträgen

bestehen, deren vorrichtungsimduzierte Fertigungskosten und -zeiten durch die aktuelle Entscheidung potentiell beeinflusst werden.

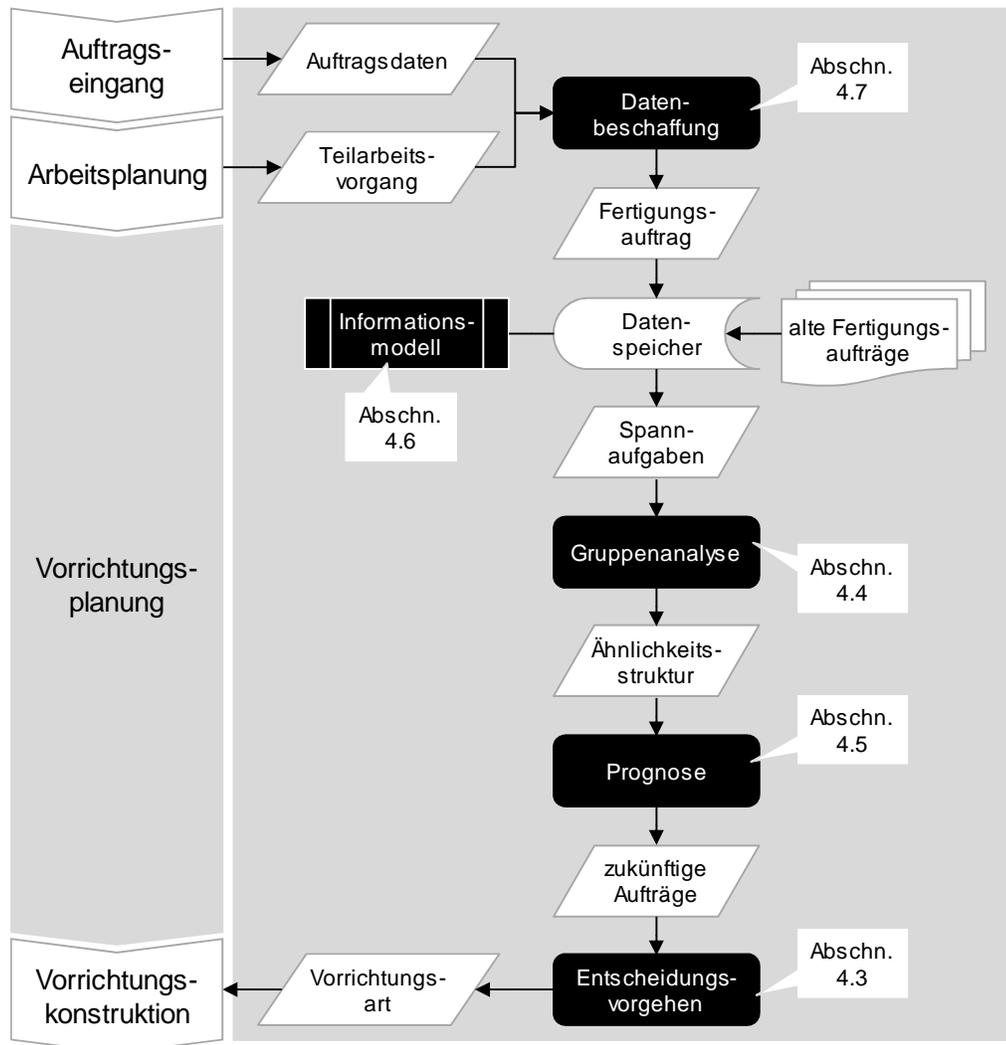


Abbildung 18: Entwurf einer Methodik zur auftragsorientierten Strukturierung eines Vorrichtungssystems in der Lohnfertigung, Darstellung als Datenflussplan nach DIN 66001

Um diese entscheidungsrelevanten Informationen bereitzustellen, muss die Methodik ein Abbild des zukünftigen Auftragsportfolios erzeugen und diejenigen Fertigungsaufträge bzw. Spannaufgaben identifizieren, die in Bezug auf den aktuellen Auftrag ein Rationalisierungspotential aufweisen. Dies entspricht der *Gruppierung von Spannaufgaben* (Abschnitt 4.4, S. 57), die mit der gleichen Vorrichtung erfüllt werden können wie die aktuelle Spannaufgabe. Statt auf ein prognostiziertes Gesamtportfolio an Fertigungsaufträgen soll das zu entwickelnde Gruppierungsverfahren auf die zurückliegenden Fertigungsaufträge bzw.

Spannaufgaben angewendet werden. Diesem Vorgehen liegt die Prämisse zugrunde, dass die Gesamtheit zurückliegender Fertigungsaufträge eine hinreichend genaue Basis für die Prognose zukünftiger Auftragseingänge darstellt. Auf diese Weise erfolgt zunächst eine Eingrenzung entscheidungsrelevanter Fertigungsaufträge, die anschließend die Grundlage für eine fokussierte und damit effiziente *Prognose zukünftiger Fertigungsaufträge* (Abschnitt 4.5, S. 69) bilden.

Für das Gruppierungsvorgehen muss eine Datenbasis vorhanden sein, mit der die zurückliegenden Fertigungsaufträge und deren Spannaufgaben abgebildet werden. Hierfür ist ein *Informationsmodell* (Abschnitt 4.6, S. 74) zu entwickeln, das den Anforderungen der Gruppierungsmethode entspricht und die spanntechnische Ähnlichkeit der Spannaufgaben beschreibt.

Der Aufbau dieser Datenbasis erfolgt schrittweise mit jedem neuen Fertigungsauftrag. Aufgrund der Komplexität der Spannaufgabe kann die Datenmenge zu deren Beschreibung ein großes Ausmaß erreichen. Es ist daher ein Vorgehen zur *Datenbeschaffung* (Abschnitt 4.7, S. 83) zu entwickeln, mit dem die Datensätze neuer Fertigungsaufträge effizient instanziiert werden können. Die Grundlage für die Datenbeschaffung bilden der Arbeitsplan und die weiteren Daten des aktuellen Auftrags. D. h. die Teilarbeitsvorgänge werden nicht im Rahmen dieser Methodik bestimmt, sondern als Eingangsinformation aus der Arbeitsplanung verarbeitet.

Zusammengefasst bestehen die zu lösenden *Teilprobleme der Methodik* in

- der Datenbeschaffung für den aktuellen Auftrag,
- der Abbildung des Auftrags und seiner Spannaufgabe(n) durch ein Informationsmodell,
- der Gruppenanalyse zurückliegender Spannaufgaben,
- der gruppenspezifischen Auftragsprognose und
- einem Entscheidungsverfahren zur Bestimmung der jeweiligen Vorrichtungsart für die Spannaufgaben.

Diese fünf Teilprobleme bilden die in Abbildung 18 dargestellte grobe Struktur der zu entwickelnden Planungsmethodik. In den folgenden Abschnitten werden die entsprechenden Teillösungen erarbeitet und abschließend in ein Gesamtkonzept überführt.

## 4.3 Entscheidungsvorgehen

### 4.3.1 Überblick

Das zu entwickelnde Entscheidungsvorgehen soll dem Vorrichtungsplaner anhand eines systematischen Ablaufs aufzeigen, wie die Vorrichtungsort für den aktuellen Fertigungsauftrag unter Berücksichtigung zukünftiger Aufträge bestimmt werden kann. In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Entscheidungssituation in der Lohnfertigung analysiert, um anschließend geeignete Entscheidungsabläufe bewerten zu können. Abschließend werden das Konzept des ausgewählten Entscheidungsvorgehens und dessen Integration in die Gesamtmethodik beschrieben.

### 4.3.2 Charakterisierung der Entscheidungssituation

Ein Entscheidungsproblem kann grundsätzlich beschrieben werden durch eine Zielfunktion und ein Entscheidungsfeld, das sich aus Handlungsalternativen, Ergebnissen und Umweltzuständen zusammensetzt (LAUX 2007, S. 19 ff.). An diesen vier Basiselementen des Entscheidungsmodells orientiert sich die folgende Analyse der Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung (Abbildung 19).

Der Vorrichtungsplaner in der Lohnfertigung soll über den Vorrichtungseinsatz eines aktuellen Fertigungsauftrags unter Berücksichtigung der *Zielfunktion* entscheiden, dass die *vorrichtungsinduzierten Herstellkosten* des aktuellen Fertigungsauftrags und weiterer, von der Entscheidung abhängiger Aufträge minimiert sind und die *Vorrichtungsverfügbarkeit* für zukünftige Aufträge maximiert ist. Da diese beiden Zielgrößen nicht in einem arithmetischen Verhältnis zueinander stehen, handelt es sich um ein mehrwertiges Entscheidungsproblem (GRÜNIG & KÜHN 2006, S. 15), bei dem die Zielgrößen anwendungsspezifisch zu gewichten sind, um eine Vergleichbarkeit der Handlungsalternativen herzustellen.

Unter Berücksichtigung dieser Zielsetzung besteht die Aufgabe der Vorrichtungsplanung darin, eine geeignete Vorrichtung für den aktuellen Fertigungsauftrag zu bestimmen. Die Kosten und die Verfügbarkeit einer Vorrichtung werden wesentlich durch ihre Funktionen und deren Ausführungsarten bestimmt. Sie stellen die generischen Aktionsvariablen dar, aus denen im Rahmen der Vorrichtungsplanung sinnvolle *Entscheidungsalternativen* erarbeitet werden müssen. Diese können einerseits in

- dem Verzicht auf den Vorrichtungseinsatz oder in
- der Wiederverwendung bzw. Anpassung einer vorhandenen Vorrichtung

bestehen (vgl. Abschnitt 2.2.3, S. 14). Andererseits kann der Vorrichtungsplaner entscheiden, eine neue Vorrichtung mit einer bestimmten Funktionalität zu beschaffen. Um die Anzahl der Entscheidungsalternativen sinnvoll einzugrenzen, wird im Rahmen dieser Untersuchung die klassische Gliederung der Vorrichtungsarten in

- Spezialvorrichtungen,
- Standardvorrichtungen,
- flexible Vorrichtungen und
- Baukastenvorrichtungen

für die Abgrenzung unterschiedlicher Ausführungsarten verwendet. Diese Vorrichtungsarten decken mit ihren typspezifischen funktionalen Eigenschaften das gesamte Aktionsfeld des Vorrichtungsplaners ab und verfügen über ausreichend Freiheitsgrade, um die technischen Bedingungen der Spannaufgaben und die wirtschaftlichen Forderungen nach geringen Kosten und einer hohen Verfügbarkeit zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 12).

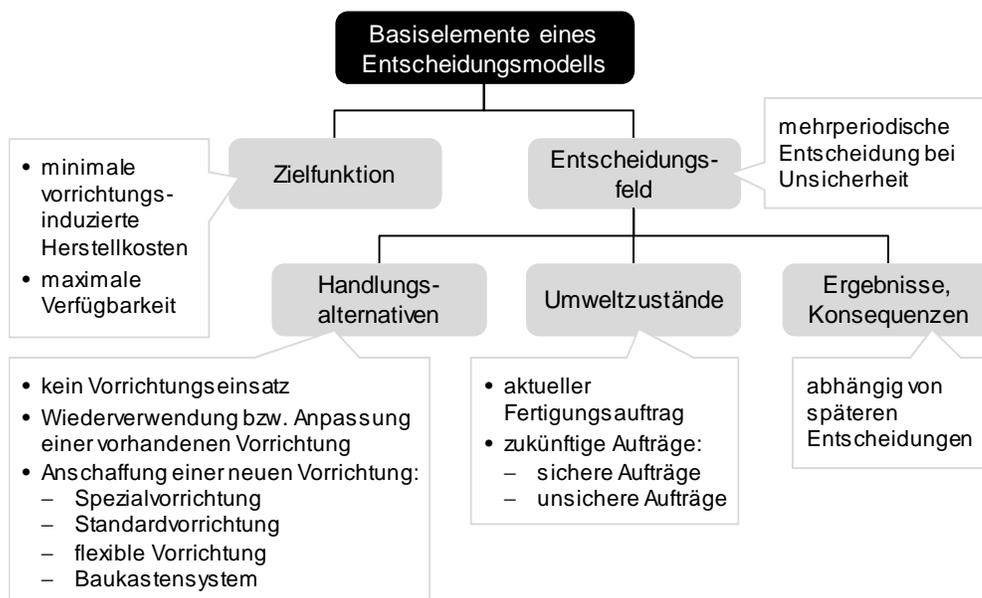


Abbildung 19: Entscheidungssituation der Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung; Strukturmodell nach LAUX (2007, S. 20)

Der Vergleich alternativer Vorrichtungsarten erfolgt anhand ihrer *Konsequenzen* bzw. *Ergebnisse*, die mit Hilfe der Zielfunktion ermittelt werden müssen. Die Konsequenzen einer Vorrichtungsalternative sind neben den Vorrichtungseigenschaften auch abhängig vom sogenannten *Umweltzustand*, der durch den Vorrichtungsplaner nicht beeinflusst werden kann. Im vorliegenden Entscheidungs-

problem besteht der Umweltzustand aus denjenigen Spannaufgaben, für die die zu planende Vorrichtung zukünftig eingesetzt werden kann.

Wesentlich für die Charakterisierung dieses Entscheidungsproblems ist die Erwartungsstruktur des Vorrichtungsplaners hinsichtlich des zukünftigen Umweltzustands. Grundsätzlich können die Informationen des Umweltzustands dem Entscheider mit Sicherheit oder mit Unsicherheit bekannt sein (LAUX 2007, S. 22 f.). Der aktuelle Fertigungsauftrag bildet eine sichere Informationsbasis für die anstehende Entscheidung, die zukünftigen Aufträge sind jedoch mit mehr oder weniger Unsicherheit behaftet. Dieses Risiko der prognostizierten Fertigungsaufträge muss das zu entwickelnde Entscheidungsvorgehen bei der Bestimmung der Vorrichtungsart berücksichtigen.

Ein weiteres Merkmal der vorliegenden Entscheidungssituation besteht darin, dass die für den aktuellen Auftrag getroffene Entscheidung nicht nur zu Konsequenzen, sondern auch zu weiteren, bereits absehbaren Entscheidungen führen kann. Zwischen der Planung für einen aktuellen Auftrag und zukünftigen Planungssituationen kann eine Abhängigkeit bestehen, indem die Entscheidung für eine Beschaffungsart den Handlungsspielraum bei späteren Fertigungsaufträgen beeinflusst. Beispielsweise kann die Beschaffung eines neuen Baukastensystems erst die Bearbeitung eines kurzfristigen, zukünftigen Auftrags ermöglichen, für den ansonsten keine Vorrichtung verfügbar wäre. Eine Abhängigkeit besteht auch, wenn der wirtschaftliche Erfolg der aktuellen Entscheidung von zukünftigen Planungsergebnissen abhängt. So ist die Beschaffung einer neuen flexiblen Vorrichtung erst durch die spätere Wiederverwendung wirtschaftlich gerechtfertigt.

Wäre das zukünftige Auftragsportfolio mit Sicherheit bekannt, dann könnten alle voneinander abhängigen Entscheidungen in einem Planungsschritt getroffen werden. Aufgrund der unsicheren Auftragsentwicklung in der Lohnfertigung ist dies aber nicht möglich. Die Entscheidungstheorie bezeichnet solch eine Situation als *Entscheidungssequenz* bzw. *mehrperiodische Entscheidung bei Unsicherheit* (LAUX 2007, S. 283; GRÜNIG & KÜHN 2006, S. 203; SCHIEMENZ & SCHÖNERT 2005, S. 68).

### 4.3.3 Synthese und Bewertung von Entscheidungskonzepten

Bestehen bei einem mehrperiodischen Entscheidungsproblem Unsicherheiten, müssen neben dem Risiko der Umweltentwicklung auch die Alternativen und Konsequenzen zukünftiger, absehbarer Entscheidungen berücksichtigt werden, um bei der aktuell anstehenden Planung die richtige Wahl zu treffen (GRÜNIG &

KÜHN 2006, S. 203). Nach LAUX (2007, S. 308) erfüllen zwei Planungskonzepte diese Anforderung:

- die flexible Planung und
- die starre, rollierende Planung.

Die *flexible Planung* ist ein stochastisches Entscheidungsverfahren, das nur für die aktuelle Entscheidung eine endgültige Maßnahme trifft, alle nachfolgenden Entscheidungen aber durch ein System aus Eventualplänen berücksichtigt (Abbildung 20). Diese Eventualpläne bilden die gesamte Entscheidungssequenz ab und beschreiben

- die zukünftige Umweltentwicklung in Form von Szenarien mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten,
- die Handlungsalternativen jeder Entscheidung und
- die Gesamtkonsequenzen jedes möglichen Entscheidungsverlaufs.

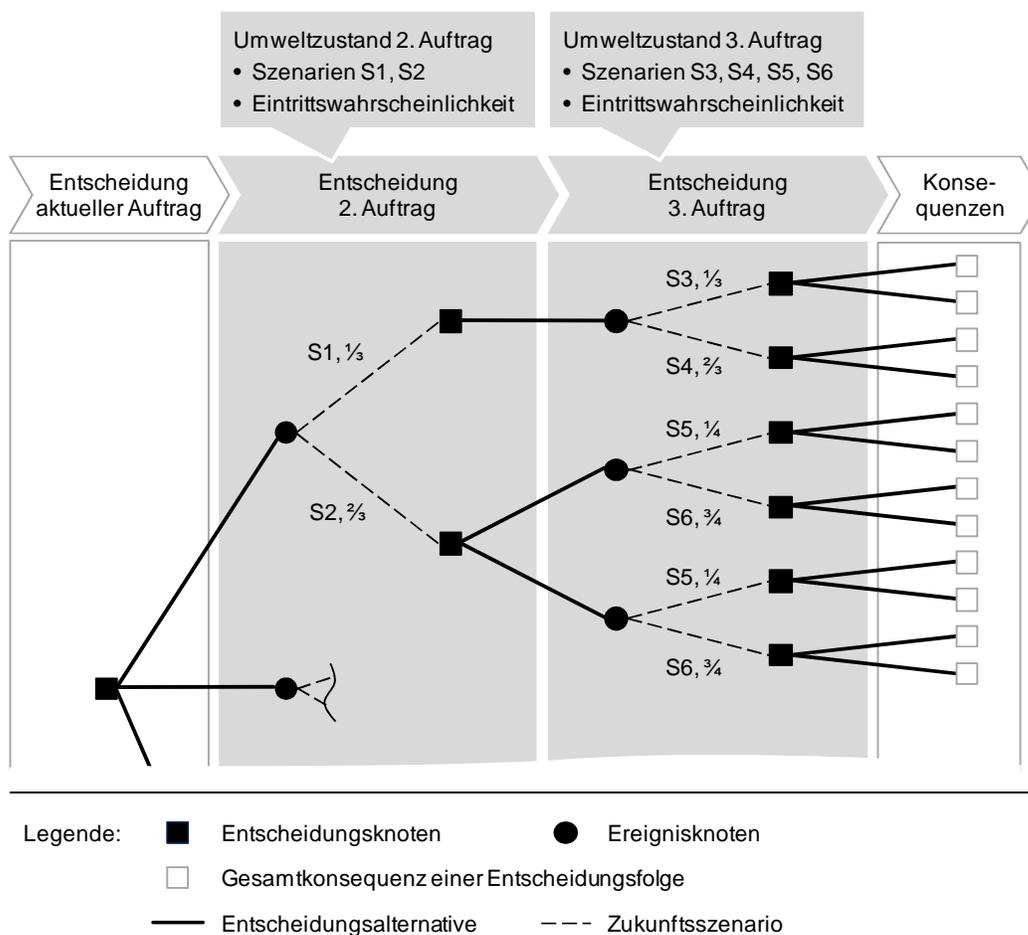


Abbildung 20: Konzept der flexiblen Planung am Beispiel von drei aufeinanderfolgenden Fertigungsaufträgen

Das Konzept der flexiblen Planung zeichnet sich durch eine realitätsnahe Abbildung der Entscheidungssequenz aus und kann daher detailliert die Konsequenzen aktueller und zukünftiger Entscheidungen berücksichtigen. Eine Übertragung dieses Konzepts auf die Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung ist jedoch nur bedingt möglich. So ist die Reihenfolge der Fertigungsaufträge kaum vorhersehbar, so dass der zeitliche Ablauf der Entscheidungssequenz nur selten bestimmt werden kann. Zudem ist der Aufwand für die Modellformulierung und -auswertung kritisch zu betrachten. Er hängt von der Anzahl der zu berücksichtigenden Fertigungsaufträge und ihrer jeweiligen Entscheidungsalternativen ab. Die möglichen Beschaffungsarten könnten zwar sinnvoll eingegrenzt werden, doch die gesonderte Betrachtung jedes Fertigungsauftrags mit seinen möglichen Umweltzuständen führt schnell zu einer sehr hohen Anzahl an alternativen Entscheidungsfolgen, die sich mit jedem zusätzlichen Fertigungsauftrag vervielfacht und den Aufwand überproportional ansteigen lässt.

Hier setzt das Konzept der *starrten, rollierenden Planung* an. Ebenso wie die flexible Planung bezieht es die Konsequenzen zukünftiger Entscheidungen in die aktuelle Planung mit ein. Der Unterschied liegt in der Berücksichtigung der Umweltentwicklung. Die starre, rollierende Planung ist ein deterministisches Verfahren, das die prognostizierten Umweltzustände zur Vereinfachung des Entscheidungsprozesses zu einem einzigen – i. d. R. dem wahrscheinlichsten – Szenario vereint und als quasi sicher annimmt. So kann die Entscheidungssequenz auf zwei Schritte reduziert werden, die nach der aktuellen Entscheidung alle relevanten zukünftigen Entscheidungen im zweiten Entscheidungsschritt zusammenfassen (Abbildung 21). Die Vernachlässigung des Risikos der Umweltentwicklung wird durch die Möglichkeit der Planrevision teilweise kompensiert. Die Aktionspläne neuer und zukünftiger Fertigungsaufträge können somit im Zeitablauf immer wieder der realen Umweltentwicklung angepasst werden.

Der Modellierungs- und Lösungsaufwand sinkt durch diese Vereinfachung erheblich. Die weniger detaillierte Abbildung der Zukunftserwartungen bei der starren, rollierenden Planung kann, muss aber nicht zu annähernd guten Ergebnissen wie die flexible Planung führen (LAUX 2007, S. 310). Ein potentieller Nachteil dieses effizienten Entscheidungsverfahrens ist, dass der zukünftige Entscheidungsspielraum eingeschränkter ist als bei der Anwendung der flexiblen Planung.

### 4.3.4 Konzept des Entscheidungsvorgehens

Die Bestimmung der Vorrichtsart für einen neuen Fertigungsauftrag soll, wie in Abbildung 21 dargestellt, basierend auf dem Konzept der starren, rollierenden

Planung durchgeführt werden, da dieses Verfahren im Vergleich zur flexiblen Planung effizienter anwendbar und aufgrund des in der Lohnfertigung begrenzten Informationsstands dort breiter einsetzbar ist.

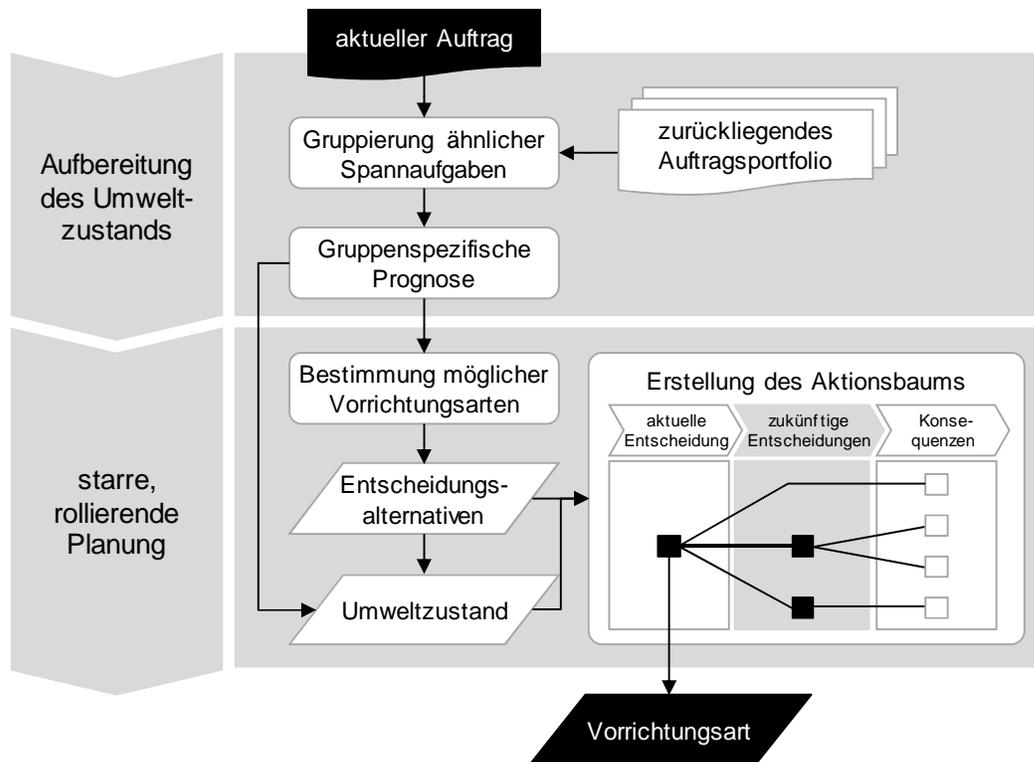


Abbildung 21: Bestimmung der Vorrichtungsart nach dem Konzept der starren, rollierenden Planung

Bei Anwendung dieses Planungskonzepts bestimmt der Vorrichtungsplaner die Vorrichtungsart für den aktuellen Fertigungsauftrag unter Berücksichtigung aller vorhersehbaren, entscheidungsrelevanten Fertigungsaufträge. Hierfür werden zunächst die aktuelle Spannaufgabe und zurückliegende Spannaufgaben nach Ähnlichkeit gruppiert und anschließend als Basis für eine auftragsspezifische Prognose zukünftiger Fertigungsaufträge verwendet. Die auf diese Weise ermittelten zukünftigen Spannaufgaben bilden gemeinsam mit der aktuellen Spannaufgabe eine Informationsbasis, aus der die aktuelle Entscheidungssituation modelliert werden kann.

Die Entscheidungsalternativen ergeben sich für den Vorrichtungsplaner durch eine wirtschaftlich-technische Einsatzbewertung der vorhandenen und potentiell neu zu beschaffenden Vorrichtungen. Der Einsatzbereich dieser Vorrichtungsalternativen legt zugleich den Umweltzustand, d. h. die für die aktuelle Planungsaufgabe relevanten zukünftigen Spannaufgaben, fest.

Mit der Kenntnis des Umweltzustands und der Vorrichtungsalternativen dieser Entscheidungssequenz wird der Aktionsbaum erstellt, der im ersten Schritt die Vorrichtungsalternativen der aktuellen Spannaufgabe und im zweiten Schritt die davon abhängigen Vorrichtungen für die zukünftigen Spannaufgaben beschreibt. Auf diese Weise erhält der Vorrichtungsplaner eine Übersicht über seine möglichen Aktionspfade, die er anhand definierter Zielgrößen vergleicht, um die Vorrichtungsart für die aktuelle Spannaufgabe ganzheitlich zu bestimmen.

## **4.4 Gruppenanalyse**

### **4.4.1 Überblick**

Die Gruppenanalyse verfolgt zusammen mit der darauf folgenden Auftragsprognose das Ziel, den Umweltzustand der jeweiligen Planungssituation und somit diejenigen zukünftigen Spannaufgaben zu identifizieren, die möglicherweise mit der gleichen Vorrichtung erfüllt werden können. Die Aufgabe des Gruppierungsverfahrens ist es dabei, aus der Gesamtheit aller Spannaufgaben eine Aufteilung zu ermitteln, die als Basis für eine zielgerichtete Auftragsprognose dient.

### **4.4.2 Randbedingungen und Anforderungen der Gruppenanalyse**

Abstrakt betrachtet wird ein Verfahren gesucht, das für eine Menge an Objekten eine zweckgebundene Aufteilung ermittelt, in der die Objekte einer Gruppe einander möglichst ähnlich und die Objekte in unterschiedlichen Gruppen einander möglichst unähnlich sind. Dieses Gruppierungsproblem wird im Folgenden anhand der Eigenschaften der Gruppierungsobjekte und anhand des Verwendungszwecks des Gruppierungsergebnisses charakterisiert (Abbildung 22), um die Randbedingungen und Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren abzuleiten.

Die *Objekte des Gruppierungsproblems* sind Spannaufgaben, deren Beschreibung durch den Gruppierungszweck bestimmt wird. Dieser besteht in der Identifizierung von Spannaufgaben, die das Potential aufweisen, mit der gleichen Vorrichtung erfüllt zu werden. Solch eine Vorrichtung muss allen funktionalen Anforderungen genügen, die durch die verschiedenen Spannaufgaben gestellt werden. Daraus folgt, dass die Ähnlichkeit von Spannaufgaben im Sinne der Gruppierungsaufgabe durch die funktionalen Anforderungen an eine Vorrichtung festgelegt wird.

Die funktionalen Anforderungen können unterteilt werden in Anforderungen an das Bestimmen, Stützen, Spannen und Bewegen eines Bauteils, Anforderungen an die technische Realisierung sowie an die qualitative und wirtschaftliche Optimierung der Fertigungsprozesse (vgl. Abschnitt 2.2.1, S. 9). Diese Anforderungen wiederum leiten sich aus Eigenschaften der zu fertigenden Werkstücke und der Fertigungsprozesse sowie aus betriebsorganisatorischen Auftragsdaten ab (VDI 1992, S. 62 f.). Das Beschreibungsmodell einer Spannaufgabe muss also werkstück-, prozess- und auftragsspezifische Objektmerkmale enthalten, damit die Ähnlichkeit von Spannaufgaben ermittelt werden kann.

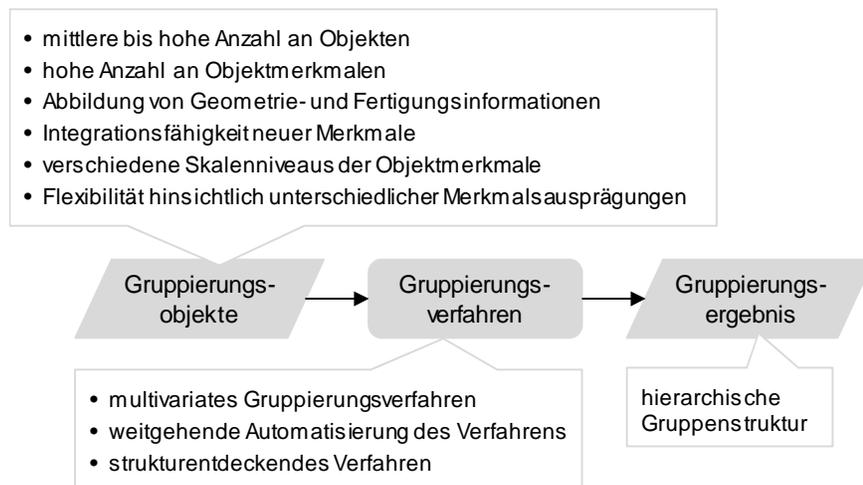


Abbildung 22: Randbedingungen und Anforderungen eines Verfahrens zur Gruppierung von Spannaufgaben in der Lohnfertigung

Eine solche detaillierte Objektbeschreibung erfordert ein *multivariates Gruppierungsverfahren*, um die Vielzahl an Merkmalen berücksichtigen zu können (HANDL 2002, S. 22, ff.). Werden zusätzlich die stetig steigende Zahl an Objekten aufgrund neuer Fertigungsaufträge und die häufige Anwendung der Gruppenanalyse bei jedem neuen Fertigungsauftrag berücksichtigt, so machen Datenmenge und Anwendungshäufigkeit ein *automatisiertes datenverarbeitendes Verfahren* unerlässlich, um den Zusatzaufwand für die Vorrichtungplanung zu minimieren.

Die Merkmale einer Spannaufgabe, von der Auftragsstückzahl über die Werkstückbeschreibung bis hin zu den Anforderungen der Fertigungsprozesse, weisen unterschiedliche Skalenniveaus auf, die von dem Gruppierungsverfahren verarbeitet werden müssen (siehe Abschnitt 4.6.3.2, S. 78). Deren Auswirkungen auf die Anwendbarkeit automatisierter Rechenoperationen müssen bei der Konzeption des Gruppierungsverfahrens berücksichtigt werden.

Die Flexibilität des Gruppierungsverfahrens hinsichtlich unterschiedlicher Spannaufgaben ist entscheidend für seine durchgängige Anwendbarkeit. Das Verfahren darf daher die Bandbreite der Merkmalsausprägungen nicht einschränken. Aufgrund der unsicheren Auftragsentwicklung und der anfangs nicht genau vorhersehbaren Objekteigenschaften soll sich das Gruppierungsverfahren zudem durch eine hohe Integrationsfähigkeit neuer Merkmale auszeichnen, um die Planungsmethodik stetig anpassen und optimieren zu können.

Das *Gruppierungsergebnis* soll dem Vorrichtungsplaner die Ähnlichkeitsstruktur der Spannaufgaben aufzeigen und ihm dadurch die Identifizierung entscheidungsrelevanter Spannaufgaben und die Zuordnung alternativer Vorrichtungen ermöglichen. Da zu Beginn der Analyse keine bzw. nur geringe Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Spannaufgaben vorliegen, muss das multivariate Gruppierungsverfahren strukturentdeckende Fähigkeiten aufweisen (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 7). Dabei reicht es nicht aus, eine einzelne Partition zu ermitteln. Vielmehr muss die komplette Hierarchie der Spannaufgaben, bestehend aus den Partitionen unterschiedlicher Ähnlichkeitsstufen, dargestellt werden, so dass der Vorrichtungsplaner die Ähnlichkeitsbeziehungen der Spannaufgaben und -gruppen erkennen und so zwischen den alternativen Vorrichtungsarten abwägen kann.

### **4.4.3 Synthese und Bewertung von Gruppierungsverfahren**

#### **4.4.3.1 Überblick**

Auf Basis der vorhergehenden Charakterisierung des Gruppierungsproblems kann festgestellt werden, dass wesentliche Eigenschaften, wie der Zweck, die Gestaltungsgrößen, die Durchführung und die Gruppierungsobjekte, eine hohe Ähnlichkeit mit denen der Teilefamilienbildung aufweisen (Tabelle 4). Teilefamilien sind nach WIENDAHL (1973) Gruppen aus Teilen, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften gleich oder ähnlich sind. Sie werden für Rationalisierungsmaßnahmen in der Konstruktion, der Produktion und der Investitionsplanung verwendet (GÖTTKER 1990, S. 11). Als Fertigungs- bzw. Fertigungsablauffamilien mit ähnlichen fertigungstechnischen Anforderungen und Arbeitsablauffolgen werden Teilefamilien bei der Konzeption von Fertigungsstrukturen eingesetzt, um eine effiziente Produktion mit kurzen Durchlaufzeiten und geringen Beständen zu erreichen (MARTIN 1989, S. 18 ff.; EVERSHEIM 1999, S. 10-36 ff.).

Analogie-merkmale	Spannfamilienbildung für die Vorrichtungssystemplanung	Teilefamilienbildung für die Produktionssystemplanung
Zweck	Strukturierung eines Systems aus wirtschaftlichen Vorrichtungen mit angepasster Produktivität, Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit	Planung produktorientierter, effizienter Fertigungsstrukturen mit angepasster Produktivität, Flexibilität und Automation
Gestaltungsgrößen	Vorrichtungsstruktur aus Baukasten-, Standard-, Spezial- und flexiblen Vorrichtungen	Fertigungsstrukturen nach dem Werkstatt-, Insel-, Reihen- und Fließprinzip
Durchführung	Gruppierung von Spannaufgaben, die in der gleichen Vorrichtung bearbeitet werden sollen	Gruppierung von Produkten, Baugruppen oder Werkstücken, die auf einem Fertigungssystem gefertigt werden sollen
Gruppierungsobjekte	Spannaufgaben mit Werkstück-, Fertigungs- und Auftragsmerkmalen	Werkstücke mit Gestalt-, Fertigungs- und Auftragsmerkmalen

*Tabelle 4: Analogien der Teilefamilienbildung für die Fertigungsstrukturierung mit der Gruppierung von Spannaufgaben für die Vorrichtungssystemplanung*

Es liegt daher nahe, Verfahren zur Teilefamilienbildung auf ihre Eignung zur Verwendung für die Gruppierung von Spannaufgaben hin zu analysieren. DEUSE (1998, S. 7) unterteilt die für die Teilefamilienbildung anwendbaren Methoden in

- fertigungsanalytische Verfahren,
- Klassifizierungssysteme,
- clusteranalytische Verfahren und
- Methoden der künstlichen Intelligenz.

Eine Analyse der fertigungsanalytischen Verfahren und von Klassifizierungssystemen zeigt, dass diese Methoden für das vorliegende Gruppierungsproblem nicht anwendbar sind. *Fertigungsanalytische Verfahren* basieren auf der von BURBIDGE (1971) entwickelten Fertigungsablaufanalyse und gruppieren Werkstücke und Fertigungsmittel mittels einer Zuordnungsmatrix (KÜNZEL 1995, S. 31 ff.). Da sie die Kenntnis der einzusetzenden Fertigungsmittel voraussetzen, sind fertigungsanalytische Verfahren nicht geeignet, um Spannaufgaben für zu planende, noch nicht vorhandene Vorrichtungen zu gruppieren. *Klassifizierungssysteme* weisen Objekten einen Komplex aus Zeichen zu, der für die Objektdarstellung, -verwaltung und -gruppierung verwendet werden kann (HAHN ET AL. 1970; BARDELEBEN 1972). Sie werden u. a. für die Planung gruppentechnologischer Fertigungsstrukturen (MITROFANOW 1960; ZIMMERMANN 1967; OPITZ 1968) und für die Identifizierung ähnlicher Werkstück-Vorrichtungs-paare im Rahmen der Variantenkonstruktion eingesetzt (JIANG ET AL. 1988; NEE ET AL.

1992; SUN & CHEN 1995). Allgemein zeichnen sich diese Anwendungsfälle durch eine homogene, überschaubare Menge an Gruppierungsobjekten aus. Die Definition dieser in der Regel anwendungsspezifischen Klassifizierungsschlüssel setzt die Kenntnis der Struktur der Gruppierungsobjekte voraus (KRÖNERT 1997, S. 19). Damit sind Klassifizierungsverfahren zuordnende statt strukturentdeckende Verfahren, die für die Gruppierung eines unbekanntes, heterogenen Objektspektrums, wie es bei dem vorliegenden Gruppierungsproblem gegeben ist, nur unzureichende Ergebnisse bei einem unangemessen hohen Verschlüsselungsaufwand liefern (GRANOW 1984, S. 14; GÖTTKER 1990, S. 22).

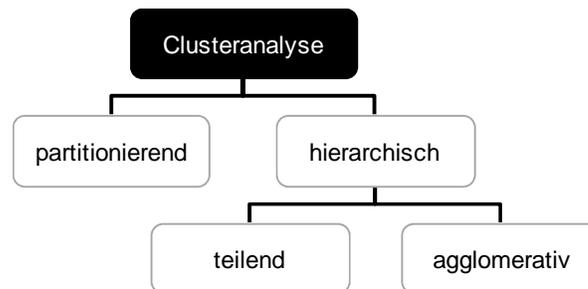
Im Folgenden werden clusteranalytische Verfahren sowie Methoden der künstlichen Intelligenz, im Einzelnen Künstliche Neuronale Netze und Expertensysteme, vorgestellt und auf ihre Fähigkeiten zur Gruppierung von Spannaufgaben hin untersucht.

#### **4.4.3.2 Clusteranalytische Verfahren**

Die Clusteranalyse ist ein multivariates, strukturentdeckendes Analyseverfahren, das Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Objekten durch eine simultane Auswertung mehrerer objektbeschreibender Merkmale zu ermitteln erlaubt. Es identifiziert aus einer heterogenen Gesamtheit an Objekten Teilmengen, die in sich homogene Merkmalsausprägungen aufweisen und sich voneinander deutlich unterscheiden (BACKHAUS ET AL. 2006). Clusteranalytische Verfahren werden primär für Klassifikationsaufgaben eingesetzt und finden Anwendung in der Biologie und Psychologie, in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften sowie bei ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen, wie der Teilefamilienbildung (SPÄTH & BINGEMER 1977; EVERITT 1995, S. 8 f.; EVERSHEIM 1999, S. 10-38).

Abbildung 23 zeigt eine grobe Klassifikation clusteranalytischer Verfahren. Partitionierende Clustermethoden erzeugen aus der Gesamtmenge an Objekten nur eine einzelne Partition mit einer vorgegebenen Zahl an Klassen. Hierarchische Verfahren dagegen erzeugen aus der Gesamtheit an Objekten schrittweise eine Folge von Partitionen (FAHRMEIR ET AL. 1996, S. 439), aus deren hierarchischer Struktur sich die Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Objekten und Clustern anschaulich ableiten lassen. Die Vorgehensweise hierarchischer Verfahren ist entweder agglomerativ oder teilend (HANDL 2002, S. 364). Die Ausgangspartition eines teilenden Verfahrens besteht aus einer einzelnen Klasse, die alle Objekte enthält und schrittweise zerlegt wird, bis in jeder Klasse nur noch ein Objekt vertreten ist. Agglomerative Verfahren starten mit der feinsten Partition, die ebenso viele Klassen wie Objekte enthält, und fusionieren schrittweise die jeweils ähnlichsten Klassen, bis die angestrebte Klassenzahl erreicht ist. Agglomerative Ver-

fahren werden für die Teilefamilienbildung bevorzugt eingesetzt, da sie verfahrensbedingt in den feinen Partitionen eine bessere Gruppierungsgüte erreichen als teilende Verfahren (DEUSE 1998, S. 13). Sie kommen daher auch für die Gruppierung von Spannaufgaben am ehesten in Betracht.



*Abbildung 23: Klassifikation der Clusteranalysemethoden; problemrelevant sind hierarchische, agglomerativ gruppierende Verfahren*

Hierarchische clusteranalytische Verfahren sind zur Lösung gruppentechnologischer Problemstellungen grundsätzlich gut geeignet und universell einsetzbar. Dies belegen zahlreiche Anwendungen der Clusteranalyse als allgemeines Verfahren zur Analyse von Werkstückspektren (FREIST 1985; HESSELMANN 1988; WEIBKOPF 2002; GULDI 2005) sowie als problemspezifisches Verfahren zur Teilefamilienbildung in der Entwicklung und Arbeitsablaufplanung (DEUSE 1998) und zur Planung flexibler gruppentechnologischer Fertigungsstrukturen (WEBER 1983; GRANOW 1984; MARTIN 1989; AUCH 1989; HAUSKNECHT 1989; DUNG 1997; NACHTWEY ET AL. 2007).

Die Vorgehensweise hierarchisch-agglomerativer Clusterverfahren besteht aus der mathematischen Berechnung aller paarweisen Objektähnlichkeiten und der anschließenden iterativen Bildung von Clustern aus den jeweils ähnlichsten Objekten (Abbildung 24). Aufgrund der Automatisierbarkeit des Verfahrens kann eine hohe Anzahl an Objekten und Merkmalen verarbeitet werden. Die Objekte werden dabei durch Merkmalsvektoren beschrieben. Grundsätzlich ist das Skalenniveau der objektbeschreibenden Merkmale nicht begrenzt, d. h. die Clusteranalyse kann binäre, nominale, ordinale und metrische Merkmale verarbeiten.

Die Merkmalsausprägungen werden in einer Rohdatenmatrix gespeichert, auf deren Basis in einem ersten Analyseschritt alle paarweisen Proximitätsmaße in Form von Distanzen oder Ähnlichkeiten zwischen den Objekten berechnet und in eine Distanz- bzw. Ähnlichkeitsmatrix überführt werden. Abhängig vom Skalenniveau der betrachteten Merkmale werden unterschiedliche Proximitätsmaße verwendet. Für rein metrisch- oder nominal-skalierte Daten steht eine Reihe an etablierten Proximitätsmaßen zur Verfügung (BACKHAUS ET AL. 2006,

S. 494 ff.). Gemischt-skalierte Daten werden entweder mit einem geringen Informationsverlust auf ein einheitliches, niedrigeres Skalenniveau transformiert oder, nach metrischem und nicht-metrischem Skalenniveau getrennt, separat analysiert und durch Mittelwertbildung wieder auf ein Proximitätsmaß zusammengeführt (FAHRMEIR ET AL. 1996, S. 452).

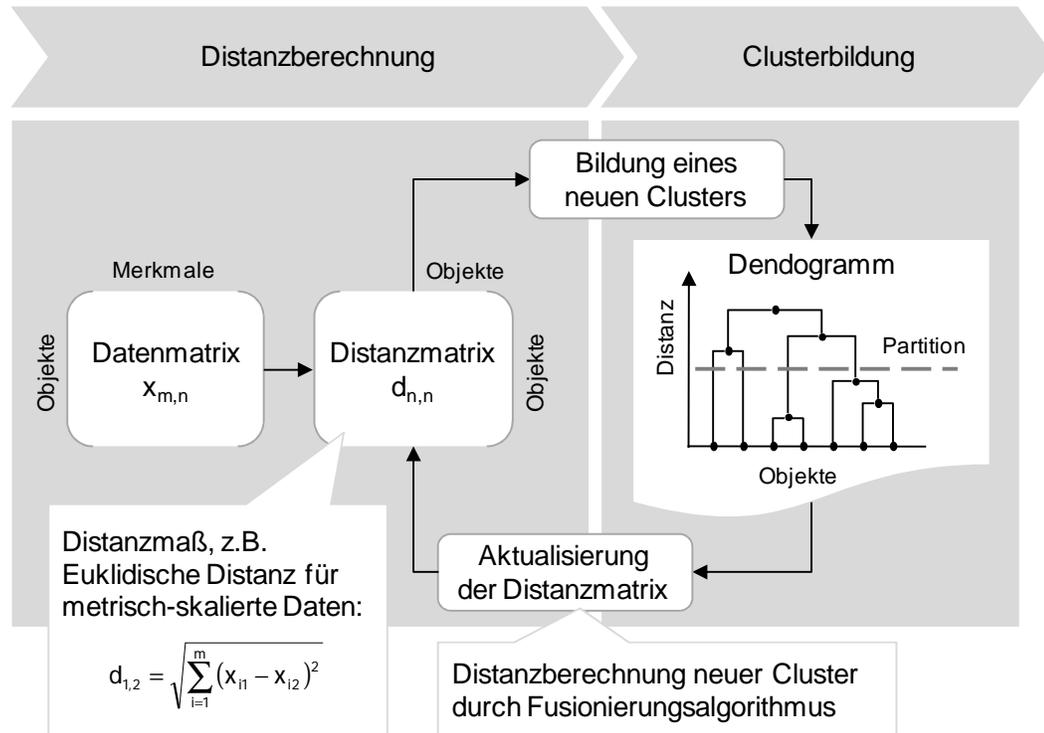


Abbildung 24: Ablauf der hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse

Die Güte der jeweiligen Proximitätsmaße kann nur anwendungsspezifisch anhand des Gruppierungszwecks und der zugrunde liegenden Gruppierungslogik bewertet werden. Proximitätsmaße reduzieren die multivariaten Objektbeschreibungen auf einen einzigen Wert, d. h. Abweichungen in manchen Merkmalen werden durch hohe Übereinstimmungen in anderen Merkmalen kompensiert. Im vorliegenden Gruppierungsproblem eignen sich besonders geometrische Merkmale für die Clusteranalyse, da sich die verfahrensbedingte Kompensation der Merkmalsausprägungen mit ihrer Ähnlichkeitsdefinition verträgt. Andere Merkmale sind nicht mit dieser Gruppierungslogik vereinbar, da sie durch feste, nicht abschwächbare Regeln die Gruppenzugehörigkeit einer Spannaufgabe beeinflussen. Dies trifft im folgenden Sinne u. a. auf Merkmale zu, denen eine abwärtskompatible Gruppierungslogik zugrunde liegt: niedrige Anforderungen an Vorrichtungsfunktionen können durch anspruchsvoller ausgelegte Vorrichtungen erfüllt werden, nicht aber anders herum. Vorrichtungseigenschaften und -funktionen wie die Spannpräzision, die Ableitung elektrischer oder thermischer Ener-

gie oder die Aufnahme von Prozesskräften fallen in diese Kategorie ordinaler Gruppierungsmerkmale. Gleiches gilt für nominale bzw. binäre Merkmale, die eine Muss-Anforderung an die Vorrichtungsfunktion repräsentieren. Solche Merkmale müssten bei einer Verwendung der Clusteranalyse für die Gruppierung von Spannaufgaben in einem separaten Analyseschritt berücksichtigt werden.

Die schrittweise Partitionsbildung einer agglomerativen, heuristischen Clusteranalyse richtet sich nach folgendem Ablauf (ABONYI & FEIL 2007, S. 9):

1. Fusion der Objekte bzw. Cluster mit der kürzesten Distanz in der Distanzmatrix,
2. Berechnung der Distanzen des zuvor erzeugten, neuen Clusters mit den übrigen Objekten bzw. Clustern durch einen Fusionierungsalgorithmus und Aktualisierung der Distanzmatrix und
3. Iteration von Schritt 1 und 2, bis nur noch ein Cluster existiert oder die angestrebte Clusterzahl erreicht wird.

Die Partitionen und die zugehörigen Distanzen werden üblicherweise in einem Dendogramm dargestellt, das den Prozess der Klassenbildung und das Ergebnis der Clusteranalyse anschaulich darstellt (vgl. Abbildung 24).

### 4.4.3.3 Künstliche Neuronale Netze

Als Künstliche Neuronale Netze (KNN) werden verschiedene multivariate Analysemethoden bezeichnet, die Zusammenhänge zwischen einer Vielzahl an Variablen selbständig durch einen Lernprozess ermitteln können (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 750). Diese Methoden basieren auf dem in der Biologie beobachtbaren Lernprozess, bei dem Nervenzellen, die Neuronen, Signale empfangen, auswerten und ggf. eine Reaktion ausführen. Analog zu biologischen Nervensystemen bestehen KNN aus miteinander verbundenen Neuronen, die Informationen von außen aufnehmen und Wissen durch einen Trainings- bzw. Lernprozess speichern können. Daher werden KNN vorzugsweise bei komplexen Analyseproblemen eingesetzt, für die das systematische Wissen zur Modellbildung nicht vorhanden ist. Sie eignen sich besonders für Aufgabenstellungen mit assoziierendem, interpolativem, klassifizierendem oder beurteilendem Charakter und werden beispielsweise für Prognoseprobleme, die Zeichen- und Spracherkennung, die Bildinterpretation sowie Zuordnungs- und Klassifizierungsaufgaben verwendet (KRATZER 1993, S. 17 & S. 172 ff.).

Der Lernprozess eines KNN wird in *überwachtes* und *unüberwachtes Lernen* unterschieden (Abbildung 25). Überwacht lernende Netze, deren Analysewissen durch die Vorgabe von Ein- und Ausgangsdaten trainiert wird, sind für die Ent-

deckung einer unbekanntem Gruppenstruktur grundsätzlich nicht geeignet. Unüberwacht lernende KNN erlangen ihr Wissen durch verschiedene Eingabemuster, die anhand ihrer Ausprägungen auf bestimmte Neuronen abgebildet und somit nach ihrer Ähnlichkeit gruppiert werden. Für strukturfindende Gruppierungsaufgaben wurden zwei Netztypen entwickelt, die sich nach der Richtung der Informationsverarbeitung (Feedback bzw. Feedforward) unterscheiden: Klassifikatornetze und Selbstorganisierende Karten.

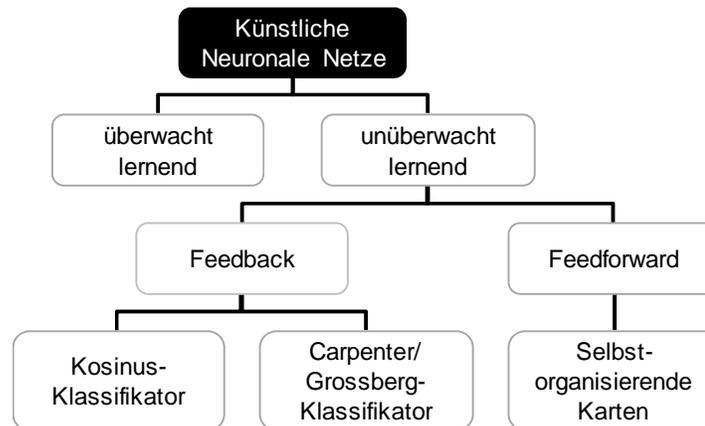


Abbildung 25: Klassifikation problemrelevanter Künstlicher Neuronaler Netztypen, in Anlehnung an BACKHAUS ET AL. (2006, S. 755)

Der Carpenter/Grossberg-Klassifikator und seine Weiterentwicklung zum Kosinus-Klassifikator sind unüberwacht lernende Netzwerke, die sich für die strukturfindende Gruppierung von Objekten eignen (KRATZER 1993, S. 94 ff.). Sie bestehen aus einer Eingangsschicht, deren Neuronen die objektbeschreibenden Merkmale repräsentieren, und einer Ausgangsschicht, deren Neuronen je eine Klasse bzw. Gruppe darstellen. Die Informationsverarbeitung verläuft bidirektional, d. h. es werden die Objektmerkmale zur Ausgangsschicht und die klassenspezifischen Aktivierungsmuster der Ausgangsneuronen zurück zur Eingangsschicht gesendet. Nach diesem Prinzip der Adaptive Resonance Theory (ART) erfolgt der Lernprozess der Klassifikatornetze, der die Aktivierungsmuster aktualisiert und ggf. zur Erzeugung eines neuen Ausgangsneurons führt, falls die vorhandenen Neuronen keine hinreichend hohe Ähnlichkeit mit einem Merkmalsvektor aufweisen. Da keine Lernphase erforderlich ist, um eine Klassifikation durchzuführen, könnte ein Klassifikatornetz ab der Inbetriebnahme einer neuen Fertigungsanlage eingesetzt werden, um Spannaufgaben zu gruppieren.

Diese Klassifikatornetze verarbeiten binär skalierte Daten und eignen sich daher besonders für die Teilefamilienbildung auf Basis von Werkstück-Fertigungsmittel-Zuordnungen (KARPATHI & SURESH 1992) und von durch Klas-

sifizierungssysteme codierten Werkstücken (LIAO & LEE 1994; KÜNZEL 1995). Für die Gruppierung von Spannaufgaben sind binär aktivierte Netze jedoch nur eingeschränkt geeignet, da die Transformation auf ein binäres Skalenniveau durch den hohen Anteil metrischer Geometriemerkmale an der Beschreibung von Spannaufgaben einen zu hohen Informationsverlust zur Folge hätte.

KÜNZEL (1995) entwickelte ein metrisch aktiviertes Klassifikatornetz, das sich der aus der Clusteranalyse bekannten Distanzmaße bedient und unter Vorgabe einer Distanzgrenze metrische Merkmalsvektoren verschiedenen Ausgangsneuronen zuweist. Er kommt zu dem Schluss, dass die strukturanalytischen Eigenschaften des von ihm entwickelten Netzes mit den Fähigkeiten der konventionellen Clusteranalyse vergleichbar sind. Ein verfahrensbedingter Nachteil der Klassifikatornetze gegenüber der hierarchischen Clusteranalyse besteht allerdings darin, dass anstelle einer Hierarchie aus Partitionsfolgen jeweils nur eine Partition der Objektmenge erzeugt wird. Angewendet auf das vorliegende Gruppierungsproblem würde dies die Eingrenzung relevanter Spannaufgaben durch den Vorrichtungsplaner erschweren.

Neben den Klassifikatornetzen werden auch Selbstorganisierende Karten für die Klassifikation von Objekten verwendet. Dabei werden die objektbeschreibenden Merkmalsvektoren auf eine zweidimensionale Karte aus Neuronen abgebildet. Je ähnlicher sich zwei Merkmalsvektoren sind, desto näher sind ihre Positionen auf der Karte. Gegenüber den Klassifikatornetzen weisen Selbstorganisierende Karten den Nachteil auf, dass eine Trainingsphase erforderlich ist, um die Klassifikationsstruktur auf der Karte zu installieren. DEUSE (1998) verwendete ein solches Netz zur Zuordnung von Werkstücken zu Teilefamilien. Das Training der Selbstorganisierenden Karte erforderte 1.400 Lernzyklen, bis eine ausreichende Klassifizierungsgüte erreicht war. Damit ist dieser Netztyp in der frühen Aufbauphase eines Vorrichtungssystems nicht anwendbar und für die zu entwickelnde Methodik nicht geeignet.

### 4.4.3.4 Expertensysteme

Expertensysteme sind wissensbasierte Systeme, die automatisch oder interaktiv mit dem Anwender Lösungen für konkrete Probleme ermitteln können, die nicht explizit als deklariertes Wissen programmiert worden sind (HAUSKNECHT 1989, S. 10). Für die Problemlösung wird formalisiertes Wissen in einer Wissensbasis gespeichert, das im Fall der Gruppierung von Spannaufgaben in prozedurales Wissen, Objekt- und Metawissen unterteilt werden kann (NEITZEL 1990, S. 30). Dies betrifft beispielsweise die Beschreibung der Spannaufgaben, die Zuordnung von Spannprinzipien zu bestimmten Werkstückformen und übergeordnetes Er-

fahrungswissen in Form von Heuristiken, mit denen Objekt- und prozedurales Wissen effizienter eingesetzt werden können. Die Repräsentation dieses Wissens erfolgt in Form von Regeln, strukturierten Objektbeschreibungen und semantischen Netzen zur Darstellung der wechselseitigen Beziehungen zwischen Objekten (VOEGELE 1997, S. 1051 f.).

Im Vorrichtungswesen werden Expertensysteme u. a. zur Identifizierung ähnlicher Spannaufgaben im Rahmen der Variantenkonstruktion verwendet (SUN & CHEN 1995; CHEN ET AL. 2007). Diese Ansätze sind jedoch nicht auf das vorliegende Gruppierungsproblem übertragbar, da sie durch fall- oder regelbasiertes Schließen eine zuordnende Gruppierung vornehmen und nicht geeignet sind, eine unbekannte Ähnlichkeitsstruktur zu ermitteln.

Für die betriebsspezifische Teilefamilienbildung werden Expertensysteme laut KÜNZEL (1995, S. 45) und DEUSE (1998, S. 17) nur in technologisch eng eingegrenzten Bereichen angewendet, da der Aufwand für den Aufbau einer Wissensbasis mit individuellen Klassifikationsregeln sehr hoch ist und das Prozess- und das Klassifikationswissen für größere Anwendungsbereiche zu komplex ist, um es umfassend abzubilden.

Analog zur Teilefamilienbildung ist das erforderliche Wissen zur Gruppierung von Spannaufgaben sehr komplex. Hinzu kommt, dass eine hohe Zahl an Objekten und Merkmalen verarbeitet werden muss und situationsbedingt Entscheidungen zu treffen sind, für die ein hohes Maß an Erfahrung erforderlich ist. Der Aufbau einer umfassenden Wissensbasis, die in dem volatilen Umfeld der Lohnfertigung auf alle Fertigungsaufträge anwendbar ist, ist daher kaum darstellbar und würde zudem einen stetigen Anpassungsaufwand erzeugen.

#### **4.4.4 Konzept zur Gruppierung von Spannaufgaben**

Die zuvor diskutierten Gruppierungsverfahren werden in Tabelle 5 anhand von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Aus der Analyse wird ersichtlich, dass weder ein einzelnes Verfahren noch eine Kombination aus Clusteranalyse, KNN oder Expertensystem zu einer zufriedenstellenden Lösung des Gruppierungsproblems führen. Daher wird die manuelle, heuristische Gruppierung als weitere Lösungsmöglichkeit in der Bewertung hinzugenommen, mit der die Nachteile der anderen Verfahren punktuell kompensiert werden können.

Bewertungskriterien	Cluster-analyse	Künstl. Neuronales Netz	Experten-system	manuelle Gruppierung
hohe Anzahl Objekte und Merkmale	ja	ja	eingeschränkt	nein
unterschiedliches Skalenniveau	eingeschränkt	eingeschränkt	ja	ja
hohe Anwendungsflexibilität	eingeschränkt	eingeschränkt	nein	ja
Gruppenhierarchie	ja	eingeschränkt	eingeschränkt	ja
Verfahrensautomation	ja	ja	eingeschränkt	nein
Abbildung aller Gruppierungsregeln	nein	nein	nein	ja

*Tabelle 5: Bewertung alternativer Verfahren für die Gruppierung von Spannaufgaben. Die für die Verfahrensauswahl ausschlaggebenden Bewertungen sind grau hinterlegt.*

Für das Gruppierungskonzept wird vom Verfasser ein Kombinationsverfahren aus Clusteranalyse und manueller, heuristischer Gruppierung gewählt. Für die Clusteranalyse im Vergleich zu Künstlichen Neuronalen Netzen sprechen die bessere Auswertbarkeit der Gruppenhierarchie und die weitere Verbreitung dieses Verfahrens in der Praxis. Die manuelle Gruppierung setzt sich gegenüber dem Expertensystem durch, da sie wesentlich flexibler das breite Spektrum an Spannaufgaben in der Lohnfertigung verarbeiten kann und mit dem Wissen und der Erfahrung des Vorrichtungsplaners zu hochwertigeren Lösungen führt.

Damit ist das Lösungskonzept für das zentrale Teilproblem der zu entwickelnden Methodik festgelegt. Das Konzept besteht aus einem zweistufigen Verfahren (Abbildung 26), das zunächst über eine automatisierte Clusteranalyse eine Gruppenhierarchie aus der Gesamtheit aller bekannten Spannaufgaben ermittelt. Verfahrensbedingt erfolgt dies nur anhand der geometrie-beschreibenden Merkmale, deren Gruppierungsregeln durch die Clusteranalyse abgebildet werden können. Die weitergehende Eingrenzung der prognoserelevanten Spannaufgaben anhand fertigungstechnischer Merkmale übernimmt der Vorrichtungsplaner, indem er die Vereinbarkeit der fertigungstechnischen Anforderungen in einer Vorrichtung prüft. Die hierfür erforderlichen Daten müssen durch das Informationsmodell abgebildet werden und dem Vorrichtungsplaner so zur Verfügung gestellt werden, dass er mit seinem Fach- und Erfahrungswissen rasch eine Eingrenzung vornehmen kann.

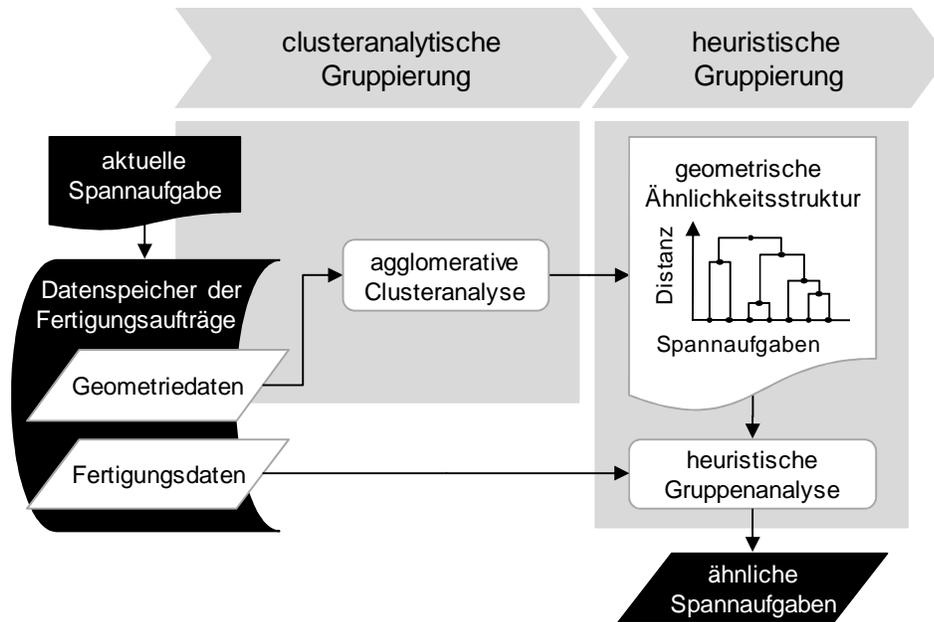


Abbildung 26: Konzept zur Gruppierung von Spannaufgaben mit ähnlichen Anforderungen an den Vorrichtungseinsatz

## 4.5 Prognose von Fertigungsaufträgen

### 4.5.1 Überblick

Eine erfolgreiche Vorrichtungsplanung zeichnet sich durch die Berücksichtigung zukünftiger Entscheidungssituationen aus. Das zu entwickelnde Prognoseverfahren hat daher die Aufgabe, ein Abbild zukünftiger Spannaufgaben zu erzeugen, deren Vorrichtungseinsätze Zusammenhänge mit der aktuellen Planungssituation aufweisen. Die durch das Gruppierungsverfahren identifizierten zurückliegenden Spannaufgaben bzw. Fertigungsaufträge bilden die Informationsgrundlage für das Prognoseverfahren.

### 4.5.2 Charakterisierung des Prognoseproblems

Je nach Anwendungsfall lassen sich Prognosen nach vielfältigen Aspekten gliedern (PEPELS 1995, S. 86; MATTMÜLLER 1992, S. 88). Das vorliegende Problem der Ermittlung zukünftiger Fertigungsaufträge wird anhand seiner Prognosegrößen, des Sachverhalts, des zeitlichen Horizonts und der vorhandenen Informationsbasis ausreichend charakterisiert (Abbildung 27), um im nächsten Abschnitt relevante Prognoseverfahren auswählen und bewerten zu können.

Dem *Sachverhalt* entsprechend handelt es sich laut KLEIN & SCHOLL (2004, S. 263) um eine Umweltprognose, mit der die nicht beeinflussbaren entscheidungsrelevanten Informationen für die Vorrichtungsplanung ermittelt werden. Dies sind diejenigen Informationen über zukünftige Spannaufgaben, die der Vorrichtungsplaner benötigt, um eine wirtschaftlich-technische Einsatzbewertung vorhandener und neuer Vorrichtungen durchzuführen und die Konsequenzen seiner Entscheidungsalternativen zu ermitteln (vgl. Abschnitt 4.3.4, S. 55). Dementsprechend bestehen die *Prognosegrößen* aus den geometrischen und fertigungstechnischen Anforderungen einer Spannaufgabe an den Vorrichtungseinsatz sowie der Stückzahl und der Eintrittswahrscheinlichkeit des zugehörigen Fertigungsauftrags.

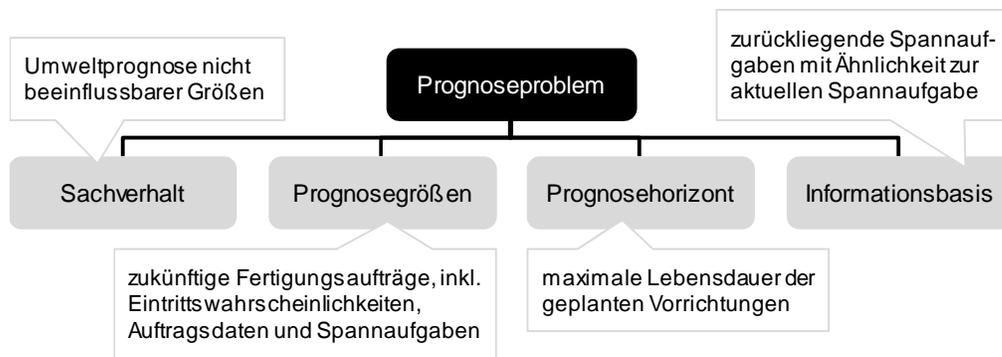


Abbildung 27: Charakterisierung des Prognoseproblems

Der *Prognosehorizont* sollte theoretisch die Lebensdauer der geplanten Vorrichtung abdecken, damit alle relevanten Umweltinformationen bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden können. Angesichts der volatilen Auftragsituation in der Lohnfertigung ist ein solch langfristiger Prognosehorizont jedoch im Allgemeinen nicht realisierbar und eine zeitliche Beschränkung der Prognose nicht erforderlich.

Die *Informationsbasis* für die Prognose stellen die durch die Clusteranalyse identifizierten Fertigungsaufträge bzw. Spannaufgaben der Vergangenheit dar. Ein Produktionsprogramm, das bei Endproduktherstellern aus dem Absatzprogramm bzw. der Absatzprognose abgeleitet wird und als Grundlage für die Produktionsplanung dient (ALICKE 2003, S. 41), ist in der Lohnfertigung nicht verfügbar.

Eine wesentliche Eigenschaft der Prognose ist ihre Zeitgebundenheit. Sie beginnt ab dem Zeitpunkt ihrer Erstellung zu veralten und muss daher stetig anhand ihrer Ausgangssituation und Prämissen überprüft werden (MATTMÜLLER 1992, S. 52). Übertragen auf die vorliegende Situation bedeutet dies, dass bei jeder einzelnen Vorrichtungsplanung eine Prognose zukünftiger Fertigungsaufträge durchzu-

führen ist und daher das einzusetzende Verfahren schnell und mit geringem Aufwand durchführbar sein sollte.

### 4.5.3 Synthese und Bewertung von Prognoseverfahren

Prognoseverfahren werden nach der Art der Datengewinnung und -verarbeitung in quantitative und expertengestützte Methoden unterteilt (Abbildung 28). Laut KLEIN & SCHOLL (2004, S. 265) werden Erstere auf Basis quantitativer Einflussgrößen und mit Hilfe mathematischer Gesetzmäßigkeiten erstellt, während expertengestützte Prognosen im Wesentlichen auf Einschätzungen von Wissensträgern und nur geringfügig auf mathematischen Funktionen beruhen. Bei praktisch umgesetzten Prognosesystemen ist eine trennscharfe Einteilung oftmals nicht möglich, da sie i. d. R. expertengestützte und quantitative Methoden miteinander kombinieren (MATTMÜLLER 1992, S. 90).

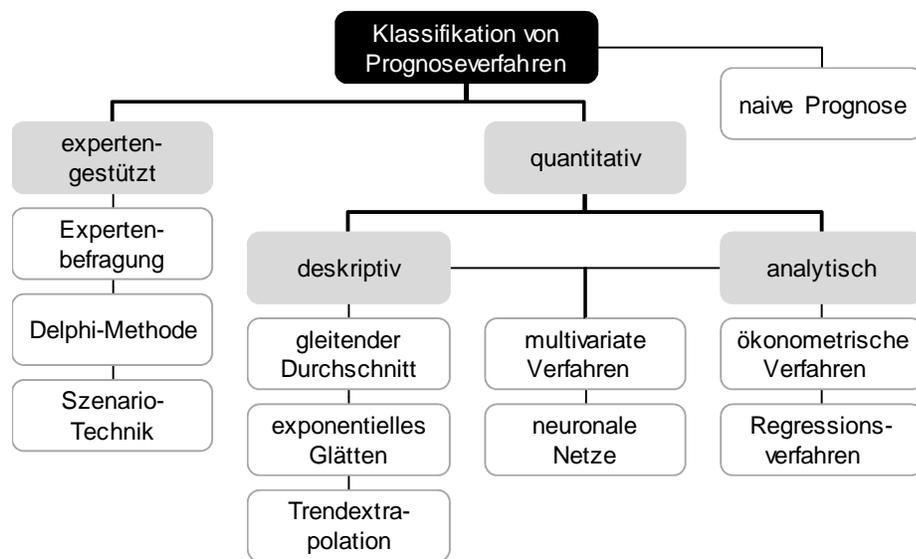


Abbildung 28: Klassifikation ausgewählter Prognoseverfahren, nach KLEIN & SCHOLL (2004, S. 265 ff.) und PEPELS (1995, S. 86 ff.)

*Quantitative Verfahren* werden weiterhin unterteilt in deskriptive Methoden, die den zukünftigen Wert der Prognosegröße aus Vergangenheitswerten einer Zeitreihe ableiten, und in analytische Methoden, die den Prognosewert auf Basis vorlaufender Indikatoren bzw. einer Kausalität zwischen einer oder mehreren beeinflussenden Variablen ermitteln (PEPELS 1995, S. 97 & S. 102). Für die Prognose zukünftiger Fertigungsaufträge im Umfeld der Lohnfertigung sind analytische Verfahren nicht geeignet, da die Abhängigkeiten und Zusammenhänge des Nachfrageverhaltens der Abnehmer von bzw. mit anderen Indikatoren kaum abbildbar sind. Deskriptive Methoden sind zwar nicht auf einzelne Fertigungsaufträge an-

wendbar, da für diese keine ausreichend detaillierten Zeitreihen gebildet werden können, sie haben aber das Potential, die Gesamtstückzahl einer Gruppe zukünftiger Fertigungsaufträge abzuschätzen, wenn ausreichend Vergangenheitswerte vorliegen.

Für Prognoseprobleme ohne eine ausreichende quantitative Basis stellen *expertenbasierte Verfahren* oft die einzige Alternative dar (PEPELS 1995, S. 89; KLEIN & SCHOLL 2004, S. 302). Sie werden vorzugsweise dann eingesetzt, wenn nach dem voraussichtlichen Eintritt bestimmter Ereignisse gefragt wird (HÜTTNER 1986, S. 217). Die Delphi-Methode und die Szenario-Technik erfordern beide einen zu hohen Zeitaufwand, um für eine auftragsspezifische Prognose eingesetzt zu werden. Eine direkte Expertenbefragung ist dagegen kurzfristig durchführbar (PEPELS 1995, S. 91).

Aus Sicht der Arbeitsplanung stehen zunächst die innerbetrieblichen Experten des Vertriebs für eine direkte Befragung zur Verfügung, deren Einschätzungen zu Absatzprognosen aufgrund ihrer vertieften Marktkenntnis von hoher Bedeutung sind (HÜTTNER 1986, S. 218). Zusätzlich können die Einkaufsabteilungen der Abnehmer durch den Vertrieb befragt werden, um deren Nachfrageverhalten besser abschätzen zu können. Solche Expertenbefragungen können wesentlich dazu beitragen, die Informationsbasis der Vorrichtungsplanung durch eine systematische Abfrage interner und externer Informationen über sichere und geplante Aufträge zu verbessern. Sie sind aber nicht dazu geeignet, ein umfassendes und detailliertes Abbild des zukünftigen Auftragsportfolios zu erstellen.

Als *naive Prognose* wird ein Vorgehen bezeichnet, bei dem der letzte Beobachtungswert ohne Änderung als Prognosewert übernommen wird (HÜTTNER 1986, S. 13). OHL (2000, S. 101 ff.) verwendet diesen Ansatz für die Vorhersage von Produktionsaufträgen variantenreicher, kundenindividueller Produkte. Da es nicht möglich ist, die Aufträge exakt vorherzusagen, überführt er vergangene Echtaufträge zunächst ohne Änderung in eine Basisprognose. Anschließend wird diese Basisprognose anhand sicherer Informationen und weiterer Prognosen, wie z. B. der Absatzzahlen, heuristisch modifiziert.

Ein ähnlicher Ansatz kommt für die Ermittlung zukünftiger Fertigungsaufträge in der Lohnfertigung in Frage. Zu beachten ist dabei die größere Heterogenität der Fertigungsaufträge in der Lohnfertigung im Vergleich zu kundenindividuellen Produktionsaufträgen, deren Freiheitsgrade durch die Definition der zulässigen Varianten stärker eingegrenzt sind. Um die Unbegrenztheit des Auftragspektrums statistisch auszugleichen, ist eine ausreichend hohe Anzahl zurückliegender Fertigungsaufträge als Einsatzbedingung für ein naives Prognoseverfahren anzusehen. Ist diese Bedingung erfüllt, verfügt die naive Prognose von Ferti-

gungsaufträgen in Kombination mit einer expertengestützten Optimierung unsicherer Prognosegrößen wie den Auftragsstückzahlen über das Potential, ein weit- aus umfassenderes Auftragspektrum vorherzusagen als es rein expertengestützte Prognosen vermögen.

#### 4.5.4 Prognosekonzept

Die Analyse relevanter Prognosemethoden hat gezeigt, dass aufgrund der unsicheren Informationslage in der Lohnfertigung nur die expertengestützte Prognose und unter bestimmten Bedingungen auch naive Prognoseansätze für die Ermittlung zukünftiger Fertigungsaufträge anwendbar sind. Das Prognosekonzept der vorliegenden Arbeit besteht daher aus zwei voneinander unabhängigen Vorgehensweisen:

- der expertengestützten Prognose einzelner Fertigungsaufträge und
- der naiven und expertengestützten Prognose einer Auftragsgruppe, falls eine ausreichende Informationsbasis aus zurückliegenden, planungsrelevanten Fertigungsaufträgen vorliegt.

Die *expertengestützte Einzelprognose* (Abbildung 29) beruht auf einer direkten Befragung des Vertriebs durch den Vorrichtungsplaner hinsichtlich

- sicherer und geplanter Aufträge mit ähnlichen Spannaufgaben und
- der Wiederholwahrscheinlichkeit der durch die Gruppenanalyse ermittelten Fertigungsaufträge aus der Vergangenheit.

Darüber hinaus können durch Analogieschätzung weitere Fertigungsaufträge prognostiziert werden, falls das Werkstück der aktuellen Spannaufgabe aus einer Norm- oder Baureihe stammt.

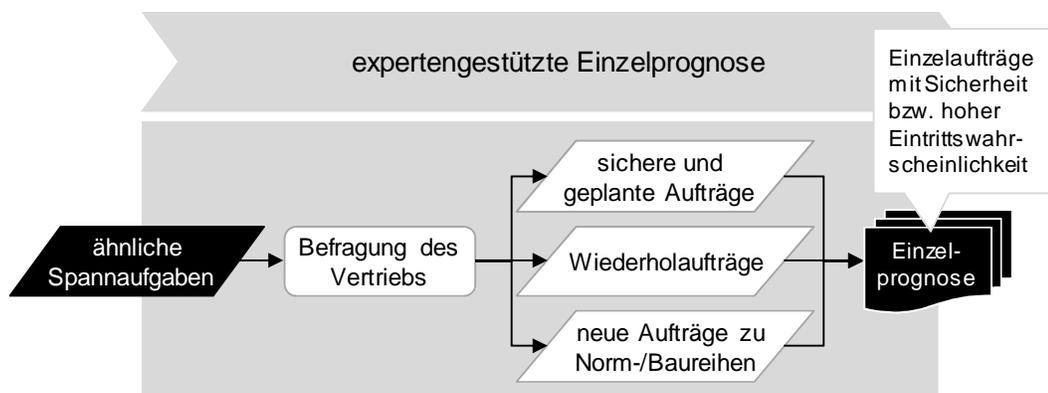


Abbildung 29: Vorgehen der Einzelprognose

Die direkte Befragung des Vertriebs gewährleistet, dass alle intern bekannten, planungsrelevanten Informationen übermittelt werden und in die Vorrichtungsplanung einfließen. Zudem wird eine Abschätzung über zukünftige Fertigungsaufträge erstellt, die zwar mit Unsicherheit behaftet ist, aber die planungsrelevante Umweltentwicklung komplettiert und zu einer ausgewogenen Entscheidung über die Vorrichtungsart beiträgt.

Ein *naiver Prognoseansatz* (Abbildung 30) kann auf effiziente Weise ein umfassenderes Bild zukünftiger Fertigungsaufträge aufzeigen, als es die expertengestützte Prognose ermöglicht. Die Durchführbarkeit ist abhängig vom vergangenen Auftragsportfolio, das eine hohe Anzahl ähnlicher Spannaufgaben enthalten muss, für welche die Zeitstabilitätshypothese gültig ist. Ist dies der Fall, dann können die planungsrelevanten Spannaufgaben der Vergangenheit naiv in die Zukunft übernommen und die zugehörigen Auftragsdaten durch den Vertrieb aktualisiert werden. Die Umweltsituation der Vorrichtungsplanung besteht dann aus einer Gruppe von Spannaufgaben mit unscharfen Gesamtanforderungen an eine Vorrichtung, anhand derer der Einsatz einer flexiblen Gruppenvorrichtung bewertet werden kann.

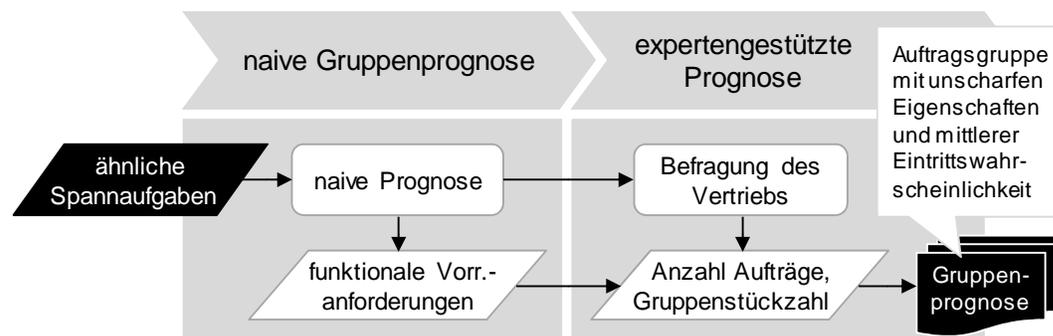


Abbildung 30: Vorgehen der Gruppenprognose

## 4.6 Informationsmodell

### 4.6.1 Überblick

Für die Vorrichtungsplanung wird ein durchgängiges Informationsmodell benötigt, das als Datenmodell für die rechnergestützte Clusteranalyse fungiert und Informationen für die manuellen Analyse- und Planungsschritte bereitstellt. Ein Informationsmodell besteht nach SCHENCK & WILSON (1994) aus der formalen Beschreibung

- verschiedener Arten von Ideen, Fakten und Prozessen, die ein Modell eines interessierenden Bereichs der Welt darstellen, und
- eines expliziten Satzes an Interpretationsregeln.

Speziell für die Verwendung in EDV-Systemen ausgelegte Informationsmodelle werden auch als Datenmodelle bezeichnet (ZAHN 1999, S. 40).

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Entwicklung von Informationsmodellen basiert auf der Festlegung, dass die reale Welt aus Objekten im Sinne von Informationsträgern (Entitäten) besteht und diese Objekte durch semantische Beziehungen verknüpft sind (STAUD 2005, S. 12). Bei der Informationsmodellierung wird zunächst die grundlegende Objektstruktur bestimmt. Anschließend werden die Objektbeziehungen und -attribute verfeinert und die Modellkonsistenz geprüft (ZAHN 1999, S. 42). In diesem Abschnitt werden die abzubildenden Basisobjekte, ihre Beziehungsstruktur und teilweise bereits die Datentypen der objektbeschreibenden Attribute bestimmt, auf deren Grundlage im folgenden Abschnitt 4.7 die Konzeption der Datenbeschaffung durchgeführt wird. Die detaillierte Festlegung der Modellattribute und ihrer Eigenschaften erfolgt in Abschnitt 5.2.

#### **4.6.2 Randbedingungen und Anforderungen des Informationsmodells**

Die Randbedingungen und Anforderungen an das zu entwickelnde Informationsmodell unterteilen sich in allgemeine Anforderungen an ein für die Datenverarbeitung einzusetzendes Modell, Anforderungen der übergeordneten Planungsmethodik und prozessspezifische Anforderungen durch die datenverarbeitenden Systeme (Abbildung 31).

Als *allgemeine Anforderungen* an ein Informationsmodell nennt VOSSEN (2008, S. 50 ff.) die Redundanzfreiheit und die Minimalität der Modellkonstrukte, die Erfüllung anwendungsspezifischer Konsistenzbedingungen sowie einen systematischen, nachvollziehbaren Aufbau.

An die *übergeordnete Planungsmethodik* wird der Anspruch der Allgemeingültigkeit und der Anpassbarkeit an betriebliche Randbedingungen gestellt (vgl. Abschnitt 3.5, S. 46). Übertragen auf das Informationsmodell bedeutet dies, dass ein Abstraktionsgrad zur Abbildung der Fertigungsaufträge gefunden werden muss, der einerseits die Allgemeingültigkeit des Modells sicherstellt und die einheitliche Anwendung des Informationsmodells auf alle Fertigungsaufträge ermöglicht, der aber andererseits durch konkrete Objektbeschreibungen einen möglichst geringen Anpassungsaufwand an praktische Problemstellungen sicherstellt. Weiterhin muss eine problemlose Implementierung der Methodik in anwendungsspezifische Systeme gewährleistet werden. Hierfür ist eine formale und

exakte Beschreibung der Modellspezifikation zu erstellen, die frei von implementierungsspezifischen Elementen ist.

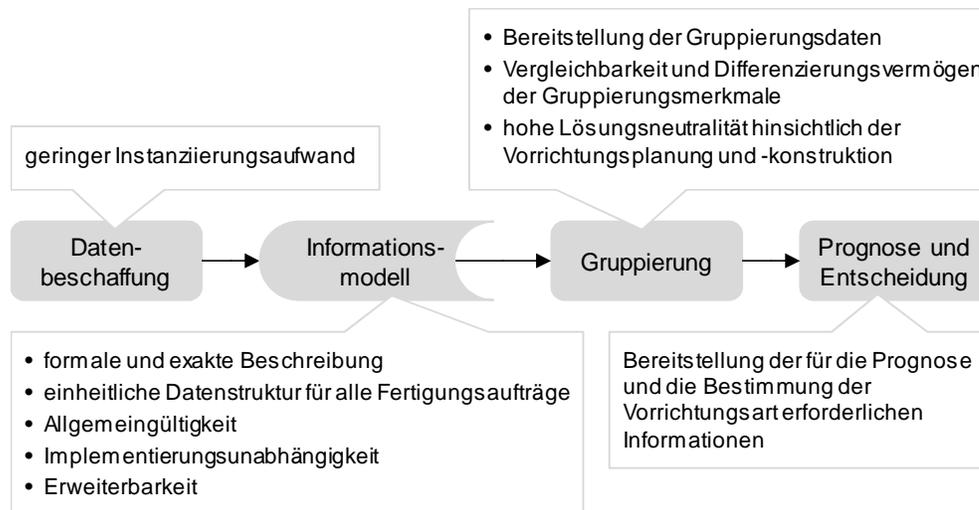


Abbildung 31: Allgemeine und prozessspezifische Anforderungen an das Informationsmodell

Die *prozessspezifischen Anforderungen* an das Informationsmodell ergeben sich aus einer Prozessanalyse und der Bestimmung der Systemgrenzen (GRABOWSKI ET AL. 1993, S. 12). Die zu berücksichtigenden Prozesse bestehen aus der Datenbeschaffung, der Gruppenanalyse, der Auftragsprognose und der abschließenden Entscheidung über die Vorrichtungsart (vgl. Abbildung 31).

Im Rahmen der *Datenbeschaffung* werden die durch das Informationsmodell definierten Datensätze instanziiert. Um den Instanzierungsaufwand gering zu halten, sollten möglichst viele Daten des Informationsmodells aus vorhandenen Quellen, wie dem Fertigungsauftrag und dem Arbeitsplan, oder dem konventionellen Planungsprozess übernommen werden können.

Die *Gruppierung von Spannaufgaben* als zentraler Analyseprozess stellt den Großteil der Randbedingungen und Anforderungen. Für die Clusteranalyse und die anschließende heuristische Optimierung des Gruppierungsergebnisses muss das Informationsmodell alle relevanten ähnlichkeitsbestimmenden Merkmale und Einflussgrößen enthalten. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Spannaufgaben muss die Merkmalspezifikation insbesondere für die automatisierte Clusteranalyse einheitlich auf alle Fertigungsaufträge anwendbar sein. Die Anzahl der Merkmale soll einerseits möglichst gering sein, um die Komplexität des Datenmodells einzuschränken, und muss andererseits groß genug sein, um ein ausreichendes Differenzierungsvermögen zu gewährleisten. Bei der Modellierung der Spannaufgaben ist zudem auf eine lösungsneutrale Beschreibung der Anforde-

rungen an eine Vorrichtung zu achten. Auf diese Weise bleibt dem Vorrichtungsplaner ein größtmöglicher Lösungsfreiraum, um die Art und die konkrete Gestalt der einzusetzenden Vorrichtung zu bestimmen.

Die *Prognose zukünftiger Fertigungsaufträge* und die *Entscheidung über die Vorrichtungsart* werden im Rahmen der Methodik weitgehend manuell durchgeführt und stellen daher weniger umfassende Anforderungen an das Informationsmodell als das Gruppierungsverfahren. Das Modell soll lediglich diejenigen Informationen enthalten, die den Anwendern eine schnelle und effiziente Bearbeitung der beiden Prozesse ermöglichen.

### **4.6.3 Strukturierung des Informationsmodells**

#### **4.6.3.1 Beschreibung von Informationsmodellen**

Ein *Informationsmodell* bildet den relevanten Ausschnitt der realen Welt durch Objekte und deren Eigenschaften und Beziehungen ab und verknüpft diese mit Aktionen und Operation. Die eindeutige und formale Beschreibung eines Objekts erfolgt durch eine Entität, die kein individuelles Objekt, sondern eine Gruppe von Individuen mit gleichen Attributen repräsentiert (ANDERL & TRIPPER 2000, S. 55). Die Ausprägung einer individuellen Entität, die sogenannte Instanz, wird durch Attributwerte festgelegt, beispielsweise durch die Zuweisung einer konkreten Zahl zum Attribut „Auftragsstückzahl“ einer Entität „Fertigungsauftrag“. Die Beziehungen zwischen Entitäten zeigen Hierarchien und Informationszusammenhänge auf (CREMER 1992, S. 31). So kann dargestellt werden, dass eine Spannaufgabe Teil eines übergeordneten Fertigungsauftrags ist. Die Kardinalität einer solchen Beziehung gibt an, wie viele individuelle Entitäten an der Relation teilhaben (STAUD 2005, S. 26). Eine 1:n-Relation zeigt in diesem Zusammenhang an, dass ein Fertigungsauftrag eine oder mehrere Spannaufgaben enthält.

Zur Unterstützung des Entwurfsprozesses von Informationsmodellen stehen grafische, rechnerverarbeitbare Repräsentationsformen für die formale Darstellung von Entitäten, Attributen und Beziehungen zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die *grafische Notation EXPRESS-G* verwendet, da sie sich durch ihre kompakte Darstellung von Objekten und deren Beziehungen besonders gut für die Strukturierung von Informationsmodellen eignet (GRABOWSKI ET AL. 1993, S. 32). EXPRESS-G ist in der Normenreihe ISO 10303 definiert und wurde für die Entwicklung und Darstellung von STEP-Produktdatenmodellen entworfen. Im Anhang (Abschnitt 9.2, S. 170) dieser Arbeit werden die grafischen Elemente von EXPRESS-G erklärt.

### 4.6.3.2 Objektstruktur

Die Hauptaufgabe des zu entwickelnden Informationsmodells liegt in der Bereitstellung der Datensätze für die Clusteranalyse und der Informationen für die heuristische Optimierung des Gruppierungsergebnisses. Eine geeignete Objektstruktur für das Informationsmodell wird daher aus den Gruppierungsmerkmalen dieser Analyseprozesse abgeleitet.

Die Auswahl der objektbeschreibenden Merkmale für eine Gruppenanalyse bezeichnet GRANOW (1984, S. 45) als Qualifizieren der Ähnlichkeit. In Anlehnung an das von ihm beschriebene Vorgehen besteht die Qualifizierung der Ähnlichkeit von Spannaufgaben darin,

1. die Auslegungsgrößen der Vorrichtungplanung und
2. die für diese Auslegungsgrößen relevanten Einflussgrößen zu bestimmen.

Die *Auslegungsgrößen* bestehen aus der Ausführungsart und der Funktionalität einer Vorrichtung, die für die aktuelle Spannaufgabe und ggf. für weitere zukünftige Spannaufgaben eingesetzt werden soll. Sie umfassen die spezialisierte, flexible oder modulare Ausführung einer Vorrichtung und die Funktionen für die Werkstückaufnahme durch Bestimmen, Spannen und Stützen, das Bewegen eines Bauteils sowie weitere Funktionen für die technische Realisierung und qualitative Optimierung der Fertigungsprozesse (Abbildung 32).

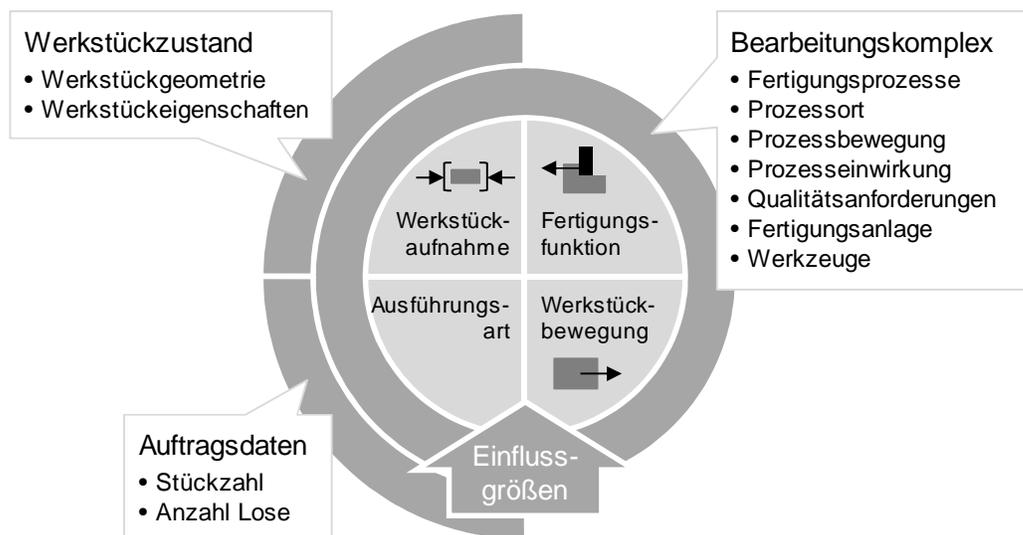


Abbildung 32: Allgemeine Einflussgrößen auf die Ausführungsart und die Funktionalität einer Vorrichtung

Abbildung 32 zeigt auch die zugehörigen *Einflussgrößen*, die durch geeignete Merkmale in den Gruppierungsverfahren berücksichtigt und durch Attribute im

Informationsmodell abgebildet werden müssen. Sie lassen sich nach VDI (1992, S. 62 f.) in betriebsorganisatorische Auftragsdaten, den Werkstückzustand und den Bearbeitungskomplex aus Bearbeitungsverfahren, Werkzeug und Fertigungsanlage unterteilen.

An dieser allgemeinen Gliederung der Einflussgrößen orientieren sich die *Basisobjekte des Informationsmodells*, deren Beziehungsstruktur in Abbildung 33 dargestellt ist. Ein Fertigungsauftrag wird durch seine betriebsorganisatorischen Auftragsdaten sowie eine oder mehrere Spannaufgaben beschrieben. Jede Spannaufgabe wird durch Anforderungen des Werkstücks und des Bearbeitungskomplexes repräsentiert. Die Werkstückanforderungen werden weiterhin unterteilt in Werkstückeigenschaften und in Anforderungen an die Spanngeometrie.

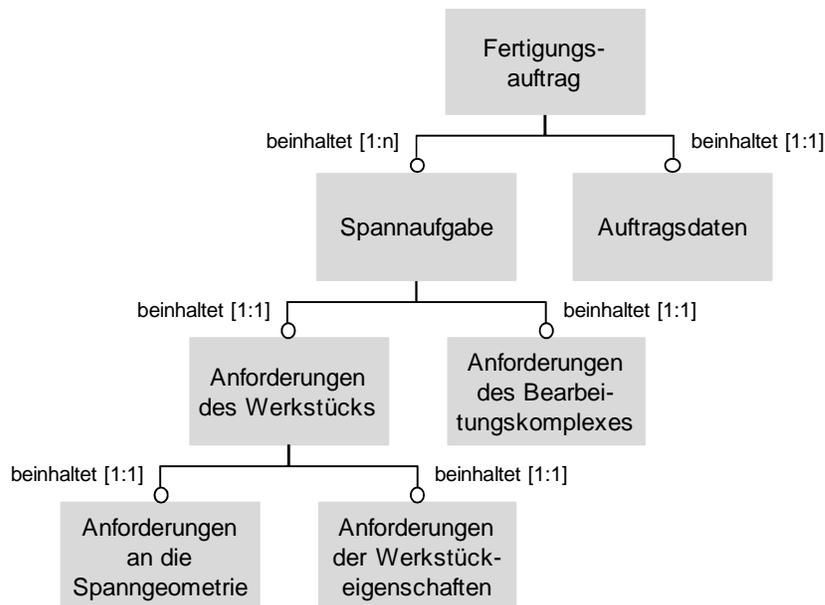


Abbildung 33: Struktur der durch das Informationsmodell abzubildenden Objekte

Die Informationen zur Instanziierung eines solchen Modells stammen aus dem Fertigungsauftrag, dem Arbeitsplan und zu einem großen Anteil aus ersten Ergebnissen der Vorrichtungsplanung. Daher ist bei der Definition der einzelnen Modellattribute darauf zu achten, dass möglichst keine Auslegungsgrößen der Vorrichtungsplanung durch eine Instanziierung im Modell vorweggenommen werden, die später den Handlungsspielraum bei der Bestimmung der Vorrichtungsart durch unflexible, auftragspezifische Lösungen einschränken. Diese Forderung an die Modellspezifikation betrifft in erster Linie die Spanngeometrie, deren Datenmodell von der Clusteranalyse für die Ermittlung der geometrischen Ähnlichkeitsstruktur verwendet wird (vgl. Abschnitt 4.4.4, S. 67). Wegen seiner

zentralen Bedeutung wird dieser Teil des Informationsmodells im nächsten Abschnitt gesondert betrachtet.

### 4.6.3.3 Beschreibung der Spanngeometrie

Die Abbildung der geometrischen Anforderungen einer Spannaufgabe an die Bestimm-, Spann- und Stützfunktionsträger einer Vorrichtung ist die Grundlage zur Differenzierung integriert aufgebauter Spezial- und flexibler Vorrichtungen. Diese Anforderungen können explizit durch die Beschreibung der Wirkungsorte der Funktionsträger, d. h. der Bestimm-, Spann- und Stützpunkte, im Datenmodell der Clusteranalyse repräsentiert werden. Jedoch werden durch solch eine Abbildung alternative Konstruktionslösungen und damit mögliche Wiederverwendungspotentiale vernachlässigt.

Durch eine implizite Beschreibung der Spanngeometrie ohne vorgedachte Konstruktionslösungen bleibt das Wiederverwendungspotential erhalten. Für Spannpunkte gilt allgemein, dass sie auf der Werkstückoberfläche, aber nicht auf einer zu prozessierenden Fläche liegen. Eine formale Beschreibung der Werkstückform, ihrer Oberflächen und der zugehörigen Prozessflächen stellt folglich eine implizite, lösungsneutrale Modellierung der Spanngeometrie dar. Die Gruppierung von Spannaufgaben auf Basis eines solchen Datenmodells stellt zwar ein möglichst hohes Wiederverwendungspotential innerhalb der Cluster sicher, Zuordnungen auf Basis einer Scheinähnlichkeit können aber aufgrund der impliziten Beschreibung nicht ausgeschlossen werden. Ferner erschweren unregelmäßige Werkstückformen und die variierende Anzahl an Prozessflächen die Vergleichbarkeit der Datensätze und somit die Erstellung eines allgemeingültigen Modells.

Es soll daher ein *explizites Beschreibungsmodell der Spanngeometrie* entwickelt werden, das möglichst wenige gruppenspezifische Konstruktionsergebnisse vorwegnimmt und so das Wiederverwendungspotential innerhalb eines Clusters aufrechterhält. Eine Modellierung der einzelnen Spannpunkte kommt daher nicht in Frage. Die Zusammenfassung möglicher Spannpunkte zu Flächen lässt dagegen den Freiraum, die konkreten Wirkungsorte der Funktionsträger für alle relevanten Spannaufgaben gruppenspezifisch festzulegen.

Die Vergleichbarkeit dieser Spannflächen erfordert eine Systematik, nach der die Flächen ausgewählt, benannt und beschrieben werden. Als Grundlage für die Struktur eines solchen Spannmodells bieten sich die *Bestimm- und Spannprinzipien* an, die im Zuge der wissenschaftlichen Untersuchung der Vorrichtungskonstruktion entstanden sind. Bestimmprinzipien nutzen kinematische und kon-

struktionsheuristische Regeln, um durch einen systematischen Entzug von Freiheitsgraden die minimale Anzahl an Bestimmelementen und deren Anordnung auf dem Werkstück zu ermitteln (HOFFMAN 2004, S. 21 ff.). Spannprinzipien basieren auf heuristischen Regeln zur Anordnung der Spannelemente, die dem kinematisch bestimmten Werkstück die restlichen Freiheitsgrade nehmen (TRAPPEY & LIU 1990).

Diese Konstruktionsprinzipien sind jeweils für bestimmte Werkstückformen anwendbar, beispielsweise für prismatische oder rotationssymmetrische Werkstücke. Dies zeigt einerseits, dass die Spanngeometrie von der Werkstückform beeinflusst wird, und andererseits, dass ein allgemeines Spannmodell zur Abbildung aller Spannaufgaben nicht möglich und zugleich nicht erforderlich ist, da unterschiedlich geformte Werkstücke nach verschiedenen Prinzipien gespannt werden.

In der Praxis und in der Forschung angewendete Bestimmprinzipien sind u. a. (TRAPPEY & LIU 1990; NEE ET AL. 1995, S. 29 ff.):

- das 3-2-1-Bestimmprinzip für prismatische Werkstücke (Abbildung 34),
- das 3-1-1-1-Bestimmprinzip für allgemein geformte Werkstücke,
- das Bohrungsprinzip für Werkstücke mit einer Bestimmbohrung,
- das N-2-1-Bestimmprinzip für formlabile Werkstücke und
- das V-Bestimmprinzip für zylindrische Werkstücke.

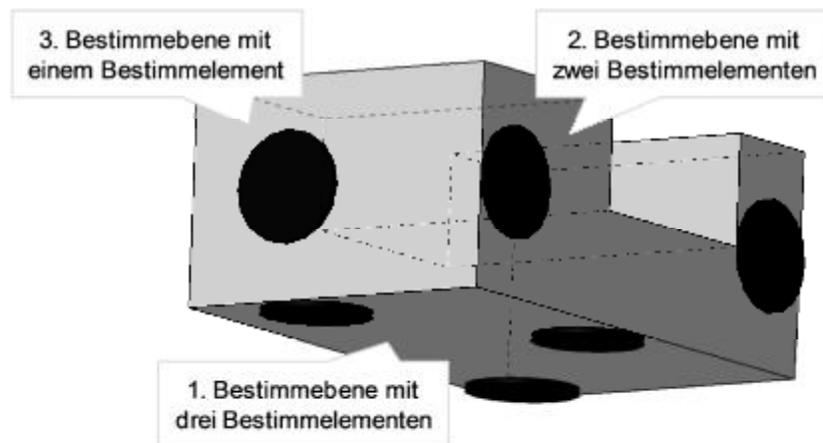


Abbildung 34: 3-2-1-Bestimmprinzip für prismatische Werkstücke; auf dem Werkstückmodell sind mögliche Kontaktflächen der Bestimmelemente dargestellt

Die Beschreibung der geometrischen Anforderungen einer Spannaufgabe soll durch ein *Spannmodell* erfolgen, das die möglichen Bestimm- und Spannpunkte durch Flächen repräsentiert. Die ggf. erforderlichen Stützflächen können eben-

falls im Informationsmodell abgebildet werden, sie sind mangels Vergleichbarkeit aber nicht Teil des Datenmodells für die Clusteranalyse. Die Anzahl und die Anordnung der Bestimm- und Spannflächen eines Spannmodells sind abhängig vom angewendeten Bestimm- und Spannprinzip, die jeweils für bestimmte Werkstückformen oder -anordnungen gelten, beispielsweise für

- die Bearbeitung eines prismatischen Werkstücks,
- die Bearbeitung eines rotationssymmetrischen Werkstücks oder
- das Fügen zweier prismatischer Werkstücke.

Die Auswahl und Konzeption der Spannmodelle muss unternehmensspezifisch erfolgen, damit betriebsinterne Konstruktionsstandards berücksichtigt werden können. Die oben vorgestellten, in der Praxis etablierten Konstruktionsprinzipien bilden hierfür eine sehr gute Grundlage. Allgemein ist bei der Entwicklung von Spannmodellen zu beachten, dass alle Werkstücke, die in der gleichen Vorrichtung gespannt werden können, durch das gleiche Spannmodell abgebildet werden.

Die Auswahl und Instanziierung des Spannmodells für eine Spannaufgabe entspricht der Konzeptionsphase im Vorrichtungskonstruktionsprozess (vgl. Abschnitt 2.2.3, S. 14). Die im Spannmodell hinterlegten Konstruktionsprinzipien bewirken daher eine Systematisierung und Standardisierung der Vorrichtungskonstruktion und tragen ab dem ersten Fertigungsauftrag zu einer Erhöhung des Wiederverwendungspotentials und der Anpassungsfähigkeit der entwickelten Vorrichtungen bei.

### 4.6.4 Konzept des Informationsmodells

Das in dieser Arbeit entwickelte Informationsmodell zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen bildet die Fertigungsaufträge eines Lohnfertigers mit der in Abbildung 35 dargestellten Objektstruktur ab. Jeder Datensatz eines Fertigungsauftrags enthält betriebswirtschaftliche *Auftragsdaten* und als externe Informationsobjekte den Arbeitsplan und das CAD-Bauteilmodell, die als Grundlage zur Definition und Modellierung der Spannaufgaben dienen.

Jede *Spannaufgabe* enthält ein Datenmodell für die Clusteranalyse, das die geometrischen Anforderungen an die Spannvorrichtungen durch metrisch-skalierte Merkmale repräsentiert. Diese Merkmale beschreiben einerseits die geometrischen Einflussgrößen des *Bearbeitungskomplexes* und andererseits die möglichen Bestimm- und Spannflächen des Werkstücks. Die hierfür verwendeten *Spannmodelle* differenzieren die Spannaufgaben bereits vor der Gruppenanalyse an-

hand von Bestimm- und Spannprinzipien, die jeweils für bestimmte Werkstückformen und -anordnungen gelten.

Die weiteren spannaufgabenbeschreibenden Attribute repräsentieren planungsrelevante Werkstückeigenschaften, wie z. B. die Werkstückstabilität, und Anforderungen des Bearbeitungskomplexes an eine Vorrichtung, wie die Spannpräzision und aufzunehmende Prozesskräfte. Sie werden manuell weiterverarbeitet und können daher ebenso wie die Auftragsdaten ein beliebiges Skalenniveau aufweisen.

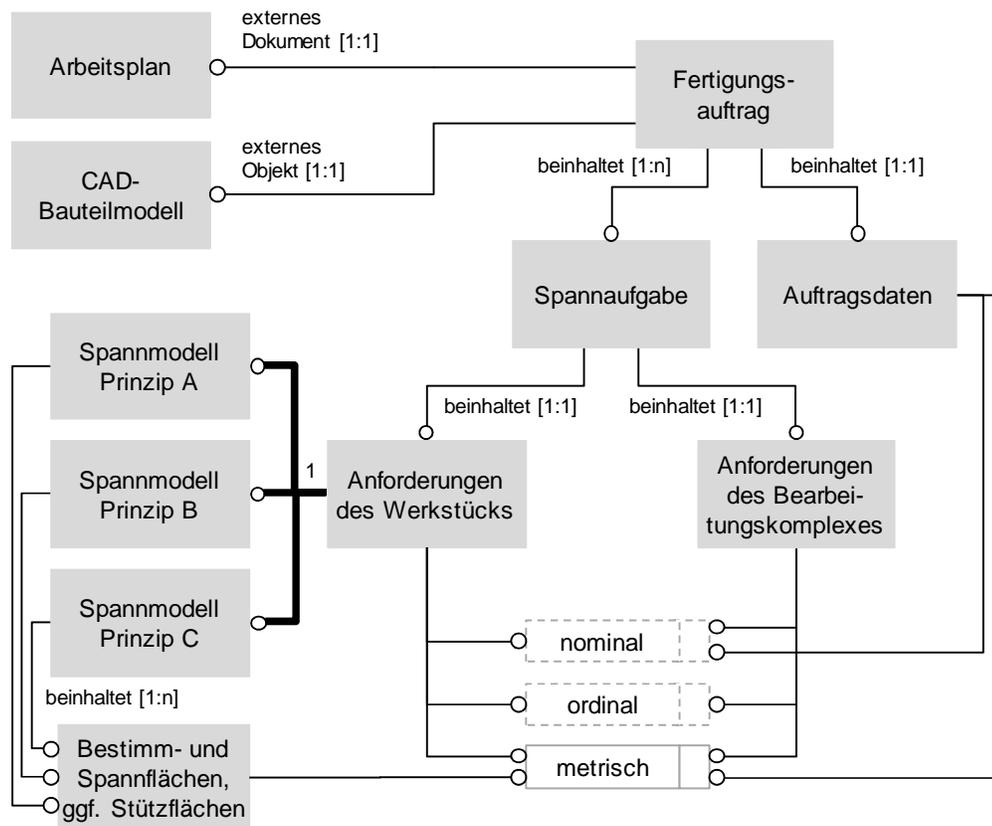


Abbildung 35: Konzept des Informationsmodells zur Beschreibung von Fertigungsaufträgen im Rahmen der Vorrichtungplanung

## 4.7 Datenbeschaffung

### 4.7.1 Überblick

Im Rahmen der Vorrichtungplanung muss jeder Fertigungsauftrag anhand des im vorhergehenden Abschnitt konzipierten Informationsmodells abgebildet wer-

den. Als Datenbeschaffung wird in diesem Zusammenhang die Instanziierung des auftragsbeschreibenden Datensatzes bezeichnet, der die Informationsbasis für die nachfolgenden Analyse- und Planungsschritte darstellt. In diesem Abschnitt wird die allgemeine Vorgehensweise der Datenbeschaffung erarbeitet.

### 4.7.2 Randbedingungen und Anforderungen der Datenbeschaffung

Die vorhandenen Informationsquellen und das zu instanzierende Datenmodell bilden die Randbedingungen für die Datenbeschaffung, deren Fokus auf der Instanziierung des komplexen und aus vielen Attributen bestehenden Spannmodells liegt. Hierfür stehen dem Vorrichtungsplaner der aktuelle Fertigungsauftrag sowie der zugehörige Arbeitsplan mit seinen Informationen über die Teilarbeitsvorgänge, Bearbeitungsschritte und Fertigungsmittel zur Verfügung. Weiterhin wird angenommen, dass das zu fertigende Bauteil als digitales CAD-Modell vorliegt und entsprechende CAD-Systeme zur Verarbeitung von CAD-Daten verfügbar sind.

Die beschriebenen Eingangsinformationen können in der Lohnfertigung sehr unterschiedlich ausgeprägt sein, so dass die Datenbeschaffung flexibel ausgelegt werden muss, um auf alle Fertigungsaufträge anwendbar zu sein. Gleichzeitig soll der Instanzierungsaufwand, der wesentlich von der Erzeugung der hohen Zahl geometriebeschreibender Modellattribute geprägt ist, so gering wie möglich ausfallen. Abbildung 36 gibt einen Überblick über die Randbedingungen und die Anforderungen der Datenbeschaffung.

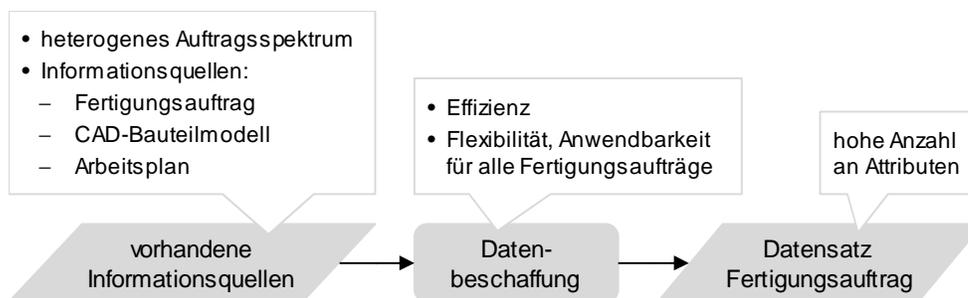


Abbildung 36: Randbedingungen und Anforderungen der Datenbeschaffung

### 4.7.3 Synthese und Bewertung von Datenbeschaffungsverfahren

Die Attribute des Informationsmodells bilden die wirtschaftlichen und technischen Anforderungen eines Teilarbeitsvorgangs an die einzusetzende Vorrichtung ab. Zur Formulierung dieser Anforderungen und zur Ableitung der entspre-

chenden Attributwerte sind Wissen und Erfahrung aus der Vorrichtungskonstruktion und -planung erforderlich. Grundsätzlich kann die Instanziierung dieser Daten manuell durch den Vorrichtungsplaner oder automatisiert durch ein analytisches oder wissensbasiertes Verfahren erfolgen. In Tabelle 6 sind die Fähigkeiten und Einsatzbedingungen beider Vorgehensweisen anhand ihrer Einflussgrößen dargestellt.

	manuelle Instanziierung	automatisierte Instanziierung
Wissensart <sup>8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• implizites Wissen (<i>F</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• explizites Wissen (<i>B</i>)</li> </ul>
Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kleine Datenmenge (<i>B</i>)</li> <li>• durch Menschen les- und interpretierbar (<i>B</i>)</li> <li>• hohe Heterogenität, häufige Änderungen (<i>F</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Datenmenge (<i>F</i>)</li> <li>• maschinenlesbares Format (<i>B</i>)</li> <li>• Homogenität, seltene Änderungen (<i>B</i>)</li> </ul>
Ausgangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kleine Datenmenge (<i>B</i>)</li> <li>• durch Menschen schreibbar (<i>B</i>)</li> <li>• geringer Erzeugungsaufwand der Einzeldaten (<i>B</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Datenmenge (<i>F</i>)</li> <li>• maschinenschreibbares Format (<i>B</i>)</li> <li>• hoher (Rechen-)Aufwand zur Erzeugung der Einzeldaten (<i>F</i>)</li> </ul>

*Tabelle 6: Fähigkeiten (*F*) und Bedingungen (*B*) für einen Einsatz der manuellen und der automatisierten Instanziierung eines fertigungsauftragsbeschreibenden Datensatzes*

Eine Analyse des Datensatzes für die Clusteranalyse offenbart, dass weder ein rein manuelles noch ein rein automatisiertes Instanzierungsverfahren angewendet werden kann (Tabelle 7). Die Formulierung dieser Anforderungen, z. B. durch die Festlegung möglicher Bestimmflächen, ist vergleichbar mit den Funktionen rechnerunterstützter Systeme für die Vorrichtungskonstruktion (vgl. Abschnitt 2.3.6, S. 24). Deren limitierte Anwendungsgebiete zeigen auch die Grenzen für eine automatisierte Instanziierung des Spannmodells auf. Für ein stark begrenztes Anwendungsgebiet könnte eine automatisierte Instanziierung auf Basis eines Expertensystems erfolgen, für das heterogene Auftragspektrum eines Lohnfertigers sind wissensbasierte Systeme jedoch zu unflexibel, da sie nicht den gesamten Wissensbereich abdecken können. Wird zusätzlich die hohe Anzahl zu erzeugender Daten berücksichtigt, dann muss das flexibel einsetzbare Wissen des Vorrichtungsplaners, unterstützt durch die Rechenleistung datenverarbeitender

<sup>8</sup> Implizites Wissen ist an Personen gebunden, schwer kommunizierbar und kaum formalisierbar. Explizites Wissen ist formalisierbar, kommunizierbar und speicherbar (VDI 5610).

Systeme, für die Instanziierung der geometriebeschreibenden Attribute eingesetzt werden.

Die restlichen Attribute des Informationsmodells bilden über ein nominales oder ordinales Skalenniveau klassifizierte Anforderungen ab, beispielsweise bezüglich der erforderlichen Kraftaufnahme oder der Spannpräzision einer Vorrichtung. Ihre Formulierung kann nur mittels impliziten Wissens erfolgen. Aufgrund der begrenzten Anzahl dieser Attribute können sie aber mit vertretbarem Aufwand ohne Rechnerunterstützung durch den Vorrichtungsplaner instanziiert werden.

Attributtypen	Eingangsdaten	Art des Wissens	Ausgangsdaten	Fazit
geometriebeschreibende Attribute für Clusteranalyse (metrisch)	kleine Menge mit hoher Heterogenität	implizites Wissen	große Menge in einem maschinen-schreibbaren Format	<i>manuelle und automatisierte Instanziierung</i>
klassifizierende Attribute (nominal, ordinal)	kleine Menge mit hoher Heterogenität	implizites Wissen	geringe Menge in einem menschenschreibbaren Format	<i>manuelle Instanziierung</i>

*Tabelle 7: Instanziierungsverfahren für die im Informationsmodell enthaltenen Attributtypen*

### 4.7.4 Konzept der Datenbeschaffung

Ein Großteil der im Informationsmodell abgebildeten Auftragseigenschaften und Anforderungen an den Vorrichtungseinsatz wird durch eine handhabbare Menge an Attributen repräsentiert, die mit geringem Aufwand durch den Vorrichtungsplaner instanziiert werden können. Er erhält diese Informationen aus dem Fertigungsauftrag und dem Arbeitsplan und er leitet sie mit seinem Fachwissen aus ersten Ergebnissen der Vorrichtungsplanung ab.

Die Eingangsdaten der Clusteranalyse werden über ein manuell-automatisiertes Verfahren instanziiert, das das Wissen und die Flexibilität des Menschen nutzt, um mit geringem Aufwand eine handhabbare Menge an Informationen zu erzeugen, und welches diese Informationen anschließend automatisiert in Daten der geforderten Detailliertheit und Menge umwandelt.

Das Verfahren besteht aus zwei sequentiellen Schritten:

1. der manuellen Erzeugung von wenigen Objekten auf Basis heterogener Eingangsinformationen unter Anwendung impliziten und expliziten Wissens und
2. der automatisierten Erzeugung großer Datenmengen auf Basis einheitlich beschriebener, formalisierter Objekte unter Anwendung expliziter Regeln.

Im ersten Schritt wird eine formale Beschreibung der geometrischen Anforderungen an eine Vorrichtung erzeugt. Die Anforderungen bestehen aus Punkten im Raum, Richtungsangaben, Bewegungen oder Flächen, die jeweils einen direkten Bezug zur Gestalt des zu fertigenden Werkstücks aufweisen. Da die Gestaltinformationen als CAD-Modell vorliegen, liegt es nahe, die geometrischen Anforderungen in einem CAD-System durch Geometrielemente zu beschreiben. Für die zu erzeugenden Punkte, Vektoren und Flächen sind einheitliche geometrische Elemente zu definieren, die vom CAD-System formalisiert bereitgestellt werden und durch den Vorrichtungsplaner aufwandsarm erzeugt werden können. Abbildung 37 zeigt exemplarisch, wie potentielle Bestimm- und Spannflächen durch elliptische Flächen auf einem CAD-Werkstückmodell dargestellt werden können. Neben seinem konstruktionstechnischen Wissen muss der Vorrichtungsplaner bei der Erzeugung der Geometrielemente Regeln beachten, die die Vergleichbarkeit der Modellattribute im Rahmen der Clusteranalyse sicherstellen.

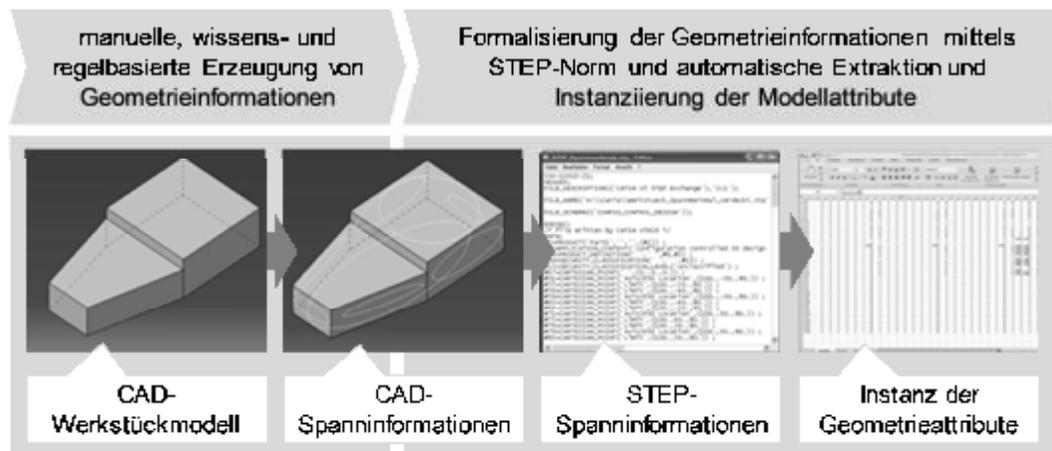


Abbildung 37: Instanziierung geometriebeschreibender Attribute des Informationsmodells

Mit der Erzeugung der Geometrielemente sind die für die Modellinstanziierung benötigten Geometrieinformationen bereits vollständig im CAD-Modell enthalten. Sie müssen nun ausgelesen und in den auftragsbeschreibenden Datensatz überführt werden. Die automatische Modellinstanziierung beginnt mit der Trans-

formation der Geometrieelemente in ein formales und neutrales Datenformat. Zwar sind die Geometrieelemente bereits durch das CAD-System formal beschrieben, dieses proprietäre Format genügt jedoch nicht den Anforderungen an eine allgemeingültige Lösung. Schnittstellenformate für den Austausch von Geometrieinformationen zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen, wie IGES oder STEP, ermöglichen eine standardisierte und allgemeingültige Beschreibung der Geometrieelemente und bieten sich für eine automatisierte Analyse an.

Für das vorliegende Problem hat sich das STEP-Format gegenüber dem IGES-Format als vorteilhaft erwiesen, da es die für das Informationsmodell erforderlichen Daten explizit enthält und somit eine automatisierte Verarbeitung erleichtert. Die textuelle STEP-Notation beschreibt eine geometrische Struktur hierarchisch durch Punkte, Linien, Flächen und geometrische Volumina (ANDERL & TRIPPNER 2000, S. 73). Bezeichnungen, die im CAD-System einem geometrischen Element zugewiesen werden, sind auch in der STEP-Beschreibung enthalten. Daher ist es möglich, durch eine automatisierte Textanalyse nach bestimmten Elementbezeichnungen zu suchen, mittels der STEP-Beschreibungssystematik die geometrischen Daten jedes Unterelements auszulesen und diese in einen Datensatz hineinzuschreiben. So können die vom Vorrichtungsplaner im CAD-System erzeugten Geometrieelemente in Form ihrer STEP-Beschreibung automatisch ausgelesen und die modellrelevanten Daten in den Datensatz einer Spannaufgabe überführt werden.

### **4.8 Konzept der Methodik**

Der anfangs dieses Kapitels erarbeitete Methodikentwurf und die anschließend entwickelten Teillösungen werden in diesem Abschnitt zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt.

Die Methodik basiert auf dem Ansatz, durch eine ganzheitliche Vorrichtungplanung bei jedem Fertigungsauftrag schrittweise ein hinsichtlich der vorrichtungsinduzierten Herstellkosten optimal strukturiertes Vorrichtungssystem aufzubauen (Abbildung 38). Der Fokus der Methodik liegt dabei auf der Gewinnung und Analyse einer möglichst umfassenden Informationsbasis, aus der die Vorrichtungsalternativen für den aktuellen Auftrag identifiziert und unter Berücksichtigung zukünftiger Planungssituationen ganzheitlich bewertet werden können.

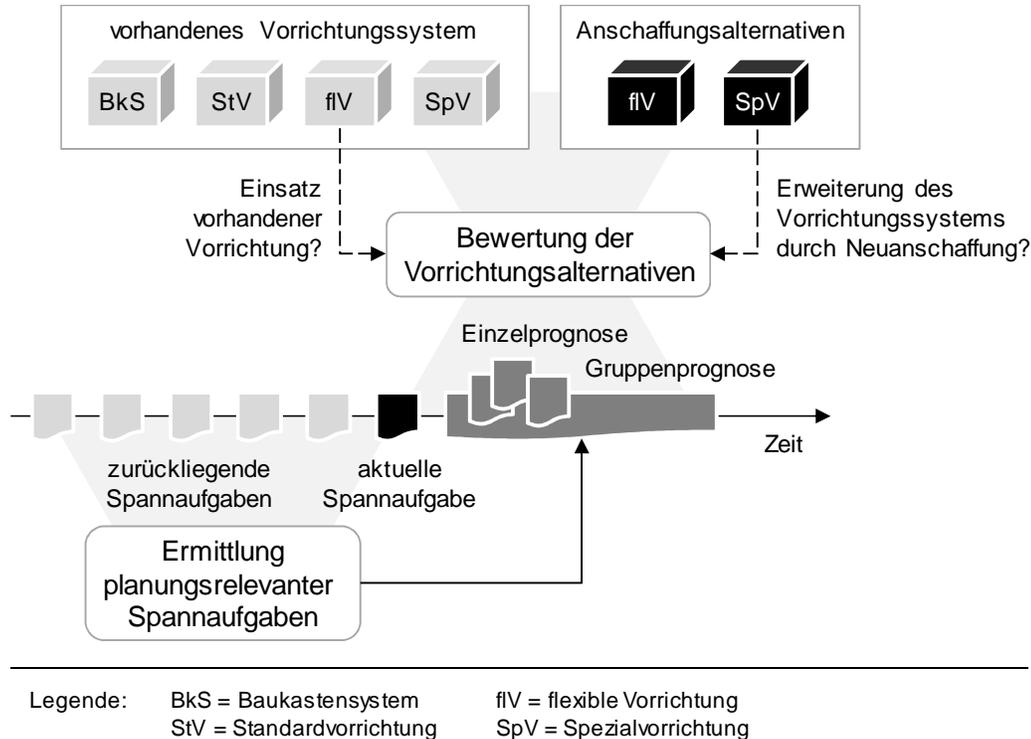


Abbildung 38: Ansatz zur Strukturierung eines Vorrichtungssystems in der Lohnfertigung

Im Einzelnen folgt die Methodik dem in Abbildung 39 dargestellten und im Folgenden erläuterten Ablauf: Der Planungsprozess beginnt mit der Abbildung des aktuellen Fertigungsauftrags anhand eines Informationsmodells, in dem die Anforderungen des Auftrags und seiner Teilarbeitsvorgänge bzw. Spannaufgaben an die einzusetzenden Vorrichtungen möglichst lösungsneutral beschrieben werden. Der Datensatz gliedert sich in wirtschaftliche Auftragsdaten und eine oder mehrere Spannaufgaben. Die technologischen Anforderungen einer Spannaufgabe bestehen aus dem Bearbeitungskomplex, den Werkstückeigenschaften und den möglichen Spannplänen, die auf Basis standardisierter Bestimm- und Spannprinzipien modelliert werden und dadurch eine durchgängige Standardisierung der Vorrichtungskonstruktion bewirken. Die Instanziierung des Informationsmodells erfolgt mit Daten aus dem Fertigungsauftrag, dem Arbeitsplan und der konventionellen Vorrichtungsplanung und wird durch eine automatisierte, CAD-basierte Datenerzeugung unterstützt, die eine detaillierte Abbildung der Spannpläne ermöglicht.

Im Anschluss an die Datenbeschaffung werden die in der Vergangenheit erstellten Spannpläne auf Ähnlichkeit zur aktuellen Spannaufgabe hin untersucht. Die Ähnlichkeit zweier Spannaufgaben wird in diesem Zusammenhang durch ihr Potential beschrieben, in der gleichen Vorrichtung wirtschaftlich erfolgreich erfüllt

zu werden. Dies erfolgt zunächst mittels Clusteranalyse, die auf Basis der Spannpläne eine hierarchische Struktur verschiedener Spannaufgabenpartitionen erzeugt. Da durch die Clusteranalyse nicht alle Gruppierungslogiken abgebildet werden können, schließt sich eine heuristische Optimierung der Gruppenstruktur an, die insbesondere die fertigungstechnischen Anforderungen des Bearbeitungskomplexes berücksichtigt.

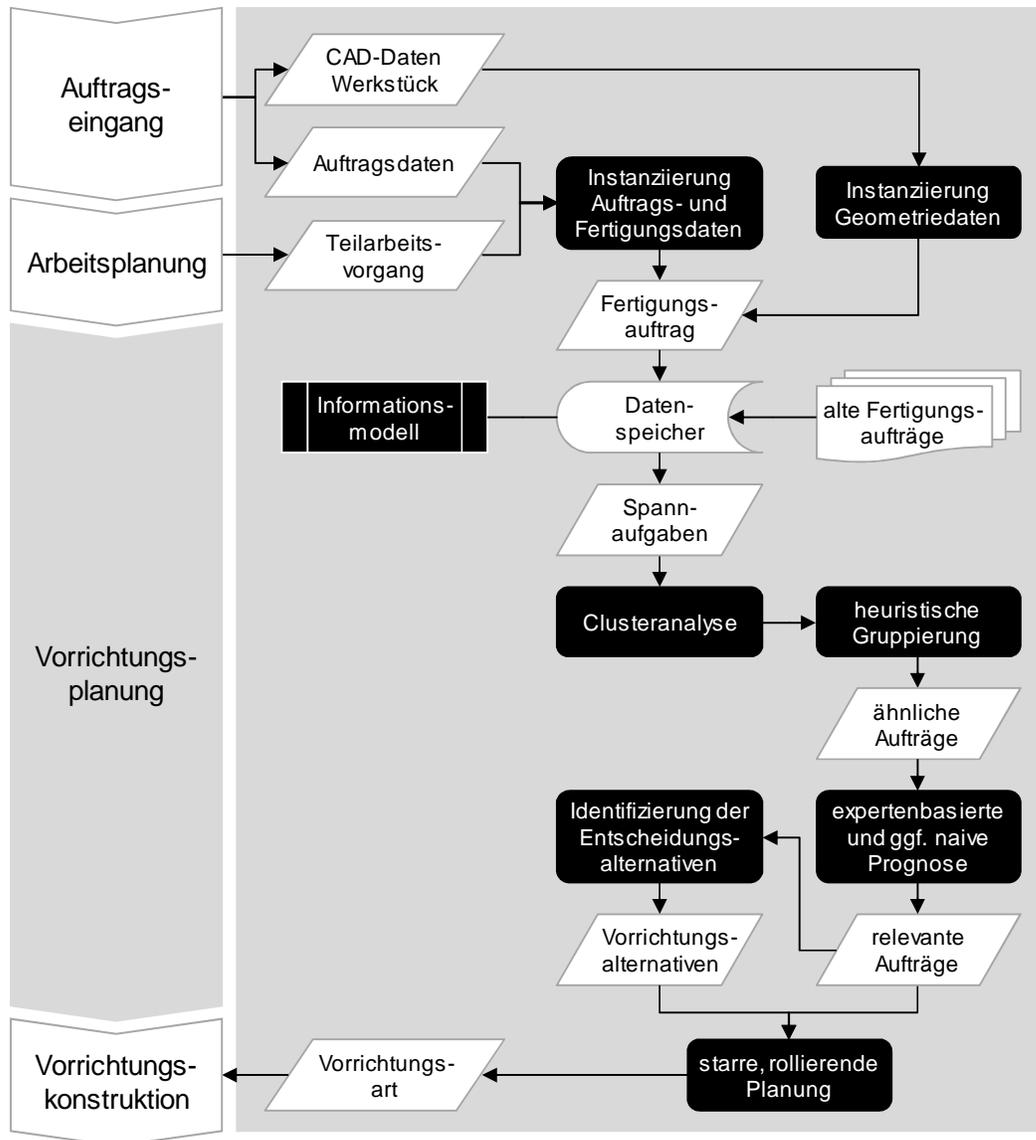


Abbildung 39: Konzept der Methodik zur auftragsorientierten Strukturierung eines Vorrichtungssystems in der Lohnfertigung

Die durch die Gruppenanalyse ermittelten Fertigungsaufträge der Vergangenheit dienen als Informationsbasis für eine eingegrenzte, zielgerichtete Prognose der-

jenigen zukünftigen Fertigungsaufträge, deren Planungsentscheidungen den Erfolg der aktuellen Vorrichtungplanung beeinflussen. Die Prognose erfolgt durch eine interne Befragung des Vertriebs und wird flankiert durch eine kombinierte naive und expertengestützte Prognose, die ein umfassenderes Bild zukünftiger Fertigungsaufträge im Vergleich zur reinen Expertenbefragung vermittelt.

Auf Grundlage des Prognoseergebnisses wählt der Vorrichtungsplaner die Fertigungsaufträge aus, die zukünftige Planungssituationen mit Abhängigkeiten von der aktuellen Vorrichtungplanung darstellen. Für jede Planungssituation bestimmt der Vorrichtungsplaner die Entscheidungsalternativen, die aus der jeweiligen Vorrichtungsart bestehen. Er verfügt nun über alle Informationen, um nach dem Prinzip der starren, rollierenden Planung den für die aktuelle Vorrichtungplanung relevanten Aktionsbaum aufzustellen, die Konsequenzen der verschiedenen Entscheidungsalternativen zu ermitteln und auf dieser Basis die Vorrichtungsart festzulegen. Falls eine Vorrichtung neu beschafft werden soll, können aus den Datensätzen der vorrichtungsrelevanten Auftragsgruppe die funktionalen Anforderungen an die zu entwickelnde Vorrichtung abgeleitet werden.

Damit liegen alle Voraussetzungen vor, um die Methodik im folgenden Kapitel detailliert auszuarbeiten.



## **5 Detaillierung der Methodik**

### **5.1 Allgemeines**

Auf Grundlage des im vorhergehenden Kapitel erarbeiteten Konzepts einer auftragsorientierten Strukturierung von Vorrichtungssystemen wird die Methodik in den folgenden Abschnitten detailliert. Ausgehend von der Spezifikation des Informationsmodells wird das Planungsvorgehen für einen Fertigungsauftrag zunächst im Überblick und anschließend schrittweise beschrieben.

### **5.2 Spezifikation des Informationsmodells**

#### **5.2.1 Überblick**

Das Informationsmodell beschreibt diejenigen Eigenschaften eines Fertigungsauftrags, die im Rahmen der Vorrichtungsplanung als Eingangsinformationen für die Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben (Abschnitt 5.5, S. 104), für die Prognose planungsrelevanter Spannaufgaben (Abschnitt 5.6, S. 114) und für die Bestimmung der Vorrichtungsart (Abschnitt 5.7, S. 119) verwendet werden.

Die Basisobjekte des Informationsmodells bestehen aus den Auftragsdaten und den Spannaufgaben eines Fertigungsauftrags und beschreiben für jede Spannaufgabe die Anforderungen des Werkstücks und des Bearbeitungskomplexes (vgl. Abschnitt 4.6.4, S. 82). In den folgenden Abschnitten wird eine Grundspezifikation des Informationsmodells vorgestellt, dessen objektbeschreibende Attribute die Basis für eine betriebs- und anlagenspezifische Modellentwicklung darstellen.

#### **5.2.2 Repräsentation des Fertigungsauftrags**

Ein Fertigungsauftrag wird neben einem eindeutigen Identifikationsschlüssel durch Auftragsdaten, eine oder mehrere Spannaufgaben und weitere auftragspezifische Informationsobjekte beschrieben (Abbildung 40). Die Auftragsdaten enthalten das Datum, die Stückzahl und die Anzahl der Fertigungslose eines Fertigungsauftrags. Diese Informationen werden als Liste abgebildet, falls das gleiche Erzeugnis im Rahmen mehrerer Aufträge gefertigt wurde. Auf diese Weise wird die Historie des Fertigungsauftrags dokumentiert, die in Form von Stück-

zahlverläufen als Basis für die Prognose zukünftiger Stückzahlen und für die wirtschaftliche Bewertung neuer Vorrichtungen verwendet wird.

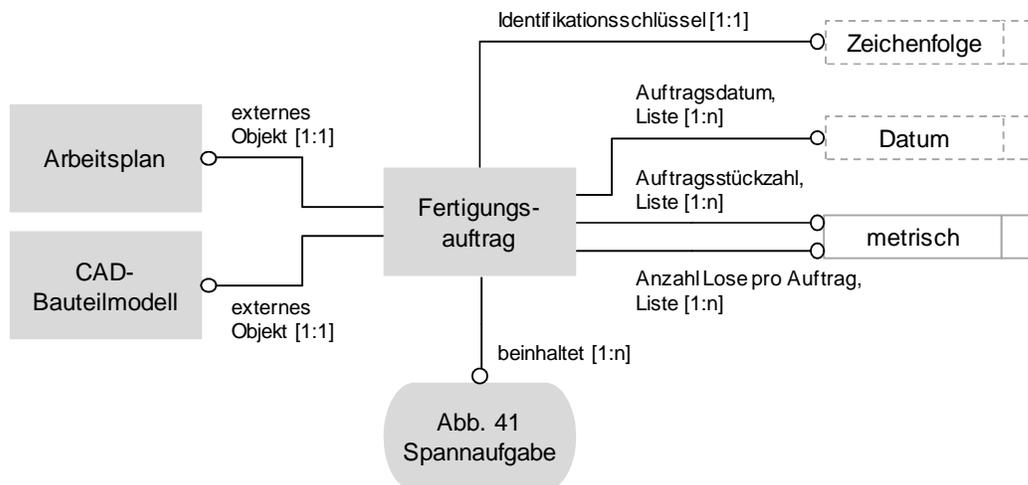


Abbildung 40: Modellierung eines Fertigungsauftrags in EXPRESS-G, siehe Abschnitt 9.2 (S. 170) zur Erläuterung der grafischen Notation

Der Arbeitsplan und das CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils sind einem Auftragsdatensatz als externe Informationsobjekte beigefügt. Der Arbeitsplan beschreibt die Teilarbeitsvorgänge, von denen die Spannaufgaben abgeleitet werden, und enthält die einzelnen Fertigungsschritte, anhand derer die fertigungstechnischen Anforderungen an eine Spannaufgabe identifiziert werden. Das CAD-Modell bildet die Grundlage für die Modellierung des Spannplans und weiterer geometrischer Anforderungen an den Vorrichtungseinsatz.

### 5.2.3 Repräsentation der Spannaufgabe

Das Informationsmodell einer Spannaufgabe (Abbildung 41) enthält zwei Objekte, die die Anforderungen des Werkstücks und des Bearbeitungskomplexes an den Vorrichtungseinsatz beschreiben, sowie ein CAD-Modell, das die spanngeometrischen Anforderungen abbildet. Das CAD-Modell stellt die Datengrundlage für die automatisierte Instanziierung der Eingangsdaten der Clusteranalyse dar und ermöglicht dem Vorrichtungsplaner eine anschauliche Visualisierung des Spannplans und weiterer geometrischer Anforderungen, beispielsweise der Verfahrenswege einer in der Vorrichtung integrierten Kinematik.

Eine Spannaufgabe wird zusätzlich durch Einzelattribute beschrieben, die Eingangsinformationen für die Auswahl alternativer Vorrichtungsarten enthalten. Über einen Identifikationsschlüssel können die bisher für eine Spannaufgabe eingesetzten Vorrichtungen ermittelt und bei der Auswahl möglicher Vorrichtungs-

alternativen berücksichtigt werden. Zusätzlich enthält das Informationsmodell die Ausführungsarten dieser Vorrichtungen, woraus die Einsatzflexibilitäten der vorhandenen Vorrichtungen abgeleitet und das Einsatzpotential einer neuen wiederverwendbaren Vorrichtung bewertet werden können.

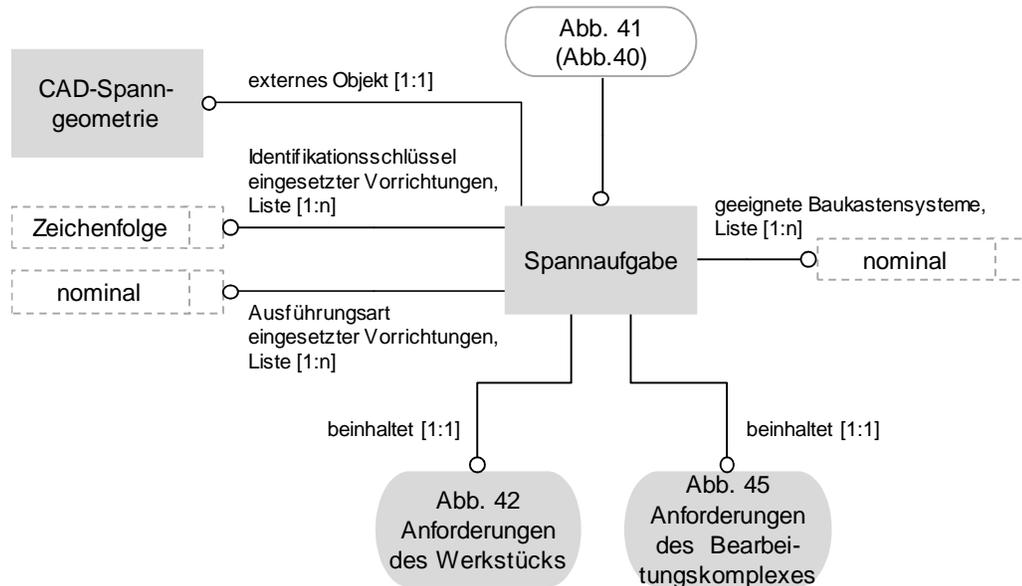


Abbildung 41: Modellierung einer Spannaufgabe in EXPRESS-G

Ein weiteres Attribut benennt in einer Liste diejenigen Baukastensysteme, die aus technischer Sicht für die Spannaufgabe eingesetzt werden können. Dies können zwar bereits vorhandene Baukastensysteme sein, doch bezieht sich das Attribut v. a. auf potentielle Neuanschaffungen, die durch das Vorrichtungswesen in Erwägung gezogen und durch Analyse dieses Attributs im Rahmen der Vorrichtungsplanung bewertet werden können.

## 5.2.4 Repräsentation der Werkstückanforderungen

### 5.2.4.1 Überblick

Die Werkstückanforderungen werden im Informationsmodell mindestens durch den auf einem Spannmodell beruhenden Spannplan beschrieben (Abbildung 42). Der Spannplan repräsentiert die geometrischen Anforderungen an eine Vorrichtung, die in der Clusteranalyse zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben verwendet werden. Er wird daher als metrisch skaliertes Merkmalsvektor abgebildet.

Das Informationsmodell kann weitere Attribute enthalten, damit über den Spannplan hinaus auch nichtgeometrische Anforderungen des Werkstücks abgebildet

werden, die in die Vorrichtungsplanung einfließen. Dies sind Werkstückeigenschaften, wie z. B. die Werkstückstabilität, die für die Beurteilung der Vereinbarkeit technischer Anforderungen verschiedener Spannaufgaben in einer Vorrichtung zu berücksichtigen sind.

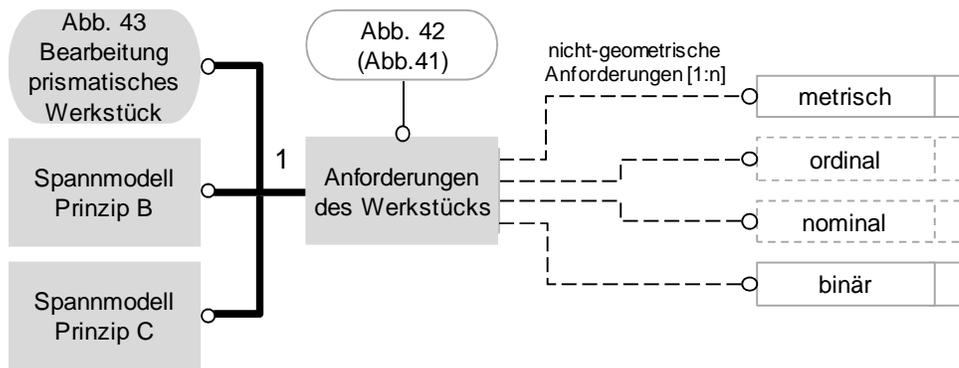


Abbildung 42: Modellierung der Werkstückanforderungen in EXPRESS-G

Die Aufgabe eines Spannumodells ist die Repräsentation der Anforderungen einer Spannaufgabe an den Spannplan einer Vorrichtung, der zumindest aus den Bestimm- und Spannpunkten besteht und um Stützpunkte oder andere geometrische Anforderungen erweitert werden kann.

Spannumodelle sind von der Werkstückform und -anordnung abhängig, so dass in den meisten Fällen kein allgemeingültiges Spannumodell für das gesamte Fertigungsspektrum eines Betriebs definiert werden kann. Es müssen dann mehrere Spannumodelle entwickelt werden, die das Spektrum an Spannaufgaben weit möglichst abdecken. Jedes Spannumodell für sich soll aber so breit wie möglich anwendbar sein, da Spannaufgaben nur dann mittels Clusteranalyse verglichen werden können, wenn sie durch das gleiche Spannumodell beschrieben sind.

Bei der Definition eines Spannumodells ist die Vergleichbarkeit der instanziierten Spannpläne sicherzustellen. Neben einer einheitlichen Objektbeschreibung durch Attribute enthält ein Spannumodell daher einen Satz an Regeln, der die Anordnung des Werkstücks im Bezug zur Vorrichtung sowie die Anordnung und die Benennung der geometrischen Objekte vorgibt. Da diese Festlegungen den Konstruktionspielraum für eine Vorrichtung maßgeblich einschränken, müssen allgemeine und betriebsspezifische Konstruktionsstandards in das Spannumodell einfließen.

Im folgenden Abschnitt werden am Beispiel eines Spannumodells zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke die Repräsentation einer Spanngeometrie durch CAD-Objekte und davon abgeleitete Attribute beschrieben. Die dabei verwendete all-

gemeingültige Beschreibung geometrischer Anforderungen kann sowohl für andere Spanmodelle als auch für weitere geometrische Anforderungen verwendet werden, die durch den Bearbeitungskomplex (Abschnitt 5.2.5, S. 99) an eine Vorrichtung gestellt werden.

#### 5.2.4.2 Spanmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke

Das hier vorgestellte Spanmodell basiert auf dem 3-2-1-Bestimmprinzip und beschreibt die möglichen Wirkorte der sechs Bestimmelemente und der bis zu sechs Spannelemente. Die Wirkorte werden im CAD-Modell durch ebene, elliptisch begrenzte Flächen repräsentiert und im Informationsmodell durch

- eine eindeutige Bezeichnung der Bestimm- oder Spannfläche,
- einen Ortsvektor, der vom Ursprung des globalen Koordinatensystems auf den Mittelpunkt der Fläche zeigt,
- einen Normalenvektor, der senkrecht auf der Fläche steht und aus dem Werkstück herauszeigt, sowie
- die Flächenhöhe und -breite (Achsen der Ellipse)

beschrieben (Abbildung 43).

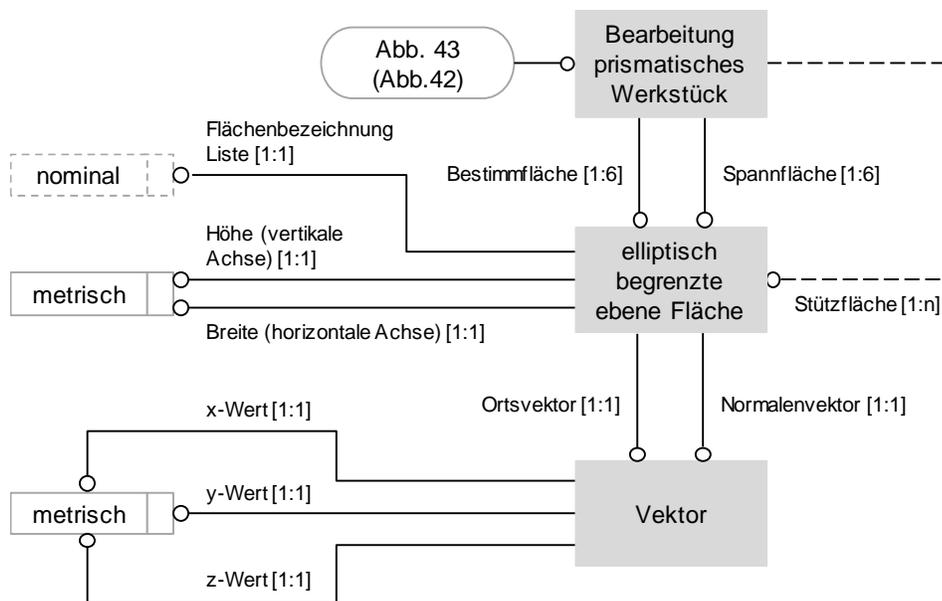


Abbildung 43: Datenstruktur eines Spanmodells für die Bearbeitung prismatischer Werkstücke in EXPRESS-G

Die Vergleichbarkeit der einzelnen Flächen des Spanmodells wird durch das in Abbildung 44 beispielhaft dargestellte Anordnungs- und Bezeichnungsschema sichergestellt. Das Werkstück wird in einem globalen Koordinatensystem so po-

sitioniert, dass die Bestimmflächen möglichst in den Ebenen  $x = 0$ ,  $y = 0$  und  $z = 0$  und die Spannflächen im positiven Raum des globalen Koordinatensystems liegen. Diese Anordnung erfolgt analog zum Bestimmen eines Werkstücks in einer realen Vorrichtung, deren Bestimmelemente als passive Funktionsträger fest in der Vorrichtung positioniert sind und deren Spannelemente beim Spannvorgang aktiv von vorne bzw. oben an die Spannungspunkte herangeführt werden. Um die Vergleichbarkeit der Spannpläne und zugleich den Standardisierungsgrad der Vorrichtungen weiter zu erhöhen, sollte sich die Anordnung des Werkstücks zusätzlich nach der Lage der Bestimm- und Spannflächen richten. D. h. beispielsweise, dass die 2. Bestimmebene eines Werkstücks (vgl. Abbildung 34, S. 81) immer parallel zur Ebene  $y = 0$  angeordnet wird.

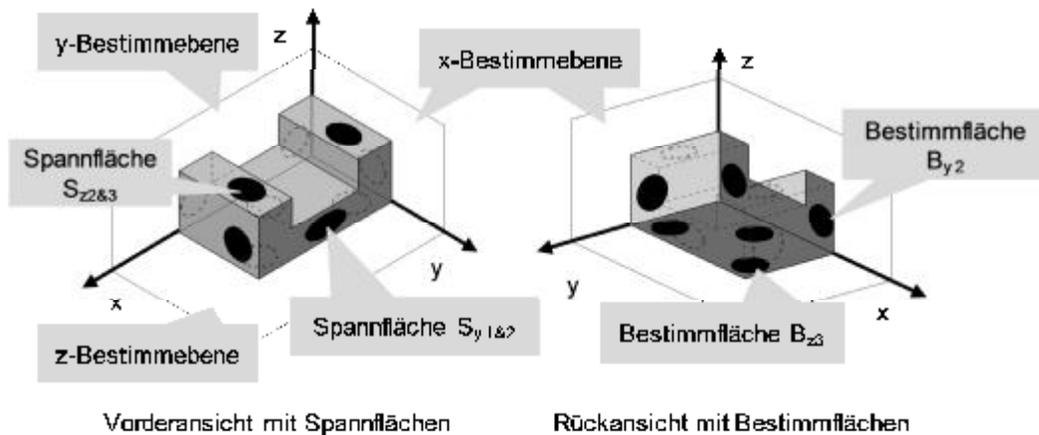


Abbildung 44: Anordnung des Werkstücks und der Bestimm- und Spannflächen im Spannmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke

Das Anordnungs- und Bezeichnungsschema für die zwölf Flächen des Spannmodells sorgt für die Vergleichbarkeit der Flächen gleicher Ausrichtung, beispielsweise der Bestimmflächen  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$  und  $B_{z3}$ . Falls keine Differenzierung in mehrere Bestimm- oder Spannflächen gleicher Ausrichtung erforderlich ist, können die möglichen Wirkorte, wie z. B. bei den Spannflächen  $S_y$  und  $S_z$  in Abbildung 44, durch eine einzige Fläche im CAD-Modell dargestellt werden.

### 5.2.4.3 Weitere Spannmodelle

Neben dem zuvor dargestellten Spannmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke können weitere Spannmodelle aus den in der Praxis und der Wissenschaft verwendeten Bestimm- und Spannprinzipien abgeleitet werden (TRAPPEY & LIU 1990; LIU 1994; BANSAL ET AL. 2008; AOYAMA & KAKINUMA 2005):

- Spannung zylindrischer Werkstücke nach dem V-Block-Bestimmprinzip,
- Spannung allgemein geformter Werkstücke nach dem 3-1-1-1-Bestimmprinzip mit drei horizontalen, unabhängig voneinander angeordneten Bestimmelementen und
- Spannung formlabiler Werkstücke nach dem N-2-1-Bestimmprinzip mit beliebig vielen vertikalen Bestimmelementen.

Für die Spannung einzelner Werkstücke lassen sich diese Bestimmprinzipien direkt in das Spannmodell übernehmen. Wie zuvor am Beispiel der Bearbeitung prismatischer Werkstück dargestellt, müssen sie lediglich um die Regeln zur Positionierung des Werkstücks, die maximale Anzahl an Spannelementen und die Regeln zur Anordnung und Bezeichnung der Bestimm- und Spannelemente ergänzt werden.

Solche Spannmodelle können mit reduzierten Spannelementen auch für Fügevorrichtungen verwendet werden, wenn die beiden Fügepartner durch zwei separate, relativ zueinander verfahr- und positionierbare Spanneinheiten in die Fügeposition gebracht werden. Werden die Fügepartner direkt in der Fügeposition gespannt, so sind diese Spannmodelle zu einem integrierten Spannmodell für beide Werkstücke weiterzuentwickeln, in dem ein Werkstück als Bestimmelement des anderen Werkstücks dient.

### 5.2.5 Repräsentation der Anforderungen des Bearbeitungskomplexes

Die Anforderungen des Bearbeitungskomplexes an eine Vorrichtung sind abhängig von den eingesetzten Fertigungsverfahren, Werkzeugen und Fertigungsanlagen. Daher können sie in dieser Arbeit nicht vollständig und allgemeingültig formuliert werden. Sie betreffen beispielsweise die Spannpräzision einer Vorrichtung oder die Eigenschaften einer in die Vorrichtung integrierten Kinematik.

Anhand der Anforderungen des Bearbeitungskomplexes wird im Verlauf der Vorrichtungsplanung analysiert, ob verschiedene Spannaufgaben aus fertigungstechnischer Sicht in einer Vorrichtung erfüllt werden können. Um eine effiziente Filterung geeigneter Spannaufgaben zu ermöglichen, werden die Anforderungen des Bearbeitungskomplexes komplett im Informationsmodell mittels metrisch, ordinal oder nominal skalierten Attribute abgebildet.

Ein solches Informationsmodell zeigt Abbildung 45 beispielhaft für eine Elektronenstrahlschweißvorrichtung. Es bildet spezielle Funktionsanforderungen, wie die Spannpräzision, die elektrische Leitfähigkeit und die Positioniergenauigkeit, durch ordinal skalierte Attribute ab und orientiert sich damit an betrieblichen Konstruktionsstandards, die anhand funktionaler Baureihen die Variantenvielfalt

des Vorrichtungssystems reduzieren und somit die Wiederverwendbarkeit einzelner Vorrichtungen erhöhen sollen. Anforderungen wie im betrachteten Beispiel die Vakuumtauglichkeit, die für alle betrachteten Vorrichtungen gelten, sind nicht im Informationsmodell enthalten, da sie nicht differenzierend wirken.

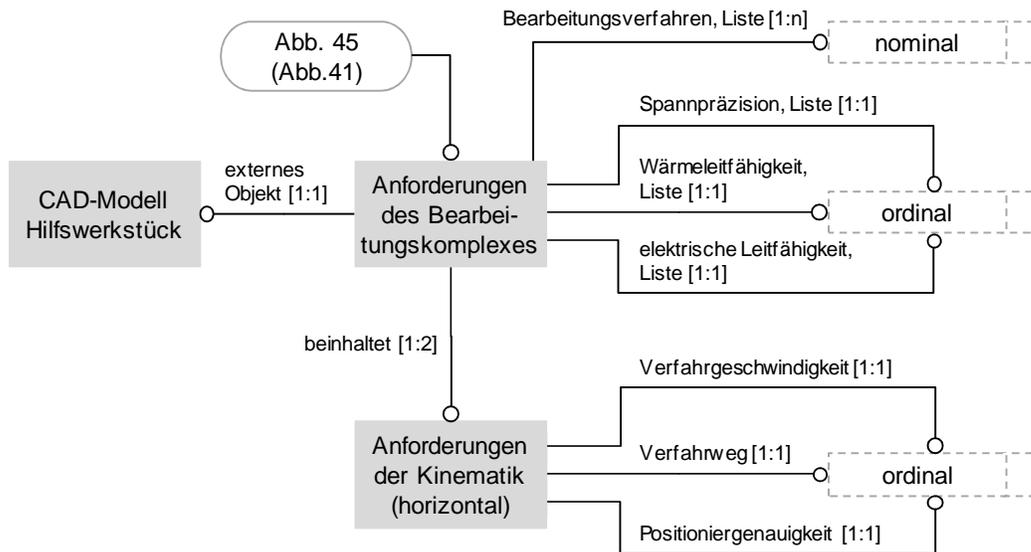


Abbildung 45: Modellierung der Anforderungen des Bearbeitungskomplexes in EXPRESS-G am Beispiel einer Elektronenstrahlschweißvorrichtung

Beim Elektronenstrahlschweißen wird ein Hilfswerkstück unter der Schweißnaht positioniert, um die überschüssigen Elektronen aufzufangen (SCHULTZ 2000, S. 107). Der hierfür bei der Vorrichtungskonstruktion zu berücksichtigende Freiraum wird in dem aufgeführten Beispiel als CAD-Objekt dargestellt. Dies bedeutet für den Vorrichtungsplaner, dass er die Vereinbarkeit dieser geometrischen Anforderung in einer einzigen Vorrichtung nur anhand der CAD-Modelle der verschiedenen Spannaufgaben prüfen kann. Analog zu den Bestimm- und Spannflächen könnte das Hilfswerkstück auch durch aus dem CAD-Modell abgeleitete, metrisch skalierte Attribute beschrieben und somit in der Clusteranalyse berücksichtigt werden.

### 5.3 Auftragspezifischer Planungsablauf im Überblick

Der auftragspezifische Ablauf zur Strukturierung eines Vorrichtungssystems (Abbildung 46) beginnt mit der Abbildung der Anforderungen der aktuellen Spannaufgabe in einem Datensatz. Dieser wird anschließend mittels Cluster-

analyse dazu verwendet, ähnliche Spannaufgaben aus der Vergangenheit zu identifizieren.

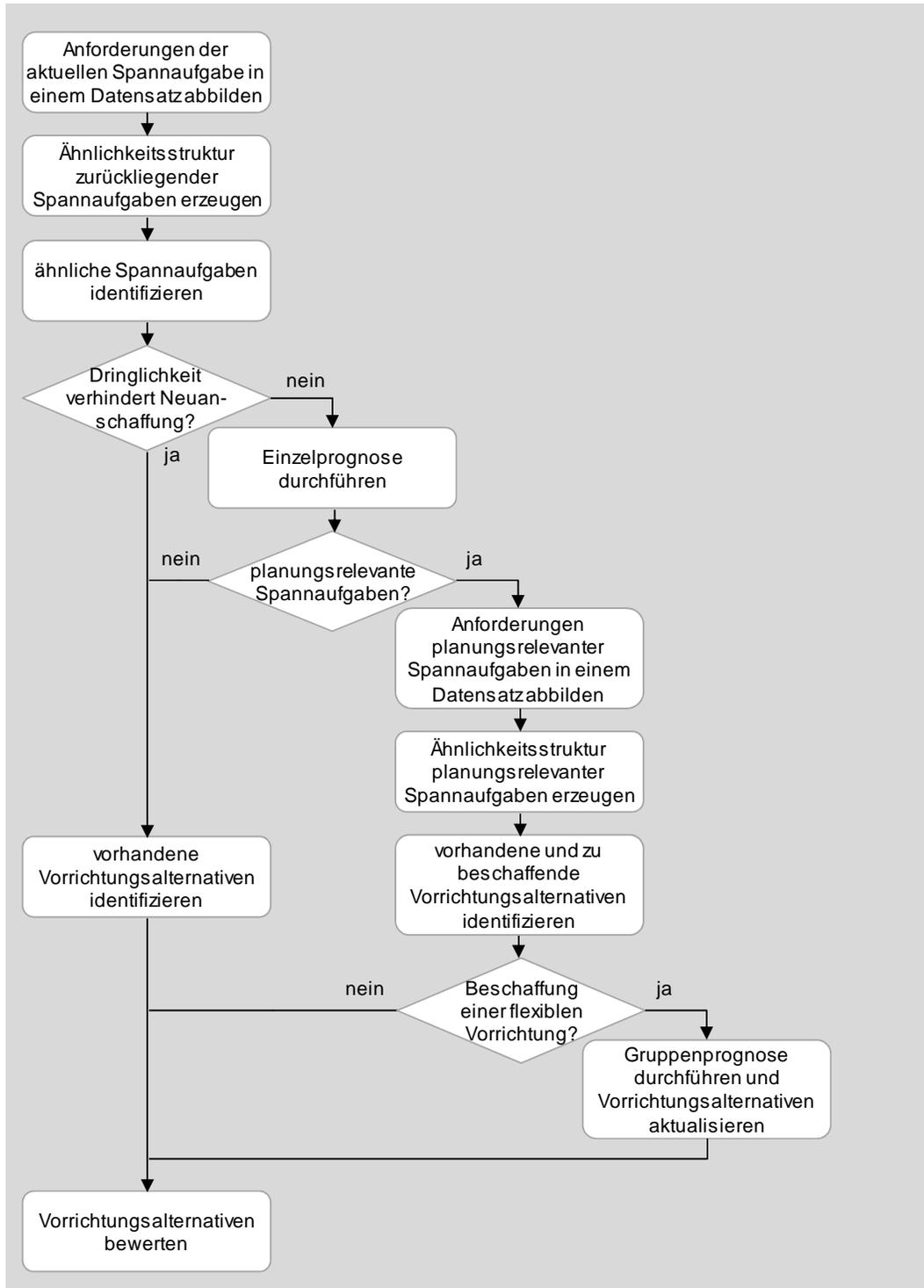


Abbildung 46: Auftragspezifischer Ablauf der Methodik

Die darauf folgende Prognose von Spannaufgaben dient dem Zweck, das Synergiepotential für neu zu beschaffende Vorrichtungen auszuschöpfen. Sie wird daher nur durchgeführt, wenn der Termin der Auftragserfüllung eine Neubeschaffung erlaubt. Die Prognose besteht zunächst nur aus einer Einzelprognose. Wenn durch sie planungsrelevante Spannaufgaben ermittelt werden konnten, werden diese wie die aktuelle Spannaufgabe in einem Datensatz abgebildet, so dass die Ähnlichkeitsstruktur der planungsrelevanten Spannaufgaben mittels Clusteranalyse erzeugt werden kann.

Die Ähnlichkeitsstruktur bildet schließlich die Informationsbasis, um aus den vorhandenen und zu beschaffenden Vorrichtungen die geeigneten Alternativen für die aktuelle Spannaufgabe und die planungsrelevanten zukünftigen Spannaufgaben zu identifizieren. Falls eine neue flexible Vorrichtung in Betracht kommt, kann die Einzelprognose um eine Gruppenprognose ergänzt werden, um eine breitere Informationsgrundlage für die Auswahl der Vorrichtungsalternativen zu erhalten. Das Planungsvorgehen endet mit der Bewertung der Vorrichtungsalternativen und der Auswahl einer Vorrichtung für die aktuelle Spannaufgabe.

### **5.4 Datenbeschaffung**

#### **5.4.1 Überblick**

Der erste Schritt der Vorrichtungsplanung besteht in der Abbildung des aktuellen Fertigungsauftrags anhand des Informationsmodells. Ein Teil der Instanzierungsdaten kann aus der konventionellen Vorrichtungsplanung übernommen werden, die CAD-Modelle und die davon abgeleiteten Eingangsdaten der Clusteranalyse werden dagegen über ein methodikspezifisches Verfahren erzeugt.

#### **5.4.2 Datenübernahme aus der konventionellen Vorrichtungsplanung**

Die Datenbeschaffung besteht im Wesentlichen aus der Dokumentation von Ergebnissen der konventionellen Vorrichtungsplanung im Datensatz des Fertigungsauftrags. Während die Auftragsdaten (vgl. Abbildung 40, S. 94) direkt aus dem Fertigungsauftrag entnommen werden, müssen die Informationen zur Beschreibung einer Spannaufgabe zunächst in der Anfangsphase der Vorrichtungsplanung erzeugt werden, bevor sie in Form der technischen Anforderungen des Werkstücks (vgl. Abbildung 42, S. 96) und des Bearbeitungskomplexes (vgl. Abbildung 45, S. 100) in den Datensatz übernommen werden können.

Bei der Instanziierung des Attributs, das die Eignung einer Spannaufgabe für ein bestimmtes Baukastensystem anzeigt (vgl. Abbildung 41, S. 95), ist zu beachten, dass diese Eigenschaft von verschiedenen Anforderungen des Werkstücks und des Bearbeitungskomplexes abhängig ist. Das Attribut stellt ein aus mehreren Auftragseigenschaften aggregiertes Attribut dar, dessen Einflussgrößen und jeweilige Ausprägungen mit dem Wissen und der Erfahrung des Vorrichtungsplaners bestimmt werden müssen. Da Baukastensysteme einen sehr breiten Anwendungsbereich aufweisen, ist es sinnvoll, zunächst von der Eignung einer Spannaufgabe für ein Baukastensystem auszugehen und diese anhand einsatzeinschränkender Auftragseigenschaften zu hinterfragen. Derartige technische Einsatzbeschränkungen können die Stabilität und die Spannpräzision einer Vorrichtung oder die erforderliche Zugänglichkeit des Werkzeugs zum Werkstück sein.

### **5.4.3 Erzeugung geometriebeschreibender Daten**

Die geometrischen Anforderungen einer Spannaufgabe werden als CAD-Objekte im CAD-Modell des Bauteils bzw. des entsprechenden Zwischenteils erzeugt und anschließend, falls sie in der Clusteranalyse berücksichtigt werden, rechnerunterstützt in einen metrisch skalierten Datensatz umgewandelt.

Für die Modellierung derjenigen Anforderungen, die nicht in die Clusteranalyse eingehen, gibt es keine Beschränkung in der Darstellungsform. Sie sollten so anschaulich wie nötig und so einfach wie möglich modelliert werden, so dass der Vorrichtungsplaner anhand der CAD-Modelle sicher und schnell die Anforderungen verschiedener Spannaufgaben vergleichen kann (vgl. Abschnitt 5.7.2.4).

Bei der Modellierung der in der Clusteranalyse verwendeten geometrischen Anforderungen, d. h. des Spannplans, müssen dagegen die Regeln des Spannmodells und des Instanziierungsverfahrens beachtet werden. Das Spannmodell definiert die Anzahl, die Anordnung und die Benennung der Geometrieelemente und das Instanziierungsverfahren schreibt das Geometrieelement vor, mit dem eine im Spannmodell definierte Anforderung modelliert wird. Grundsätzlich können alle standardisierten CAD-Elemente für die Modellierung und Instanziierung des Spannplans verwendet werden, solange ihre STEP-Beschreibung die im Informationsmodell enthaltenen Attribute formalisiert abbildet.

Für die Darstellung des Spannplans durch einen für die Clusteranalyse lesbaren Datensatz wird das CAD-Modell in das textbasierte STEP-Format umgewandelt. Die in der STEP-Beschreibung explizit enthaltenen Attributwerte des Spannplans werden durch ein Textanalyseprogramm (auch Parser genannt) automatisch ausgelesen und in den Datensatz der Spannaufgabe überführt. Die Funktionsweise

des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Parsers wird in Abschnitt 6.2 (S. 137) beschrieben. Der verwendete Algorithmus ist im Anhang (Abschnitt 9.3, S. 171) dokumentiert.

### **5.5 Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben**

#### **5.5.1 Überblick**

Die anhand des Informationsmodells beschriebene aktuelle Spannaufgabe wird in einem ersten Analyseschritt mit vergangenen Spannaufgaben verglichen, auf die das gleiche Spannmodell angewendet wurde. Es sollen ähnliche Spannaufgaben identifiziert werden, um für den folgenden Prognoseschritt eine Informationsgrundlage zu schaffen. Dazu werden insbesondere diejenigen Spannaufgaben gesucht, die das Potential aufweisen, zusammen mit der aktuellen Spannaufgabe von der gleichen integriert aufgebauten Vorrichtung erfüllt zu werden. Die Spannaufgaben werden daher zunächst anhand ihrer geometrischen Anforderungen an den Vorrichtungsaufbau analysiert. Diese sind in Form eines Spannplans durch metrisch skalierte Attribute im Informationsmodell beschrieben.

Die Analyse der Spannaufgaben erfolgt durch ein hierarchisch-agglomeratives Clusterverfahren. Das Gruppierungsvorgehen orientiert sich am allgemeinen Ablauf einer Clusteranalyse und gliedert sich in die Datenaufbereitung, die Distanzberechnung, die Gruppenbildung und die Analyse des Gruppierungsergebnisses.

#### **5.5.2 Datenaufbereitung**

##### **5.5.2.1 Sicherstellung der mathematischen Vergleichbarkeit**

Die gruppierungsrelevanten Daten des Informationsmodells genügen noch nicht den Anforderungen, die eine Clusteranalyse an die Eingangsdaten stellt. Daher werden in diesem und im darauf folgenden Abschnitt Maßnahmen zur Sicherstellung der mathematischen Vergleichbarkeit der Merkmale und Maßnahmen zur Gewährleistung der Gruppierungsqualität diskutiert.

Die Distanz zwischen zwei Objekten wird durch eine additive Überlagerung der merkmalspezifischen Distanzen berechnet. Folglich müssen die metrisch skalierten Objektmerkmale zur Sicherstellung der mathematischen Vergleichbarkeit die gleiche Dimension aufweisen (GRANOW 1984, S. 56). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Skalen bzw. Maßeinheiten zu einer

impliziten Merkmalsgewichtung führen, die dem Gruppierungszweck widersprechen kann (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 550). Die geforderte Dimensionsgleichheit und Skaleninvarianz der Merkmalsausprägungen wird i. d. R. durch eine Normierung mittels Spannweitennorm oder z-Transformation erzeugt, bei der die Merkmalsausprägungen anhand ihres Wertebereichs bzw. ihrer Standardverteilung normiert werden.

Die in die Clusteranalyse eingehenden Daten des Informationsmodells repräsentieren allesamt geometrische Abmessungen, deren einheitliche Skala durch das STEP-basierte Instanzierungsverfahren sichergestellt ist. Somit erfüllen die Geometriemerkmale die Forderungen nach Dimensionsgleichheit und Skaleninvarianz und sind ohne Normierung mathematisch vergleichbar. Eine Normierung der Merkmalsausprägungen ist in diesem Fall nicht nur unnötig, sondern würde sich auch negativ auf die Gruppierungsqualität auswirken, da sie die abgebildete Spanngeometrie in unerwünschtem Maße verzerrt. Merkmale mit einer kleinen Standardabweichung, d. h. mit ähnlichen Ausprägungen, gingen durch eine Normierung mit unverhältnismäßig großen Einzeldistanzen in die Gruppenanalyse ein. Analog würden Merkmale mit einer hohen Standardabweichung, d. h. mit sehr unterschiedlichen Ausprägungen, mit einer zu geringen Einzeldistanz berücksichtigt.

### 5.5.2.2 Sicherstellung der Gruppierungsqualität

Die Qualität der Clusteranalyse ist wesentlich von einer *problemangepassten Merkmalsgewichtung* abhängig. Der Gruppierungszweck besteht in der Differenzierung integriert aufgebauter Vorrichtungen, die sich umso ähnlicher sind, je geringer der Integrations- und Anpassungsaufwand der Vorrichtungsfunktionalität für mehrere Spannaufgaben ist. Diejenigen Merkmale, deren geometrische Anforderungen nur mit großem Aufwand in einer Vorrichtung realisiert werden können, müssen daher mit größerem Gewicht in die Berechnung der Ähnlichkeit eingehen als Merkmale, deren Anforderungen leichter zu erfüllen sind.

Zur Festlegung von Merkmalsgewichten empfiehlt GRANOW (1984, S. 65) die Aufstellung einer Hierarchie, die auf der untersten Stufe die in die Clusteranalyse eingehenden Merkmale enthält und anhand der höheren Hierarchiestufen eine anschauliche Bestimmung der Stufengewichte ermöglicht. Abbildung 47 stellt eine solche Merkmalshierarchie am Beispiel des Spannmodells für die Bearbeitung prismatischer Werkstücke dar.

Die Verteilung der Stufengewichte kann auf vier Hierarchieebenen optimiert werden:

1. Gewichtung des Einflusses von Bestimm- und Spannflächen allgemein,
2. Gewichtung des Einflusses konkreter Bestimm- und Spannflächen,
3. Gewichtung der flächenbeschreibenden Vektoren,
4. Gewichtung der einzelnen Vektorkomponenten.

Bei der Festlegung der Stufengewichte ist jeweils die Frage zu beantworten, welche der auf einer Stufe repräsentierten Anforderungen an die Bestimm- und Spannfunktionsträger mit größerem bzw. kleinerem Aufwand in einer Vorrichtung realisiert werden können.

Die Anordnung der Bestimmelemente, die die Prozesskräfte aufnehmen und die präzise und wiederholgenaue Positionierung des Werkstücks sicherstellen, ist beispielsweise kritischer für die Fertigungsqualität als die Lage der Spannelemente. Dies kann in der Clusteranalyse durch eine höhere Gewichtung der Bestimmflächen gegenüber den Spannflächen berücksichtigt werden. Weiterhin können die Bestimm- bzw. Spannelemente ihrerseits unterschiedlich gewichtet werden. Oftmals reicht eine einfache Auflageebene anstelle von drei separaten Bestimmelementen aus, um das Werkstück an der ersten Bestimmebene auszurichten. Die Anordnung der horizontal wirkenden Bestimmelemente ist dann wesentlich entscheidender für die Ähnlichkeit zweier Spannaufgaben und sollte durch eine höhere Gewichtung der entsprechenden Bestimmflächen in der Clusteranalyse berücksichtigt werden.

Auf der Stufe der vektorbasierten Flächenbeschreibung kann es sinnvoll sein, für Bestimm- und Spannflächen eine unterschiedliche Vektorgewichtung vorzunehmen. Passive Bestimmelemente können leicht variierende Flächenorientierungen einfacher kompensieren als unterschiedliche Positionen im Raum. Die Anordnung von Spannelementen hängt dagegen von der geforderten Krafrichtung ab, während Flächenverschiebungen durch verfahrbare Spannelemente flexibel ausgeglichen werden können. In so einem Fall empfiehlt es sich, bei der Beschreibung einer Spannfläche den Normalenvektor stärker als den Positionsvektor zu gewichten. Die Flächengröße, die den Freiraum zur Wahl des Bestimmungspunktes auf der Bestimmfläche repräsentiert, soll erst nachrangig zur Differenzierung von Spannplänen beitragen. Sie geht daher im Vergleich zur Position und Ausrichtung einer Fläche mit einem sehr kleinen Anteil in die Flächenbeschreibung ein.

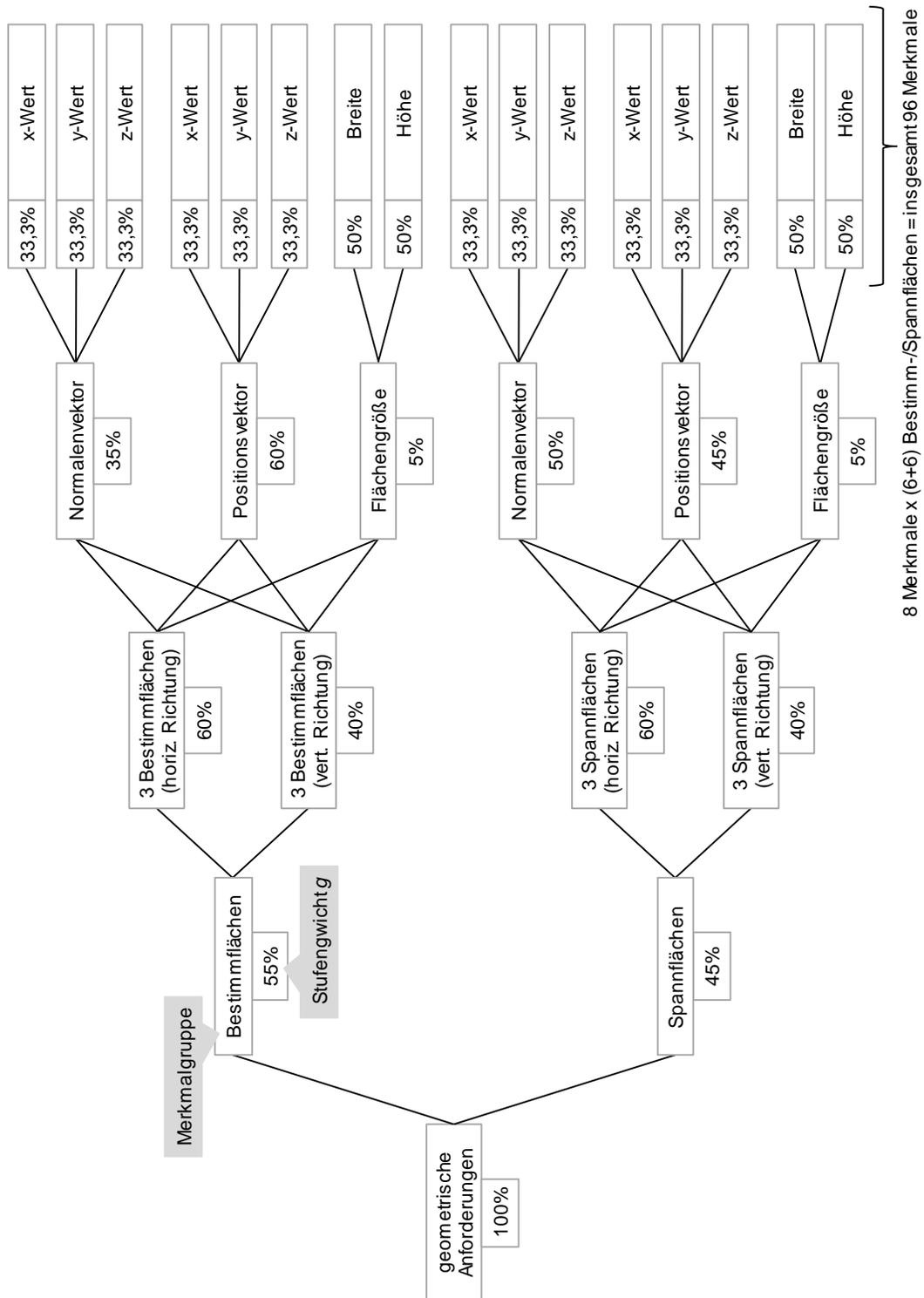


Abbildung 47: Darstellung und Festlegung der Merkmalsgewichtung mittels Merkmalsbaum am Beispiel des Spannmodells für die Bearbeitung prismatischer Werkstücke

Diese Beispiele zeigen, dass eine problemangepasste Merkmalsgewichtung nur unter Berücksichtigung der betrieblichen Konstruktionsstandards durchgeführt werden kann. Weiterhin muss die Merkmalsgewichtung an das jeweilige Spektrum an Spannaufgaben angepasst werden. Zwar können theoretische Vorüberlegungen zu einer grundlegenden Gewichtung führen, es empfiehlt sich aber, die Merkmalsgewichtung anhand konkreter Clusterergebnisse zu optimieren. Das zugrunde liegende Bewertungskriterium ist dabei, ob zwei in einer integrierten Vorrichtung erfüllbare Spannaufgaben eine im Vergleich mit anderen Spannaufgaben ausreichend geringe Distanz zueinander aufweisen. Liegen sie vergleichsweise weit auseinander, so ist die Merkmalsgewichtung entsprechend anzupassen.

Die Merkmalsgewichtung wird durch Multiplikation des merkmalspezifischen Gewichtungsfaktors  $g_j$  mit den entsprechenden Merkmalsausprägungen  $x_j$  in die Clusteranalyse integriert:

$$x_{j,g} = \left( \prod_{h=1}^H \frac{g_{j,h}}{N_h} \right) \cdot x_j = g_j \cdot x_j \quad (5-1)$$

$x_{j,g}$  : gewichteter Wert des Merkmals  $j$

$g_{j,h}$  : Stufengewicht des Merkmals  $j$  bei Hierarchiestufe  $h$  ( $h=1, 2, \dots, H$ )

$N_h$  : Anzahl gleicher Objekte einer Merkmalsgruppe des Merkmalsbaums

Der Gewichtungsfaktor  $g_j$  wird durch Multiplikation der einzelnen Stufengewichte berechnet, die ggf. mit der Anzahl der Einzelobjekte ihrer Merkmalsgruppe normiert werden. So ergibt sich beispielsweise der Gewichtungsfaktor  $g_{Bfh_{Nvx}}$  für den x-Wert des Normalenvektors eines horizontal wirkenden Bestimmelements mit den in Abbildung 47 aufgeführten Stufengewichten zu:

$$g_{Bfh_{Nvx}} = 0,55 \cdot \frac{0,60}{3} \cdot 0,35 \cdot 0,333 = 0,0128 \quad (5-2)$$

Um das Ergebnis der Distanzberechnung für den Nutzer anschaulicher zu gestalten, können die Gewichtungsfaktoren  $g_j$ , deren Summe nach obiger Formel Eins ergibt, jeweils mit der Gesamtzahl der Merkmale multipliziert werden. Auf diese Weise weist die gewichtete Distanz zweier Spannaufgaben die gleiche Größenordnung auf wie deren ungewichtete Distanz.

Allgemein ist bei der Gewichtung von Merkmalen darauf zu achten, ob bestimmte Merkmale miteinander korrelieren und daher bei der Fusionierung der Objekte eine stärkere Gewichtung erhalten als gewünscht. Falls eine Korrelation zwischen zwei Merkmalen besteht, ist der Ausschluss eines der Merkmale eine einfache Möglichkeit, unerwünschte Gewichtungen zu vermeiden (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 550).

Der Ausschluss von Ausreißerobjekten hingegen, eine in der Praxis verbreitete Maßnahme zur Sicherstellung der Gruppierungsqualität (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 549), führt bei der vorliegenden Clusteranalyse zu keiner Verbesserung, da die Merkmalsausprägungen nicht normiert werden. Ausreißerobjekte weisen im Vergleich zu den restlichen Gruppierungsobjekten stark unterschiedliche Merkmalsausprägungen auf und wirken daher negativ auf die Clusterbildung, wenn die Merkmalsausprägungen zuvor auf Basis ihrer Wertebereiche oder Standardabweichungen normiert wurden.

### 5.5.3 Distanzberechnung

Für die Klassifizierung von Objekten anhand metrisch skalierten Merkmale werden i. d. R. Distanz- statt Ähnlichkeitsmaße verwendet (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 502). Zwei Objekte sind sich demnach umso ähnlicher, je geringer ihre Distanz ist. Als Distanzmaß sind die *Minkowski-Metriken* bzw. *L-Normen* in der Praxis weit verbreitet. Sie berechnen die Distanz zweier Objekte wie folgt:

$$d_{k,l} = \left[ \sum_{j=1}^J g_j \cdot |x_{kj} - x_{lj}|^r \right]^{1/r} \quad (5-3)$$

$d_{k,l}$  : Distanz der Objekte  $k$  und  $l$

$g_j$  : Merkmalsgewicht

$x_{kj}, x_{lj}$  : Wert des Merkmals  $j$  bei Objekt  $k$  und  $l$  ( $j=1, 2, \dots, J$ )

$r \geq 1$  : Minkowski-Konstante

Die Wahl der Minkowski-Konstante  $r$  bestimmt das konkrete Distanzmaß. Für  $r = 2$  ergibt sich die Euklidische Distanz ( $L_2$ -Norm) und für  $r = 1$  die City-Block-Metrik ( $L_1$ -Norm). Die Unterschiede beider Funktionen liegen in der Berücksichtigung der einzelnen Merkmalsdifferenzen. Die Euklidische Distanz, die den kürzesten Abstand zwischen zwei Objekten im Merkmalsraum repräsentiert, gewichtet große Merkmalsdifferenzen aufgrund der Quadrierung stärker als kleine Differenzen. Bei der City-Block-Metrik hingegen, die den kürzesten Weg zwischen zwei Objekten entlang der Richtungen der Koordinatenachsen darstellt, gehen alle Differenzen gleichgewichtet in die Berechnung ein. Für eine Verwendung der City-Block-Metrik zur Differenzierung von Spannaufgaben spricht daher, dass sie die manuell festgelegten Merkmalsgewichtungen getreu abbildet und nicht zugunsten großer Einzeldistanzen verzerrt.

### 5.5.4 Clusterbildung

Die mittels Distanzmaß aus den Attributwerten der Spannpläne berechnete Distanzmatrix stellt die Grundlage für die hierarchisch-agglomerative Clusterbildung dar. Ausgehend von der feinsten Partition, bei der jede Spannaufgabe einen eigenen Cluster bildet, werden die beiden ähnlichsten Spannaufgaben zu einem neuen Cluster vereint. Ein *Fusionierungsalgorithmus* berechnet anschließend die Distanzen des neuen Clusters zu den übrigen Spannaufgaben und erzeugt eine neue, reduzierte Distanzmatrix. Die Fusionierungsalgorithmen basieren auf folgender Transformationsformel, die die Distanz  $D(R, P+Q)$  zwischen einem neuen Cluster  $(P+Q)$ , bestehend aus den Objekten  $P$  und  $Q$ , und einem Objekt  $R$  ermittelt:

$$D(R, P + Q) = A \cdot D(R, P) + B \cdot D(R, Q) + E \cdot D(P, Q) + G \cdot |D(R, P) - D(R, Q)| \quad (5-4)$$

$D(R, P)$  : Distanz zwischen den Clustern  $R$  und  $P$

Je nach Wahl der Konstanten  $A$ ,  $B$ ,  $E$  und  $G$ , die im Anhang (Abschnitt 9.4, S. 179) erläutert werden, ergeben sich die in Tabelle 8 mit ihren spezifischen Fusionierungseigenschaften dargestellten Clusterverfahren. Die Fusionierungseigenschaften von Clusterverfahren werden allgemein als dilatierend, kontrahierend oder konservativ beschrieben (BACKHAUS ET AL. 2006, S. 527). *Kontrahierende Clusterverfahren* neigen dazu, wenige große und viele kleine Gruppen zu bilden. Der kontrahierende Single-Linkage-Algorithmus tendiert außerdem zur Aneinanderreihung einzelner Objekte. *Dilatierende Verfahren* fassen Objekte oftmals in gleich große Gruppen zusammen. Algorithmen, die weder Tendenzen zur Kontraktion noch zur Dilatation aufweisen, werden als *konservativ* bezeichnet. Unter den konservativen Verfahren zeichnet sich der Ward-Algorithmus laut BERGS (1981, S. 96) durch eine sehr gute Gruppierungsgüte aus, wenn die Objektstruktur aus etwa gleich großen Gruppen besteht. Bei einer Objektstruktur mit heterogenen Gruppengrößen empfiehlt EVERITT (1995, S. 72) die Anwendung des Centroid-Verfahrens.

Für die Einsatzbewertung der vorgestellten Clusterverfahren ist die lokale Gruppierungsgüte bis zu einer Grenzdistanz entscheidend, ab der die geometrischen Unterschiede so groß sind, dass eine integrierte Vorrichtung aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nicht mehr realisiert werden kann. Die Gruppenstruktur über diesem Fusionierungsniveau ist für die Ermittlung ähnlicher Spanngeometrien nicht von Bedeutung. Die entscheidende lokale Gruppierungsgüte hängt da-

von ab, ob alle ähnlichen Spannaufgaben in der relevanten Gruppe vertreten sind und wie die Ähnlichkeitsstruktur bis zur Grenzdistanz dargestellt wird.

Fusionierungsalgorithmus	Fusionierungseigenschaft	Bemerkungen
Single Linkage	kontrahierend	neigt zur Bildung weniger großer und vieler kleiner Gruppen sowie zur Kettenbildung;
Complete Linkage	dilatierend	neigt zur Bildung kleiner Gruppen mit hoher Homogenität;
Average Linkage	konservativ	Kombination der Single- und Complete-Linkage-Algorithmen;
Centroid	konservativ	geeignet bei unterschiedlichen Gruppengrößen;
Median	konservativ	—
Ward	konservativ	bildet etwa gleich große Gruppen;

*Tabelle 8: Eigenschaften agglomerativer Clusterverfahren, nach BACKHAUS ET AL. (2006) und EVERITT (1995)*

Nach diesen Bewertungskriterien haben sich das Single-Linkage-, das Centroid- und das Median-Verfahren als ungeeignet für die Clusteranalyse von Spanngeometrien erwiesen. Der Single-Linkage-Algorithmus bildet aufgrund seiner Tendenz zur Kettenbildung die Hierarchie der Spanngeometrien nur ungenügend ab. Das Centroid- und das Median-Verfahren berechnen zwar ähnliche Gruppenstrukturen wie das Ward-, das Complete-Linkage- und das Average-Linkage-Verfahren, sie erzeugen aber oftmals nicht-monotone Hierarchien, die einerseits schwer lesbar und andererseits als Hinweis zu deuten sind, dass diese Verfahren für das vorliegende Gruppierungsproblem nicht geeignet sind.

Folgende Kombinationen aus Distanzmaß und Fusionierungsalgorithmus haben sich dagegen als geeignet für die Clusteranalyse von Spanngeometrien herausgestellt:

- der Ward-Algorithmus in Kombination mit der Euklidischen Distanz,
- der Complete-Linkage-Algorithmus in Kombination mit der Euklidischen Distanz oder der City-Block-Metrik und
- der Average-Linkage-Algorithmus in Kombination mit der Euklidischen Distanz oder der City-Block-Metrik.

Das Ward-Verfahren kann nur auf Euklidische Distanzen angewendet werden, während das Complete-Linkage- und das Average-Linkage-Verfahren beide Distanzmaße verarbeiten können. Die Distanzmaße haben keinen Einfluss auf die Gruppierungsgüte. Für eine einheitliche Verwendung der Euklidischen Distanz

spricht die daraus resultierende bessere Vergleichbarkeit der drei Clusterverfahren. Für die City-Block-Metrik spricht dagegen, dass sie die gewichteten Einzel-  
distanzen ohne Verzerrung summarisch in der Gesamtdistanz berücksichtigt.

Ebenso wie für das Distanzmaß kann auch für das anzuwendende Clusterverfahren keine eindeutige Empfehlung ausgesprochen werden. Die drei geeigneten  
Verfahren erreichen bis zur Grenzdistanz bei einem mittleren Fusionierungsniveau eine hohe Gruppierungsgüte. Ihre Ergebnisse weisen in diesem Bereich  
nur geringe Unterschiede auf, was anhand der Clusterergebnisse in Abbildung 48 beispielhaft aufgezeigt wird.

Die Unterschiede bestehen in der Reihenfolge, mit der Objekte bzw. Cluster auf  
mittlerem Distanzniveau fusioniert werden (Spannaufgaben „31“ und „33“ in  
Abbildung 48), und in der Zuordnung von Objekten, die Ähnlichkeiten mit zwei  
verschiedenen Clustern aufweisen (Spannaufgabe „19“).

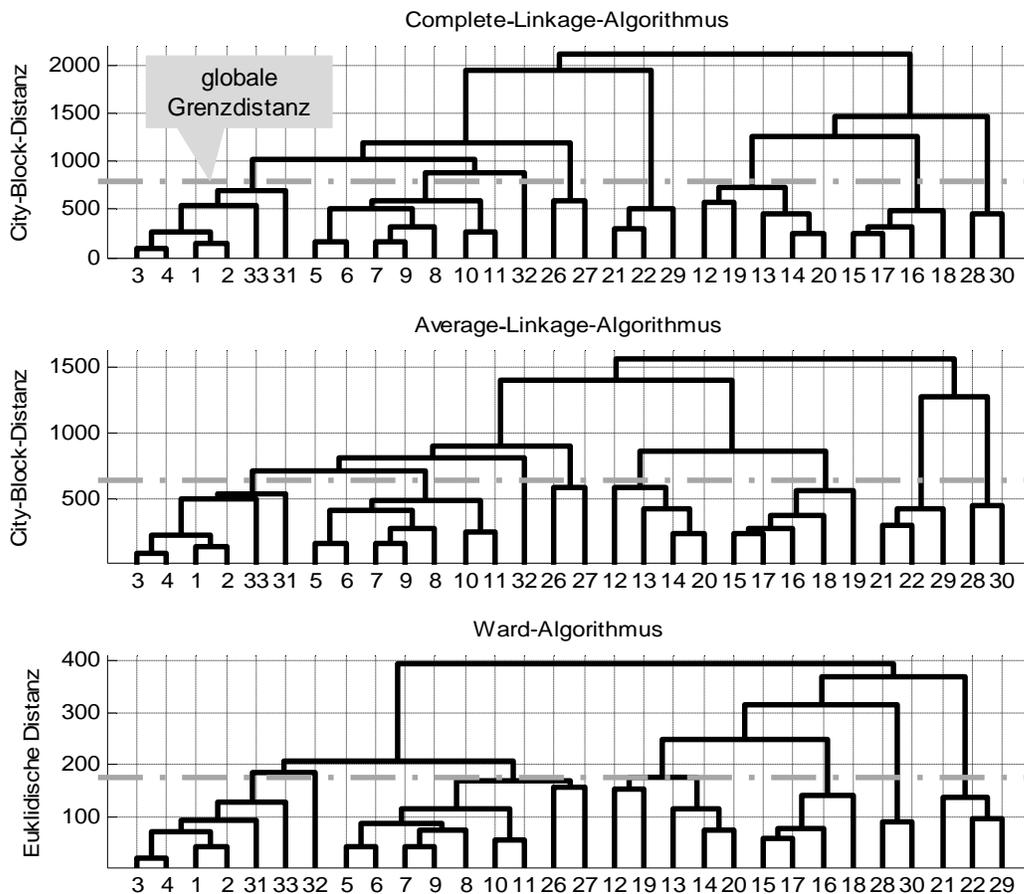


Abbildung 48: Ergebnisse der für die Gruppierung von Spanngeometrien geeigneten Clusterverfahren. Unterhalb der jeweiligen Grenzdistanz bestehen nur geringe Unterschiede in der Gruppenstruktur.

Die Gruppierungsergebnisse zeigen, dass die globale Struktur oberhalb der Grenzdistanz von den Clusterverfahren sehr unterschiedlich berechnet wird. Dies ist dann der Fall, wenn eine heterogene Gruppenstruktur vorliegt und sich ab einem höheren Distanzniveau die zahlreichen Merkmalsunterschiede vielfältig ausgleichen. Bei homogenen, klar definierten Gruppen wird nicht nur die lokale, sondern auch die globale Struktur von den Clusterverfahren einheitlich dargestellt.

Aufgrund der aufgezeigten Unterschiede im Gruppierungsergebnis empfiehlt es sich, jeweils alle drei Clusterverfahren bei der Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben anzuwenden. So wird ein differenziertes Bild von der Ähnlichkeitsstruktur der Spanngeometrien gewonnen, mit dem auch mehrfache Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Objekten bzw. Clustern erkannt und Unzulänglichkeiten einzelner Verfahren ausgeglichen werden können.

### 5.5.5 Analyse und Aufbereitung des Gruppierungsergebnisses

Die durch die Clusteranalyse ermittelte Gruppenstruktur zurückliegender Spannpläne dient dem Vorrichtungsplaner als Grundlage für die Auswahl der prognoserelevanten Spannaufgaben. Hierzu zählen alle Spannaufgaben, die aus technischer Sicht von der gleichen, integriert aufgebauten Vorrichtung erfüllt werden können wie die aktuelle Spannaufgabe. Als Auswahlkriterien werden zunächst die Spanngeometrie und anschließend die im Informationsmodell abgebildeten fertigungstechnischen Anforderungen einer Spannaufgabe herangezogen.

Das Ergebnis der Clusteranalyse erlaubt dem Vorrichtungsplaner eine einfache *Eingrenzung der prognoserelevanten Spannaufgaben* anhand der *Spanngeometrie* (Abbildung 49). Durch punktuelle Prüfung der Verträglichkeit der geometrischen Anforderungen entlang der Ähnlichkeitsstruktur ermittelt er die planungsspezifische Grenzdistanz, bis zu der die Spanngeometrien in einer Vorrichtung vereinbar sind. Da sämtliche geometrische Anforderungen im Rahmen der Datenbeschaffung in einem CAD-Modell abgebildet wurden, kann die Prüfung durch Gegenüberstellung beider Modelle im CAD-System mit geringem Aufwand durchgeführt werden.

Für die *fertigungstechnische Eingrenzung* der prognoserelevanten Spannaufgaben werden die im Informationsmodell enthaltenen Attribute des Bearbeitungskomplexes verwendet (vgl. Abbildung 45, S. 100). Die standardisierten Merkmale ermöglichen eine rechnerunterstützte und somit effiziente Analyse der Spannaufgaben, indem die Datensätze im Datenverwaltungssystem anhand bestimmter Merkmalsausprägungen gefiltert werden. Es ist die Aufgabe des Vorrichtungs-

planers, die gültigen Wertebereiche der betreffenden Merkmale unter Berücksichtigung der aktuellen Spannaufgabe so festzulegen, dass die Anforderungen in einer Vorrichtung umgesetzt werden können. Beispielsweise kann die Bandbreite der Spannpräzision so festgelegt werden, dass Spannaufgaben mit höheren Präzisionsanforderungen aussortiert und in der weiteren Planung nicht mehr berücksichtigt werden. Genauso können Spannaufgaben mit Fertigungsprozessen, deren Anforderungen nicht mit denen der aktuellen Spannaufgabe vereinbar sind, herausgefiltert werden.

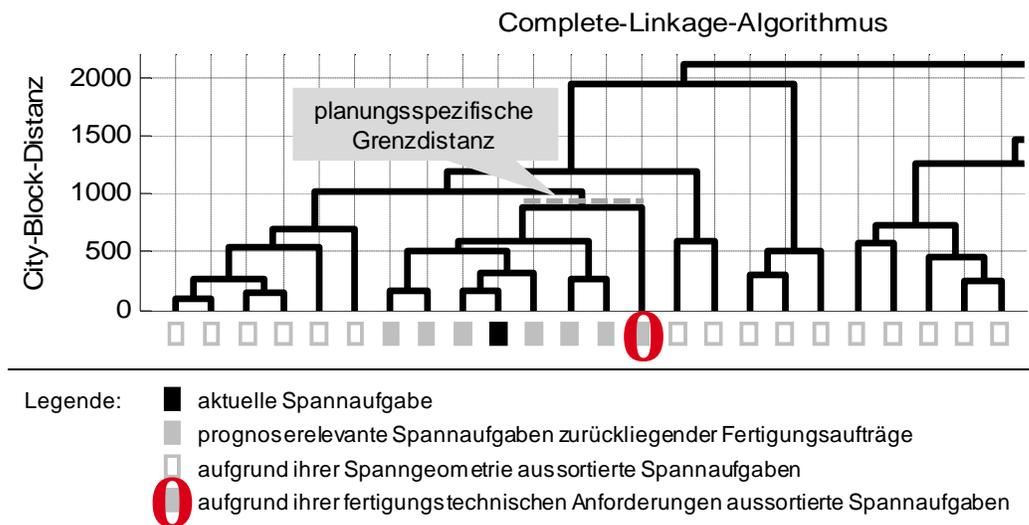


Abbildung 49: Bestimmung prognoserelevanter Spannaufgaben auf Basis der clusteranalytisch ermittelten Struktur zurückliegender Spannpläne

## 5.6 Ermittlung planungsrelevanter Spannaufgaben

### 5.6.1 Überblick

In Kenntnis der prognoserelevanten Spannaufgaben aus der Vergangenheit werden zukünftige Spannaufgaben identifiziert, die als Umweltentwicklung in der aktuellen Vorrichtungsplanung berücksichtigt werden. Das Vorgehen gliedert sich in eine Auftragsprognose und die anschließende Ableitung und Strukturierung der planungsrelevanten Spannaufgaben, wodurch die bei der Vorrichtungsplanung zu berücksichtigende Umweltentwicklung aufbereitet wird.

Die Auftragsprognose besteht grundsätzlich aus einer *expertengestützten Prognose* von Einzelaufträgen, mit der zunächst alle bekannten oder mit hoher Wahrscheinlichkeit erwarteten Fertigungsaufträge identifiziert werden. Sie wird durch

eine kombinierte naive, statistik- und expertengestützte *Prognose einer Auftragsgruppe* ergänzt, mit der ein umfassenderes, aber weniger detailliertes Abbild zukünftiger Spannaufgaben gewonnen werden kann.

### 5.6.2 Expertengestützte Prognose einzelner Aufträge

Die expertengestützte Prognose von Einzelaufträgen besteht aus einer *direkten Befragung des Vertriebs* und verfolgt das Ziel, eine möglichst sichere und detaillierte Informationsbasis für die Vorrichtungsplanung zu erzeugen. Fertigungsaufträge mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit können aus

- dem aktuellen und prognostizierten Auftragsbestand und aus
- dem Ergebnis der vorhergehenden Clusteranalyse

identifiziert bzw. abgeleitet werden. Aus dem *Auftragsbestand* lassen sich neue Einzelaufträge und laufende Abrufaufträge ermitteln, die ähnliche Spannaufgaben aufweisen wie der aktuelle Fertigungsauftrag. Das Ergebnis der *Clusteranalyse* gibt dem Vertrieb eine Übersicht über alle ähnlichen Spannaufgaben der Vergangenheit und bietet sich daher für eine Prognose von Wiederholaufträgen an. Die Aufgabe des Vertriebs liegt dabei zunächst in der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer erneuten Beauftragung und, falls diese als hoch angesehen wird, in einer Abschätzung der Stückzahl.

Bei volatiler Auftragslage kann mit dieser Vorgehensweise nur ein geringer Teil der tatsächlichen planungsrelevanten Fertigungsaufträge ermittelt werden. Unter Umständen reduziert sich die Prognose auf eine reine Datenerhebung, die sicherstellt, dass intern vorhandenes Wissen über den aktuellen Auftragsbestand übermittelt und in der Vorrichtungsplanung berücksichtigt wird.

### 5.6.3 Prognose einer Auftragsgruppe

Die Prognose einer Auftragsgruppe hat zum Ziel, ein im Vergleich zur Einzelprognose umfassenderes Bild zukünftiger Fertigungsaufträge zu erstellen, so dass dem Vorrichtungsplaner insgesamt eine breite und differenzierte Informationsbasis für die Vorrichtungsplanung zur Verfügung steht.

Das Prognoseverfahren besteht aus einer Kombination aus *naiver, statistischer und expertengestützter Prognose* und basiert grundsätzlich auf der Annahme, dass sich die Spannaufgaben des Auftragspektrums im Laufe der Zeit mit einer für die Vorrichtungsplanung ausreichenden Ähnlichkeit wiederholen. Dementsprechend werden die mittels Clusteranalyse identifizierten Spannaufgaben eines

zurückliegenden Zeitraums ohne Änderung als naive Prognose in die Zukunft übertragen und mit aktualisierten Auftragsdaten ergänzt, die entweder statistisch ermittelt oder durch die Experten des Vertriebs abgeschätzt werden.

Angesichts der von kurzfristiger Volatilität gekennzeichneten Auftragsituation in der Lohnfertigung kann ein solches Prognosevorgehen nur unter zwei notwendigen Bedingungen durchgeführt werden:

1. In der Vergangenheit wurden ausreichend viele ähnliche Fertigungsaufträge bearbeitet.
2. Die Zeitstabilitätshypothese ist für diese Fertigungsaufträge in vergangenen Zeiträumen gültig.

Zu Beginn der Gruppenprognose ist daher durch den Vorrichtungsplaner zu entscheiden, ob die Anzahl der durch die Gruppenanalyse ermittelten Spannaufgaben für eine Gruppenprognose ausreicht. Je größer die Zahl an Spannaufgaben ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Spannaufgaben mit ähnlichen Anforderungen an den Vorrichtungseinsatz zukünftig wieder auftreten.

Da die geometrischen und fertigungstechnischen Anforderungen ohne Änderung als kumulierte Gruppenanforderungen naiv aus der Vergangenheit in die Zukunft übertragen werden, beschränkt sich der Prognoseaufwand auf die Bestimmung der zukünftigen kumulierten Stückzahlen der betrachteten Auftragsgruppe, anhand derer die Wirtschaftlichkeit einer geplanten Vorrichtung bewertet wird (vgl. Abschnitt 5.7.2.4). Die Prognose der Stückzahlen basiert auf einer Trenduntersuchung der Stückzahlen und der Anzahl der Fertigungsaufträge. Die entsprechenden Informationen sind in den Datensätzen der Fertigungsaufträge hinterlegt (vgl. Abbildung 40, S. 94) und ermöglichen so eine Übersicht über die Entwicklung der Stückzahlen und Fertigungsaufträge in zurückliegenden Zeiträumen.

Die Trenduntersuchung ist zugleich eine Ex-post-Überprüfung der Zeitstabilitätshypothese. Ist kein Trend oder ist eine Steigerung der Stückzahlen erkennbar, so gilt dies als Untermauerung der Annahme, dass diese Auftragsgruppe in die Zukunft projiziert werden kann. Insbesondere eine steigende Zahl an Fertigungsaufträgen erhöht die Zukunftsrelevanz der Auftragsgruppe. Ist jedoch ein stark abfallender Trend der Stückzahlen und/oder der Fertigungsaufträge zu verzeichnen, dann ist die Zeitstabilitätshypothese in Frage gestellt und auf eine Vorrichtungsplanung auf Basis der Gruppenprognose sollte evtl. verzichtet werden.

Die Ermittlung der Stückzahlen ist abhängig vom Prognosehorizont, d. h. vom rechnerischen Amortisationszeitraum der geplanten Vorrichtung. Eine kurzfristige Entwicklung der Stückzahlen kann – bei einer ausreichenden Datenbasis aus Vergangenheitswerten – durch die gängigen Verfahren, wie das arithmetische

Mittel, der gleitender Durchschnitt, die exponentielle Glättung oder die Methode der kleinsten Quadrate, prognostiziert werden (BERNDT 1996, S. 250 ff.). Diese Methoden berechnen auf Basis der tatsächlichen Stückzahlen vorausgehender Perioden einen Prognosewert für die folgende Periode.

Da die Stückzahlentwicklung der Vergangenheit nur kurzfristig in die Zukunft projiziert werden kann, sind für eine längerfristige Prognose das Wissen und die Erfahrung des Vorrichtungseinsatzplaners und des Vertriebs einzubeziehen, um eine kumulierte Stückzahl für die Auftragsgruppe zu ermitteln, die neben den zurückliegenden Stückzahlen auch Indikatoren, wie den mittel- bis langfristigen Geschäftsausblick, berücksichtigt.

Im Gegensatz zur Einzelprognose, die Fertigungsaufträge mit konkreten Anforderungen an den Vorrichtungseinsatz enthält, besteht die Gruppenprognose aus einer Anzahl vergangener Spannaufgaben und einer für diese Gruppe prognostizierten kumulierten Stückzahl, aus der unscharfe Anforderungen an eine wieder verwendbare Gruppenvorrichtung abgeleitet werden können.

### 5.6.4 Prognosegüte

Die beiden aufgezeigten Vorgehensweisen zur Ermittlung zukünftiger Fertigungsaufträge sind nicht ausreichend, um die gesamte Umweltentwicklung für die Vorrichtungsplanung zu bestimmen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Inhalte und Ergebnisse einer Prognose per se auf die vorhersehbare, erkennbare Entwicklung beschränkt sind und das Nichtvorhersehbare und Zufällige nicht erfassen können (MATTMÜLLER 1992, S. 48). Weiterhin ist der erfassbare Prognosehorizont i. d. R. kürzer als die Betriebsdauer der geplanten Vorrichtung, was bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse einer Vorrichtung berücksichtigt werden muss (siehe Abschnitt 5.7.3, S. 130).

Das expertengestützte Prognosevorgehen gewährleistet mindestens, dass alle verfügbaren internen Informationen des Vertriebs, d. h. Auftragsbestand und -prognose, in die Informationsbasis der Vorrichtungsplanung einfließen. Wenn sich das zurückliegende Auftragsportfolio für eine Gruppenprognose eignet, dann erhält die Vorrichtungsplanung zusätzlich ein umfassenderes, wenn auch unschärferes Bild über das zukünftige Auftragsportfolio. Tabelle 9 gibt einen Überblick auf die sich ergänzenden Fähigkeiten der beiden Vorgehensweisen zur Prognose von Fertigungsaufträgen.

	sichere Aufträge	Aufträge in Verhandlung	Wiederhol-aufträge	neue Aufträge bekannter Abnehmer	Aufträge unbekannter Abnehmer	nicht vorher-sehbare Aufträge
Einzel-prognose	sichere Prognose	hohe Prognose-güte	Prognosegüte abhängig vom Markt-wissen des Vertriebs		gering	—
Gruppen-prognose	—	—	Prognosegüte abhängig von der Volatilität und der Größe des Auftragsportfolios			—

*Tabelle 9: Fähigkeiten der beiden Prognoseverfahren zur Ermittlung zukünftiger Fertigungsaufträge*

### 5.6.5 Aufbereitung der Umweltentwicklung

Die Ergebnisse der Einzel- und Gruppenprognose gehen als Umweltentwicklung in die Informationsbasis der auftragsbezogenen Vorrichtungsplanung ein (Abbildung 50). Neben den Auftragsdaten und den technischen Anforderungen der prognostizierten Spannaufgaben enthält die Umweltentwicklung eine Ähnlichkeitsstruktur der Spannpläne, damit das Synergiepotential wiederverwendbarer Vorrichtungen systematisch analysiert werden kann. Im Fall der Gruppenprognose spiegelt das Ergebnis der Clusteranalyse weiterhin die innere Ähnlichkeitsstruktur der Spannaufgabengruppe wider (vgl. Abbildung 49, S. 114), da die Spannpläne durch die Prognose ohne Änderung aus der Vergangenheit in die Zukunft projiziert wurden.

Für die Fertigungsaufträge der Einzelprognose ist das Dendrogramm der Clusteranalyse dann aussagekräftig, wenn die Einzelprognose zu einem großen Teil aus Wiederholaufträgen besteht. Deren Spannpläne sind bereits in der Ähnlichkeitsstruktur enthalten und können manuell durch die Spannpläne der Neuaufträge ergänzt werden. Falls die Einzelprognose überwiegend aus Neuaufträgen besteht, sind deren Datensätze zu instanzieren, damit die Ähnlichkeitsstruktur mittels Clusteranalyse ermittelt werden kann. Da es sich dabei um zukünftige Planungssituationen handelt, deren Eintrittswahrscheinlichkeit als sicher bzw. hoch angesehen wird, stellt diese Instanziierung i. d. R. keinen Zusatzaufwand dar, sondern ein Vorziehen der Vorrichtungsplanung, um Synergiepotentiale mit der aktuellen Spannaufgabe zu ermitteln.

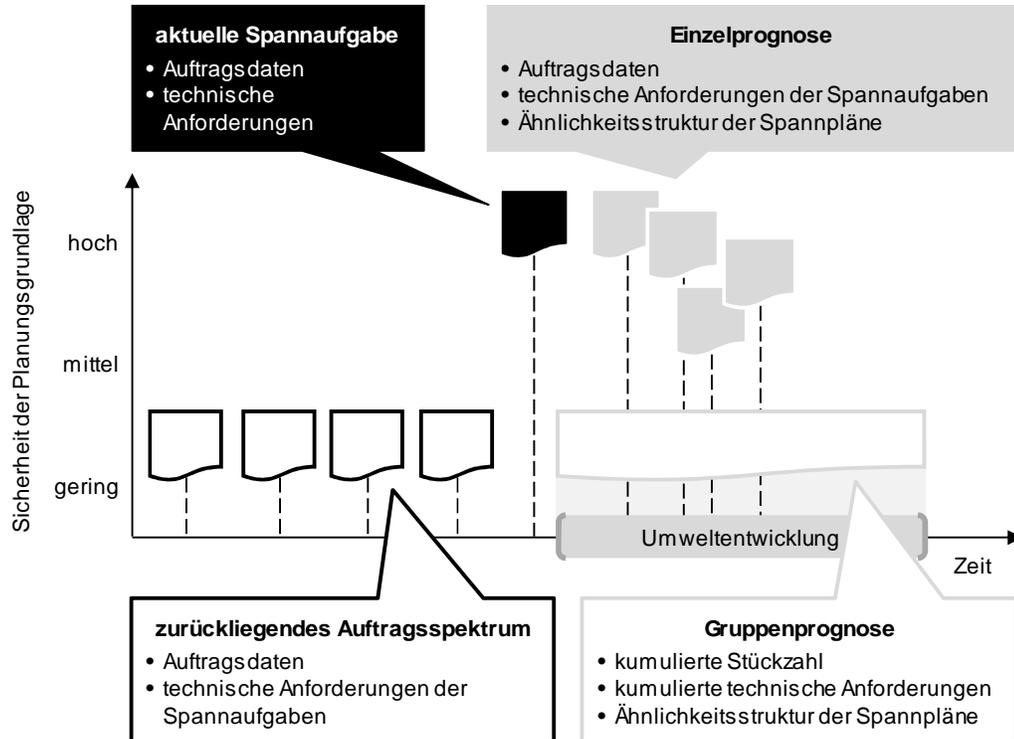


Abbildung 50: Informationsbasis und Umweltentwicklung der auftragsbezogenen Vorrichtungsplanung

## 5.7 Vorrichtungsplanung

### 5.7.1 Überblick

Mit der Kenntnis der Umweltentwicklung, d. h. der prognostizierten Spannaufgaben mit Einfluss auf die aktuelle Vorrichtungsplanung, kann die Vorrichtungsart für die aktuelle Spannaufgabe ganzheitlich bestimmt werden. Das Planungsvorgehen gliedert sich in die Ermittlung sinnvoller *Entscheidungsalternativen* und die abschließende Bewertung und Auswahl einer *Vorrichtungsart*.

### 5.7.2 Bestimmung der Entscheidungsalternativen

#### 5.7.2.1 Vorgehen

Die Vorrichtungsart der für die aktuelle Spannaufgabe gesuchten Vorrichtung wird nach dem Prinzip der starren, rollierenden Planung ermittelt. Die dabei betrachteten Entscheidungsalternativen sind Entscheidungssequenzen, bestehend

aus der Vorrichtungsart für die aktuelle Spannaufgabe und den davon beeinflussten Vorrichtungsarten der prognostizierten Spannaufgaben. Prinzipiell stehen als Alternativen für eine Spannaufgabe alle vorhandenen Vorrichtungen und alle denkbaren neuen Vorrichtungen mit einer bestimmten Funktionalität zur Auswahl. Die daraus resultierende theoretische Zahl an Entscheidungsalternativen ist nicht effizient handhabbar. Deshalb ist es das Ziel des hier beschriebenen Vorgehens, mit wenig Aufwand aus der hohen Zahl an Alternativen diejenigen Entscheidungssequenzen zu identifizieren, die wahrscheinlich den wirtschaftlichsten Vorrichtungsinsatz darstellen. Diese überschaubare Anzahl an Alternativen kann anschließend durch eine Zielfunktion untereinander verglichen werden, so dass dem Vorrichtungsplaner eine detaillierte Entscheidungsbasis zur Verfügung steht.

Die Bestimmung der Planungsalternativen folgt grundsätzlich dem Ansatz, zunächst die vielversprechendsten Alternativen aus vorhandenen Vorrichtungen zu bestimmen, um mit diesem Kenntnisstand gezielt das wirtschaftliche Potential neuer Vorrichtungen, d. h. weitere Entscheidungsalternativen, zu identifizieren. Zur Bewertung des Einsatzpotentials neuer Vorrichtungen stehen verschiedene Planungsgrundlagen zur Verfügung (vgl. Abbildung 50, S. 119), von denen jeweils unterschiedliche Entscheidungsalternativen ableitbar sind. Tabelle 10 zeigt auf, welche Vorrichtungsarten aus den Spannaufgaben der Einzel- und Gruppenprognose und des zurückliegenden Auftragspektrums abgeleitet werden können.

Planungsgrundlage	planbare Vorrichtungsarten
aktuelle Spannaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vorhandene Vorrichtung:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Standardvorrichtung</li> <li>- flexible Vorrichtung</li> <li>- Baukastenvorrichtung</li> <li>- Spezialvorrichtung</li> </ul> </li> <li>• neue Spezialvorrichtung</li> </ul>
Spannaufgaben aus Einzelprognose mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und scharfen Ausprägungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neue flexible Vorrichtung mit fokussiertem Anwendungsbereich</li> </ul>
Spannaufgaben aus Gruppenprognose mit mittlerer Eintrittswahrscheinlichkeit und unscharfen Ausprägungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neue flexible Vorrichtung mit breitem Anwendungsbereich</li> </ul>
Spannaufgaben aus dem Gesamtspektrum an Fertigungsaufträgen der Vergangenheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neues Baukastensystem</li> </ul>

*Tabelle 10: Übersicht über die verschiedenen Planungsgrundlagen und die jeweils ableitbaren Vorrichtungsarten*

Als Alternativen für eine Neubeschaffung werden nur Spezial- und flexible Vorrichtungen sowie Baukastensysteme betrachtet. Die Anschaffung neuer Standardvorrichtungen wird nicht berücksichtigt, da vorausgesetzt wird, dass diese als Grundstock eines Vorrichtungssystems vorhanden sind und nicht auftragspezifisch beschafft werden müssen.

Die in Tabelle 10 aufgezeigten Planungsgrundlagen können unabhängig voneinander, aber auch in beliebiger Kombination für die Bestimmung der Vorrichtungsalternativen verwendet werden. Darauf aufbauend wird in den nächsten Abschnitten ein Gesamtverfahren zur Bestimmung der Vorrichtungsalternativen beschrieben, das die folgenden vier Schritte umfasst:

1. *Analyse des Status quo* durch Zuordnung vorhandener Vorrichtungen zur aktuellen Spannaufgabe und zu Spannaufgaben der Einzelprognose, Bildung wirtschaftlich sinnvoller Entscheidungssequenzen,
2. *Optimierung und Ergänzung der Einzelzuordnungen* durch Analyse der in Schritt 1 getroffenen Einzelzuordnungen hinsichtlich eines Verbesserungspotentials durch neue Vorrichtungen, ggf. Zuordnung neuer Vorrichtungen und Bildung weiterer Entscheidungssequenzen,
3. *Optimierung und Ergänzung der Gruppenzuordnungen* durch Analyse der in Schritt 1 getroffenen Gruppenzuordnungen hinsichtlich eines Verbesserungspotentials durch neue wiederverwendbare Vorrichtungen unter Berücksichtigung der Spannaufgaben der Einzel- und Gruppenprognose sowie des zurückliegenden Auftragspektrums, ggf. Zuordnung neuer Vorrichtungen und Bildung weiterer Entscheidungssequenzen sowie
4. *Erstellung des Aktionsbaums* durch Zusammenführung der verschiedenen Entscheidungssequenzen und Optimierung des Aktionsbaums.

### **5.7.2.2 Analyse des Status quo**

Die Analyse des Status quo gibt Aufschluss darüber, in wie weit die aktuelle Spannaufgabe und die Spannaufgaben der Einzelprognose mit vorhandenen Vorrichtungen erfüllt werden können. Das Ergebnis besteht, wie in Abbildung 51 exemplarisch dargestellt, aus ersten Entscheidungen im Aktionsbaum der rollierenden Vorrichtungsplanung. Es müssen noch keine vollständigen Entscheidungssequenzen gebildet werden, falls für einzelne Spannaufgaben keine einsetzbare Vorrichtung vorhanden ist.

Für die Suche nach geeigneten Vorrichtungen sollte ein Vorrichtungsverwaltungssystem verwendet werden, das zunächst das Auffinden vorhandener Vorrichtungen und anschließend die Bewertung des technischen und wirtschaftlichen

Einsatzpotentials unterstützt, indem es die wesentlichen Funktions- und Leistungsmerkmale der Vorrichtungen bereitstellt. Falls für die aktuelle Spannaufgabe eine geeignete Vorrichtung verfügbar ist und eine neue Vorrichtung aufgrund eines kurzfristigen Produktionsstarts als Vorrichtungsalternative ausgeschlossen werden muss, ist die Vorrichtungsplanung an diesem Punkt bereits abgeschlossen. Das eventuelle Optimierungspotential einer neuen Vorrichtung kann in einem solchen Fall nicht genutzt werden.

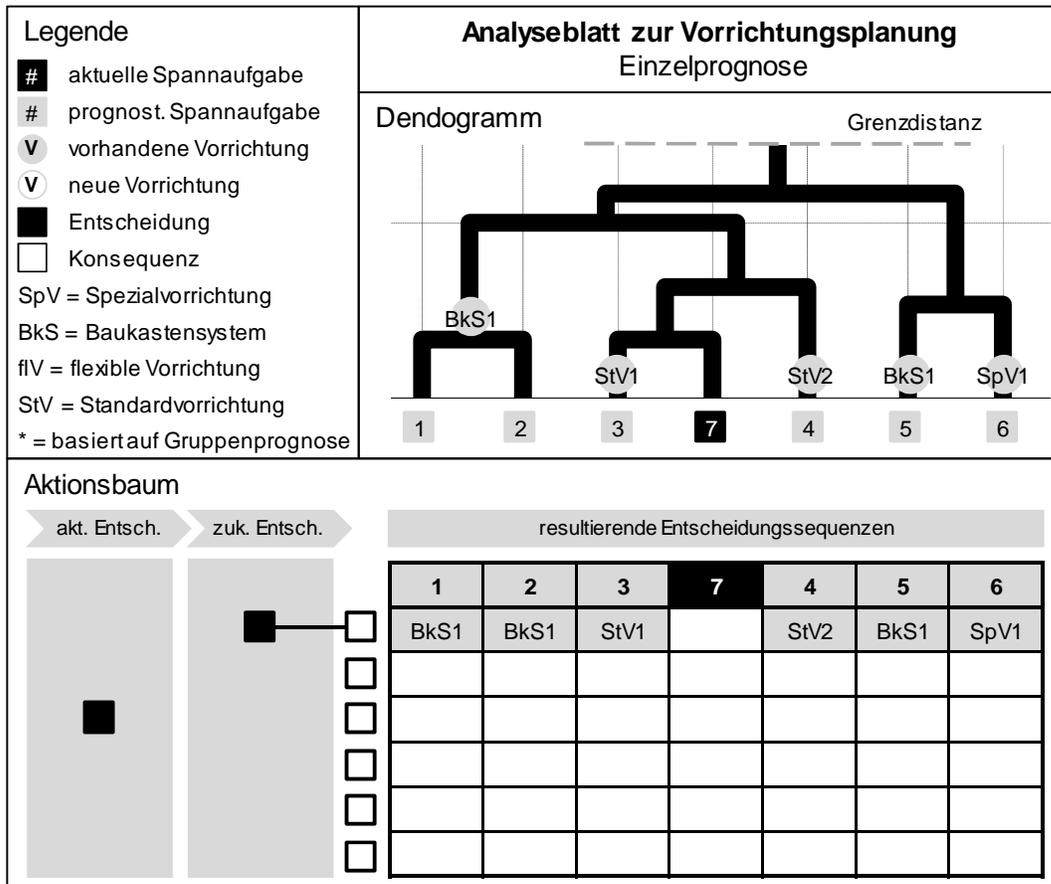


Abbildung 51: Analyse des Status quo: Zuordnung vorhandener Vorrichtungen zu den Spannaufgaben der Einzelprognose. Für Erläuterungen zur Verwendung des Analyseblatts siehe Abschnitt 9.6 (S. 183).

### 5.7.2.3 Optimierungspotential neuer Einzelvorrichtungen

In Kenntnis des Einsatzpotentials vorhandener Vorrichtungen wird untersucht, ob durch neue Einzelvorrichtungen eine wirtschaftlichere Erfüllung der Spannaufgaben möglich ist (Abbildung 52). Zuvor getroffene Entscheidungen für eine vorhandene Vorrichtung können dabei wieder verworfen werden, wenn eine bes-

sere Alternative identifiziert wurde, deren Mehrwert nicht erst durch eine detaillierte Berechnung der Konsequenzen festgestellt werden muss (siehe Abschnitt 5.7.3, S. 130). Zusätzlich wird jeder Spannaufgabe, für die keine geeignete vorhandene Vorrichtung gefunden wurde, eine neue Einzelvorrichtung zugeordnet, so dass sich im Aktionsbaum erste vollständige Entscheidungssequenzen bilden.

Da hier nur einzelne Spannaufgaben betrachtet werden, beschränken sich die Planungsalternativen auf neue Spezialvorrichtungen. Ihr Optimierungspotential gegenüber vorhandenen Vorrichtungen liegt in geringeren Einsatz- und Fertigungsablaufkosten, die trotz zusätzlicher Beschaffungskosten eine wirtschaftlichere Erfüllung der Spannaufgaben erlauben. Ein weiterer Einsatzgrund für Spezialvorrichtungen sind hohe technische Anforderungen, die durch die vorhandenen bzw. neue, wiederverwendbare Vorrichtungen nicht erfüllt werden können.

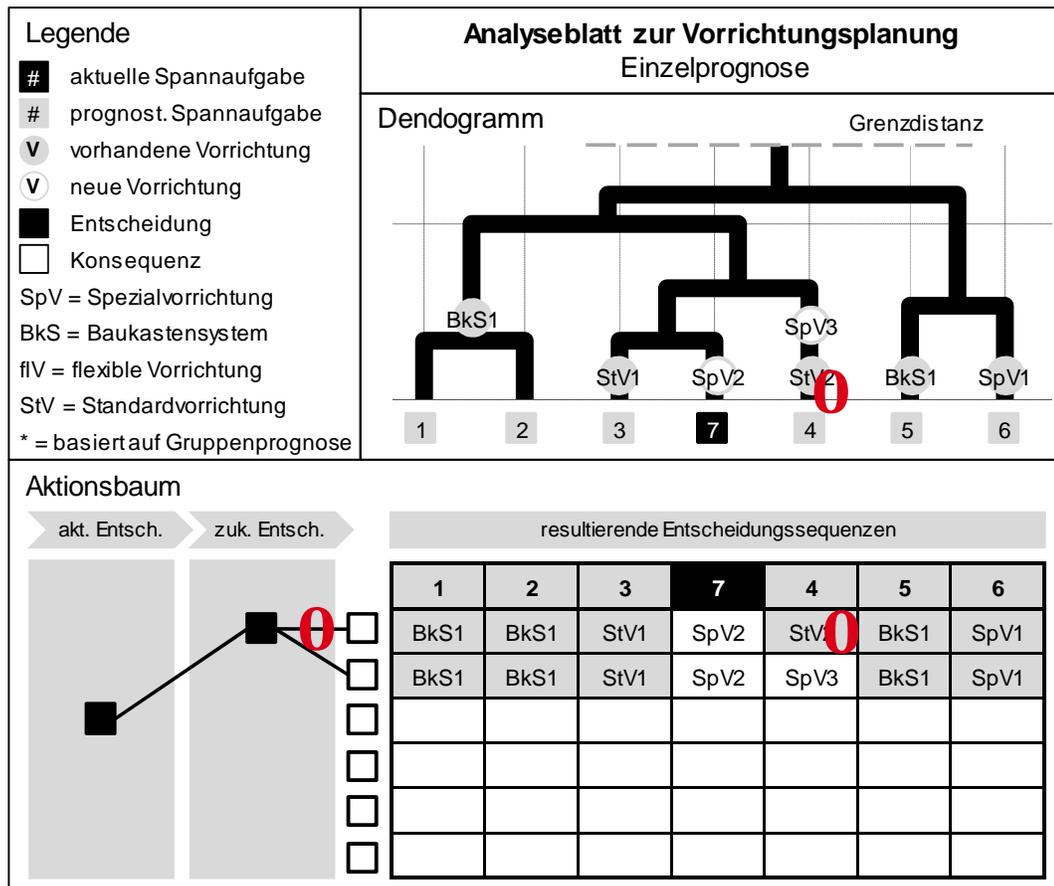


Abbildung 52: Optimierung und Ergänzung der Vorrichtungsalternativen durch neue Einzelvorrichtungen

### 5.7.2.4 Optimierungspotential neuer Gruppenvorrichtungen

Das Optimierungspotential durch neue wiederverwendbare Vorrichtungen erschließt sich aus der Analyse der Spannaufgaben der *Einzelprognose*, der *Gruppenprognose* sowie des gesamten zurückliegenden *Auftragsspektrums*.

#### Spannaufgaben der Einzelprognose

Anhand der Spannaufgaben der Einzelprognose kann das Potential neuer flexibler Vorrichtungen untersucht werden. Bei der Identifizierung dieser integriert aufgebauten Gruppenvorrichtungen hilft die hierarchisch dargestellte geometrische Ähnlichkeitsstruktur der Spannaufgaben, in der jeder Knotenpunkt als eine potentielle Vorrichtung interpretiert werden kann (Abbildung 53).

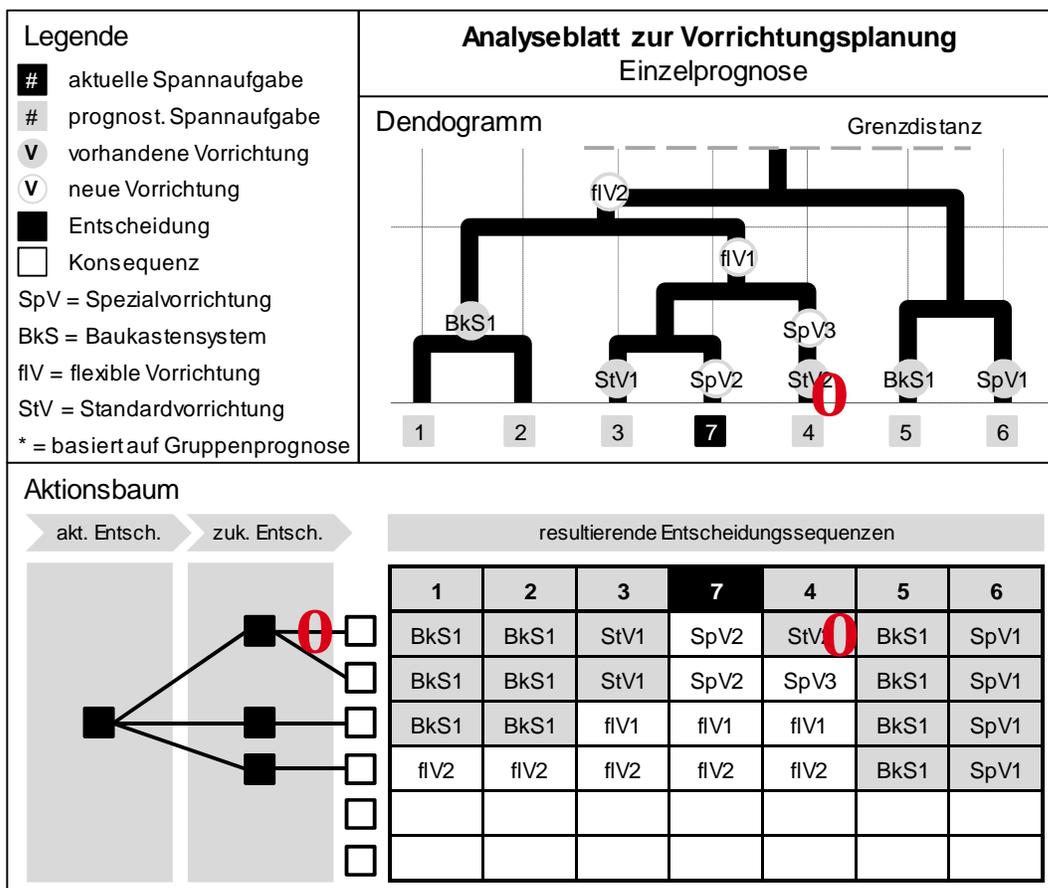


Abbildung 53: Optimierung und Ergänzung der Vorrichtungsalternativen durch neue wiederverwendbare Vorrichtungen für Spannaufgaben der Einzelprognose

Für die Spannaufgabengruppen sind jeweils die technische Realisierbarkeit und das wirtschaftliche Potential einer neuen flexiblen Vorrichtung zu prüfen. Die

*technische Realisierbarkeit* ist davon abhängig, ob eine gemeinsame flexible Spanngeometrie möglich ist und ob die fertigungstechnischen Anforderungen in einer Vorrichtung erfüllt werden können. Zu ihrer Bewertung stehen dem Vorrichtungsplaner die Datensätze der Spannaufgaben und die jeweiligen CAD-Modelle mit den Spannplänen zur Verfügung.

Die Neuanschaffung einer flexiblen Vorrichtung verfügt dann über ein *wirtschaftliches Potential*, wenn eine Spannaufgabengruppe ausreichend hohe kumulierte Stückzahlen und viele Fertigungslose aufweist, so dass die Beschaffungskosten durch geringe Einsatz- und Fertigungsablaufkosten kompensiert werden können (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 12). Dieses Potential ist grundsätzlich gegen den Einsatz von Standard- oder Baukastenvorrichtungen abzuwägen, es sei denn, die technische Komplexität der Spannaufgaben kann nur durch Spezial- oder flexible Vorrichtungen abgebildet werden.

### **Spannaufgaben der Gruppenprognose**

Das Ergebnis der Gruppenprognose besteht aus einer mit Unsicherheit behafteten Gruppe ähnlicher Spannaufgaben, aus der unscharfe Gesamtanforderungen an eine Vorrichtung abgeleitet werden können. Als Planungsalternativen kommen daher nur flexible Vorrichtungen mit einem breiten Funktionsbereich in Frage, durch deren Anpassungsfähigkeit die Unsicherheit des Prognoseergebnisses kompensiert wird.

Die Spannaufgaben der Gruppenprognose können in zweifacher Hinsicht bei der Vorrichtungsplanung verwendet werden:

- Zur Analyse des weiteren Anwendungspotentials einer auf Basis der Einzelprognose identifizierten neuen flexiblen Vorrichtung: Der Vorrichtungsplaner erhält hierdurch eine fundiertere Argumentationsbasis für eine Neuanschaffung (siehe Abbildung 54: Vorrichtung *flV4\** mit erweitertem Anwendungsbereich im Vergleich zur Vorrichtung *flV2*, die sich nur auf die Spannaufgaben der Einzelprognose bezieht).
- Als alleinige Grundlage zur Untersuchung der Einsatzpotentials einer neuen flexiblen Vorrichtung: Die Voraussetzung hierfür ist, dass eine ausreichend hohe Anzahl an Spannaufgaben durch die Gruppenprognose vorliegt, damit belastbare und detaillierte Anforderungen an die neue Vorrichtung abgeleitet werden können.

Eine Prüfung der technischen Realisierbarkeit einer flexiblen Vorrichtung wie bei den Spannaufgaben der Einzelprognose ist hier nicht mehr erforderlich, da diese bereits bei der Aufbereitung des Clusteranalyseergebnisses durchgeführt wurde. Es ist daher nur noch eine Bewertung des wirtschaftlichen Potentials

durchzuführen, bei der die Einsatzwahrscheinlichkeit einer für die Spannaufgaben der Gruppenprognose ausgelegten Vorrichtung und deren vorrichtungsinduzierte Kosten abschätzt werden.

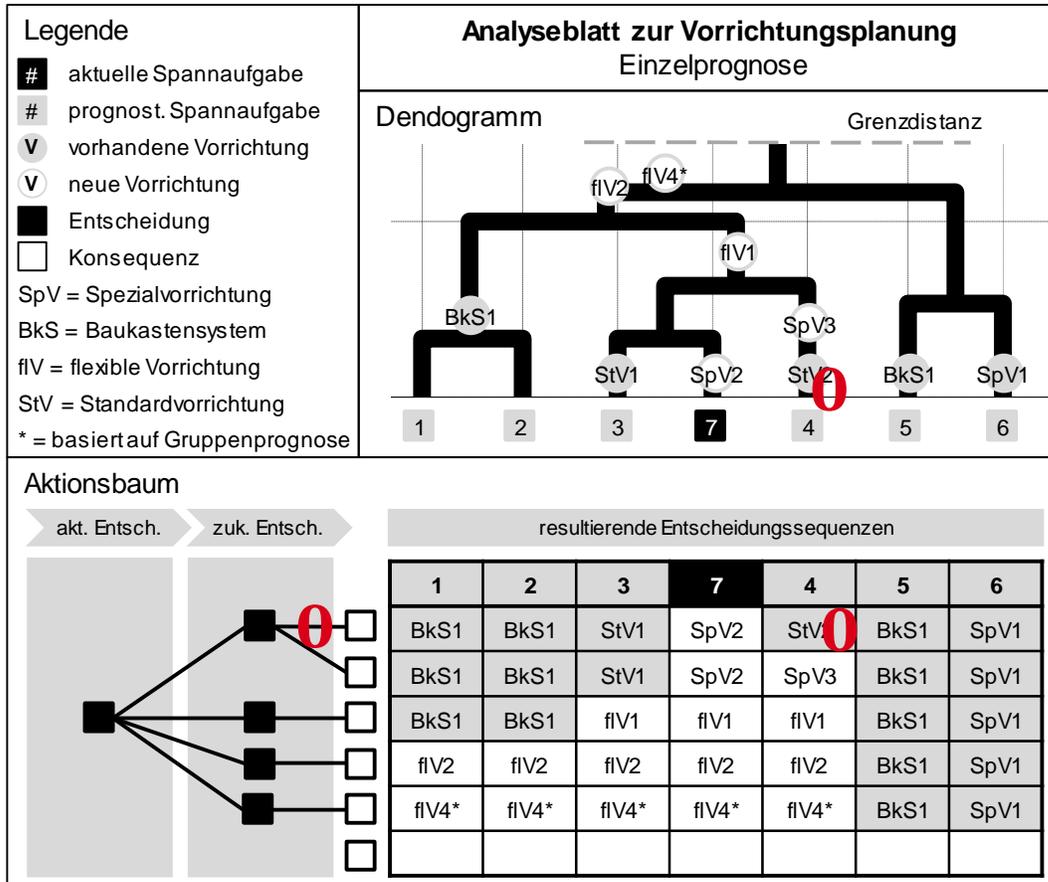


Abbildung 54: Optimierung und Ergänzung der Vorrichtungsalternativen durch neue flexible Vorrichtungen unter Berücksichtigung der Spannaufgaben der Gruppenprognose

Die Spannaufgaben der Gruppenprognose basieren auf Fertigungsaufträgen der Vergangenheit, die mit vorhandenen Vorrichtungen bereits gefertigt wurden. Bei der Bewertung einer neuen flexiblen Vorrichtung hat der Vorrichtungsplaner daher abzuwägen, ob diese Spannaufgaben durch eine neue oder durch die vorhandenen Vorrichtungen wirtschaftlicher erfüllt werden können. Hierfür stehen ihm die im Informationsmodell hinterlegten Vorrichtungsarten zur Verfügung, die für die alten Spannaufgaben eingesetzt wurden (vgl. Abschnitt 5.2.3, S. 94). Das wirtschaftliche Potential der neuen Vorrichtung besteht dabei vor allem in geringeren Einsatzkosten und/oder in einer höheren Einsatzwahrscheinlichkeit, die durch eine im Vergleich zu den vorhandenen Vorrichtungen höhere Flexibilität

realisiert werden kann und so mittelfristig die Beschaffungskosten für weitere Vorrichtungen senkt.

### **Spannaufgaben des zurückliegenden Auftragspektrums**

Die Spannaufgaben des zurückliegenden Auftragspektrums geben Aufschluss darüber, ob der Vorrichtungseinsatz durch ein neues Baukastensystem optimiert werden kann. Die Spannaufgaben der Einzel- und der Gruppenprognose werden dabei nicht verwendet, da sie durch ihre geometrische Eingrenzung im Rahmen der Clusteranalyse nur eine kleine Teilmenge des möglichen Einsatzgebiets eines Baukastensystems darstellen. Stattdessen wird das gesamte zurückliegende Auftragspektrum als Informationsgrundlage für die Investitionsentscheidung in ein neues Baukastensystem verwendet.

Wenn zur Inbetriebnahme eines neuen Fertigungssystems für die Vorrichtungsplanung bereits ersichtlich ist, welche Baukastensystemtypen aus technischer Sicht für die Anlage und für die zu erwartenden Fertigungsaufgaben in Frage kommen, dann bietet es sich an, ab dem ersten Fertigungsauftrag für jede Spannaufgabe zu analysieren, ob die identifizierten Baukastensysteme technisch und wirtschaftlich einsetzbar sind, und dies im Datensatz der Spannaufgabe anhand eines Eignungsmerkmals zu vermerken (vgl. Abschnitt 5.2.3, S. 94). Falls die aktuelle Spannaufgabe für ein nicht beschafftes Baukastensystem geeignet ist, dann ist dies für den Vorrichtungsplaner ein Anlass, diese Investitionsentscheidung zu durchdenken. Indem er das zurückliegende Auftragspektrum nach dem entsprechenden Eignungsmerkmal filtert, erhält er eine detaillierte Informationsbasis zur Bewertung des wirtschaftlichen Potentials eines neuen Baukastensystems. Ist das Einsatzpotential im Vergleich zu den weiteren Vorrichtungsalternativen ausreichend hoch, wird diese Alternative ebenfalls in den Aktionsbaum aufgenommen (Abbildung 55).

Alternativ zum Eignungsmerkmal können die zurückliegenden Spannaufgaben auch nach mehreren Datensatz-Attributen gefiltert werden, die einen Rückschluss auf ihre technische und wirtschaftliche Eignung für ein zur Beschaffung vorgesehenes Baukastensystem aufzeigen. So kann auch die Investition in ein Baukastensystem bewertet werden, das nicht zu Beginn des Vorrichtungssystemaufbaus als Planungsalternative berücksichtigt wurde.

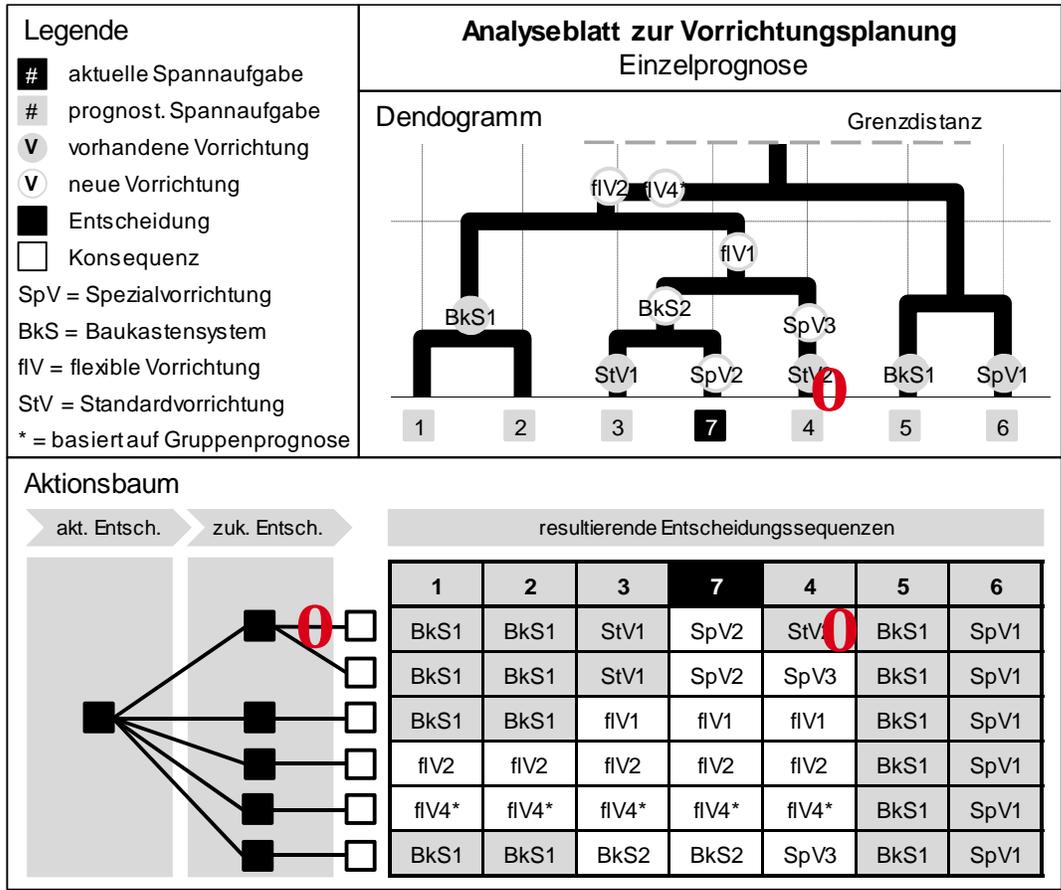


Abbildung 55: Optimierung und Ergänzung der Vorrichtungsalternativen durch ein neues Baukastensystem

### 5.7.2.5 Erstellung des Aktionsbaums

Der Aktionsbaum beschreibt die für die aktuelle Vorrichtungsplanung wirtschaftlich vielversprechendsten Vorrichtungsalternativen. Diese Entscheidungssequenzen berücksichtigen neben der aktuellen Spannaufgabe nur die Spannaufgaben der Einzelprognose. Die Spannaufgaben der Gruppenprognose werden aufgrund ihres unsicheren Erwartungszustands nicht direkt in die Entscheidungssequenzen einbezogen. Sie werden stattdessen indirekt durch ein erweitertes Anwendungspotential entsprechender Vorrichtungen bei der anschließenden Konsequenzberechnung berücksichtigt.

Es stehen zwei Ansätze zur *Verschlinkung der Entscheidungssequenzen* und somit zur Minimierung des Bewertungsaufwands zur Verfügung. Zum einen können nicht relevante Einzelentscheidungen bzw. Spannaufgaben aus dem Aktionsbaum entfernt werden und zum anderen können Entscheidungsalternativen bzw.

Vorrichtungen mit einem offensichtlich geringeren wirtschaftlichen Potential vorab ausgeschlossen werden.

*Einzelentscheidungen* sind nicht relevant für die Vorrichtungsplanung, wenn sie in der Bewertung der Entscheidungssequenzen nicht differenzierend wirken. Dies ist der Fall, wenn eine prognostizierte Spannaufgabe in jeder Entscheidungssequenz von der gleichen Vorrichtung erfüllt werden soll. Solche wiederkehrenden Entscheidungsmuster können leicht erkannt werden, wenn die Entscheidungssequenzen wie in Abbildung 56 anhand einer Tabelle übersichtlich dargestellt werden. In dem gezeigten Beispiel können die Spannaufgaben #5 und #6 von der Vorrichtungsplanung ausgeschlossen werden.

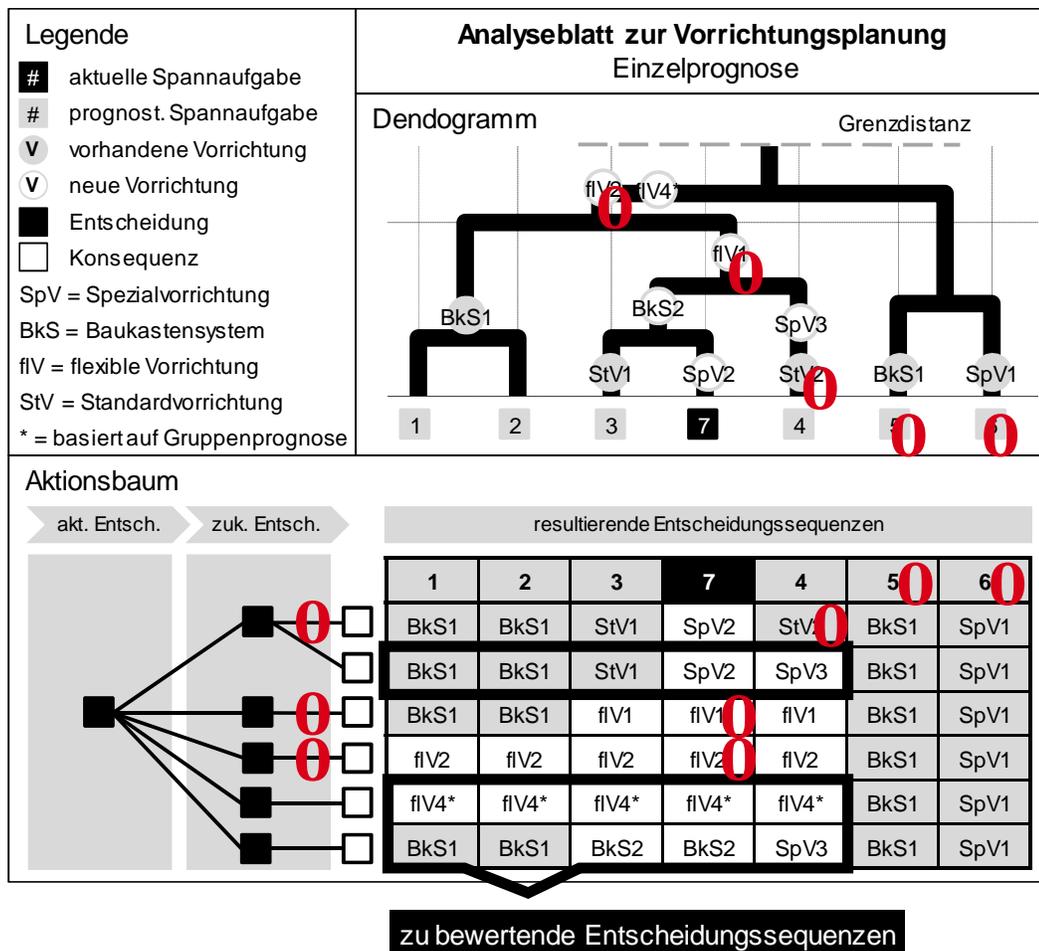


Abbildung 56: Eingrenzung der für die Vorrichtungsplanung relevanten Entscheidungssequenzen: Drei Aktionspfade mit der aktuellen Spannaufgabe und vier prognostizierten Spannaufgaben bilden die Grundlage für die Bestimmung der Vorrichtungsart.

*Entscheidungsalternativen* können mitunter aus Gründen der Dringlichkeit oder der Wirtschaftlichkeit aus der Vorrichtungsplanung ausgeschlossen werden. Für neue Vorrichtungen ist jeweils zu prüfen, ob eine rechtzeitige Beschaffung erfolgen kann. Dies betrifft in jedem Fall die aktuelle Spannaufgabe, kann aber auch für Spannaufgaben in der nahen Zukunft liegender Fertigungsaufträge relevant sein. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung der Entscheidungssequenzen geht jeweils von der aktuellen Spannaufgabe aus. Zunächst sind die wirtschaftlichsten Vorrichtungsalternativen für die aktuelle Spannaufgabe mit den davon abhängigen wirtschaftlichsten Vorrichtungen für die prognostizierten Spannaufgaben im Aktionsbaum zu berücksichtigen. Eine weniger wirtschaftliche Vorrichtung für die aktuelle Spannaufgabe geht nur in den Aktionsbaum ein, wenn sie eine günstigere Auswirkung auf die prognostizierten Spannaufgaben aufweist.

### 5.7.3 Bestimmung der Vorrichtungsart

Die Entscheidung über die Vorrichtungsart für die aktuelle Spannaufgabe wird durch einen Vergleich der mit Hilfe der starren, rollierenden Planung identifizierten Handlungsalternativen getroffen. Hierfür werden die *Konsequenzen* der im Aktionsbaum beschriebenen Entscheidungssequenzen anhand einer *Zielfunktion* ermittelt. Die zentrale Zielgröße stellen die vorrichtungsinduzierten Herstellkosten dar. Es können aber auch weitere Zielgrößen berücksichtigt werden, wie z. B. die Vorrichtungsverfügbarkeit, falls sie ein kritischer Erfolgsfaktor für die fristgerechte Bearbeitung von Fertigungsaufträgen ist (vgl. Abschnitt 4.3.2, S. 51).

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie eine allgemeine *Zielfunktion auf Basis der vorrichtungsinduzierten Herstellkosten* aufgestellt und ihre Konsequenzen ermittelt werden können. Sie soll als Basis für eine anwendungsspezifische Zielfunktion dienen, in deren Definition und Konsequenzermittlung zusätzlich die betrieblichen Erfolgsfaktoren und Praktiken einfließen müssen.

Die Zielfunktion der Vorrichtungsplanung betrachtet jeweils eine Entscheidungssequenz  $Es$  mit allen entscheidungsrelevanten Spannaufgaben  $SpA$  und ist darauf ausgerichtet, die vorrichtungsinduzierten Herstellkosten  $HK_V$  für die einzusetzenden Vorrichtungen zu minimieren:

$$HK_{V,Es} = \sum HK_{V,SpA} \rightarrow \mathbf{Min!} \quad (5-5)$$

Die vorrichtungsinduzierten Herstellkosten werden direkt durch die Vorrichtungen und indirekt durch den Vorrichtungseinsatz und seinen Einfluss auf den Fertigungsablauf verursacht.

Sie umfassen

- die Beschaffungskosten  $BsK$  für den Kauf bzw. die Entwicklung und Herstellung einer neuen Vorrichtung oder für die konstruktive Anpassung einer vorhandenen Vorrichtung,
- die laufende Betriebskosten  $BtK$  für die Lagerung und Wartung einer Vorrichtung,
- die Einsatzkosten  $EK$  für die Konzeption und Montage einer Baukasten-vorrichtung bzw. für das Einrichten einer Vorrichtung außerhalb der Produktionsanlage und
- die Fertigungsablaufkosten für die durch den Vorrichtungseinsatz bedingte Nutzungszeit  $T_N$  der Produktionsanlage (vgl. WARNECKE ET AL. 1996, S. 98).

Abbildung 57 zeigt auf, wie diese Kostenbestandteile den Kostenarten eines Fertigungsauftrags aus Sicht der Kostenträger-Stückrechnung unter Verwendung der Zuschlagskalkulation<sup>9</sup> und der Arbeitsstundensatzrechnung zugeordnet werden können.

Die vorrichtungsinduzierten Herstellkosten  $HK_{V,SpA}$  beziehen sich in diesem Zusammenhang auf eine Vorrichtung und die von ihr zu erfüllenden Spannaufgaben. Sie berechnen sich allgemein zu:

$$HK_{V,SpA} = (BsK_V + BtK_V) \times \frac{b_{SpA}}{B_V} + \sum_{SpA} (EK_{SpA} + K_{AH,SpA} \times T_{N,SpA}) \quad (5-6)$$

$B_V$  : Bezugswert zur anteiligen Verrechnung der Beschaffungs- und Betriebskosten einer Vorrichtung

$b_{SpA}$  : Faktor zur anteiligen Verrechnung der Beschaffungs- und Betriebskosten auf die entscheidungsrelevanten Spannaufgaben

$K_{AH}$  : Arbeitsstundensatz, enthält Maschinenkosten und Löhne

Die Einsatz-, Lohn- und Maschinenkosten jeder Spannaufgabe gehen jeweils in voller Höhe in die vorrichtungsinduzierten Herstellkosten ein. Die Beschaffungs- und Betriebskosten können dagegen als Gemeinkosten anteilig auf mehrere Spannaufgaben verrechnet werden.

---

<sup>9</sup> Die Kostenträger-Stückrechnung erfasst den Werteverzehr an Produktionsfaktoren oder Kostenträgern, um die Herstell- und Selbstkosten je Kostenträger zu ermitteln. Das Zuschlagskalkulationsverfahren wird angewendet, wenn ein Unternehmen verschiedene Produkte in unterschiedlichen Stückzahlen fertigt (WARNECKE ET AL. 1996, S. 109 ff.).

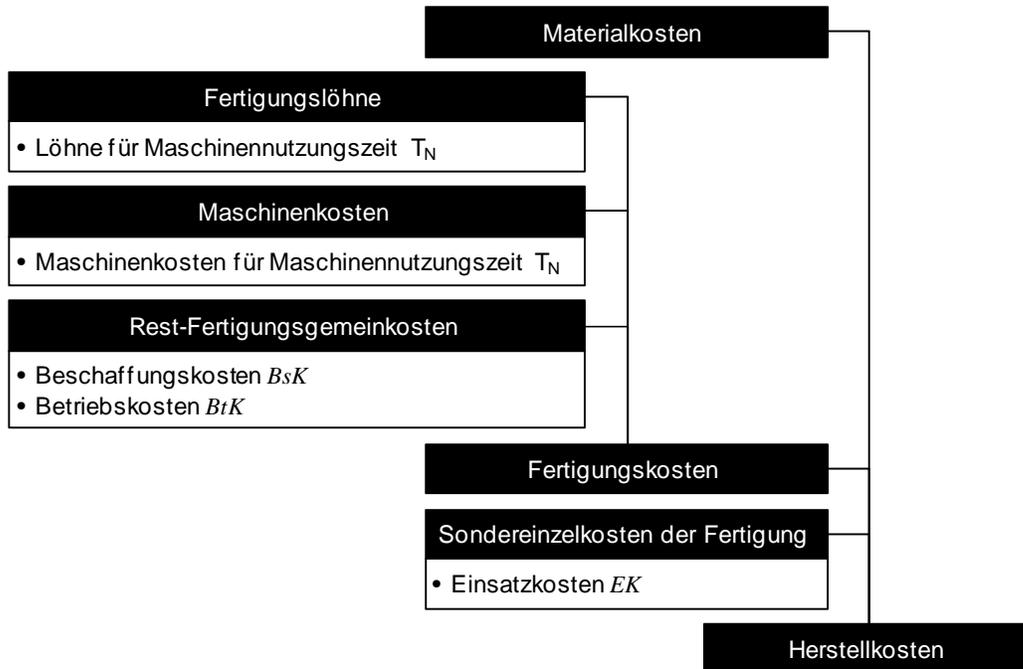


Abbildung 57: Kalkulationsschema der vorrichtung induzierten Herstellkosten aus Sicht der Kostenträger-Stückrechnung

Als Bezugsgrößen für eine verursachungsgerechte Verrechnung bieten sich die Auftragsstückzahlen oder -erlöse an. Der Bezugswert  $B_V$  wird für jede neue Vorrichtung festgelegt und bezieht sich auf die geschätzte Betriebsdauer der Vorrichtung: z. B. die Gesamtstückzahlen aller im Vorrichtungslebenszyklus bearbeiteter Werkstücke. Der rollierenden Planung entsprechend kann der Bezugswert bei jeder Planungssituation an den aktuellen Kenntnisstand angepasst werden. Der Verrechnungsfaktor  $b_{SpA}$  ergibt sich aus den Auftragsdaten der Spannaufgaben, für welche die Vorrichtung aktuell eingeplant wird: beispielsweise die Auftragsstückzahlen der betrachteten Spannaufgaben.

Während sich der Verrechnungsfaktor  $b_{SpA}$  immer nur auf die Spannaufgaben des Aktionsbaums bezieht, um die Vergleichbarkeit der Entscheidungsalternativen sicherzustellen, ist der Bezugswert  $B_V$  entsprechend dem Einsatzpotential einer Vorrichtung zu bestimmen. Der Bezugswert eines neuen Baukastensystems ist aus dem gesamten Auftragsspektrum abzuleiten und gilt auch in späteren Planungssituationen für die daraus entwickelten Baukastenvorrichtungen. Für eine neue flexible Vorrichtung wird der Bezugswert aus den Spannaufgaben der Einzel- und/oder der Gruppenprognose abgeleitet und kann ggf. auf die Betriebsdauer der Vorrichtung extrapoliert werden.

Bei der Ermittlung der Kosten ist das Aufwand-Nutzen-Prinzip zu beachten. Je höher die vorrichtung induzierten Kosten sind, desto detaillierter sollte die Ab-

schätzung erfolgen. Für eine effiziente Quantifizierung der Betriebs- und Einsatzkosten bieten sich Pauschalbeträge an, die für bestimmte Ausführungsarten und Komplexitätsstufen einer Vorrichtung betriebsspezifisch festgelegt werden müssen. Bei neuen Vorrichtungen sind mit der Erfahrung des Vorrichtungsplaners die Beschaffungskosten und ein geeigneter Bezugswert für deren anteilige Verrechnung festzulegen und anschließend in einer Vorrichtungsdatenbank für zukünftige Planungssituationen zu hinterlegen. Tabelle 11 gibt einen Überblick, mit welchen Informationen die verschiedenen Vorrichtungskosten ermittelt werden können.

	neue Vorrichtung	vorhandene Vorrichtung
Beschaffungskosten	Schätzung, Kostenkatalog, Lieferant	Vorrichtungsdatenbank
Betriebskosten/Betriebsdauer	Pauschalbetrag, z. B. abhängig von der Ausführungsart und der Komplexität einer Vorrichtung	
Einsatzkosten/Spannaufgabe		
Fertigungsablaufkosten	Schätzung der Maschinennutzungszeit je Spannaufgabe	
Bezugswert $B_V$	Schätzung für die Betriebsdauer der Vorrichtung	Vorrichtungsdatenbank
Verrechnungsfaktor $b_{SpA}$	Datensätze der entscheidungsrelevanten Spannaufgabe	

Tabelle 11: Informationsquellen für die Ermittlung der Vorrichtungskosten

Zur weiteren Vereinfachung der Konsequenzberechnung können fallweise bestimmte Kostenarten vernachlässigt werden, wie z. B. die Einsatzkosten für Standard-, Spezial- und flexible Vorrichtungen im Vergleich zu den Einsatzkosten für die Konzeption und Montage einer Baukastenvorrichtung. Ebenfalls vernachlässigt werden kann die anteilige Verrechnung von Beschaffungs- und Betriebskosten einer neuen Vorrichtung, die nur für entscheidungsrelevante Spannaufgaben eingeplant wird. In diesem Fall gilt  $b_{SpA} = B_V$ .

Mit der Ermittlung der vorrichtungsinduzierten Herstellkosten für alle Entscheidungssequenzen erhält der Vorrichtungsplaner eine Übersicht über die Konsequenzen seiner Vorrichtungsplanung für die aktuelle Spannaufgabe und die prognostizierten Spannaufgaben. Bei der anschließenden Auswahl der Vorrichtungsart für die aktuelle Spannaufgabe ist das *Risiko der prognostizierten Spannaufgaben* zu berücksichtigen. Dieses besteht in dem Ausfallrisiko der Fertigungsaufträge, welches wiederum ein Risiko bei der Neubeschaffung von Vorrichtungen darstellt, deren Beschaffungs- und Betriebskosten sich durch diese

Aufträge amortisieren sollen. Der Ausfall eines Fertigungsauftrags, für den eine vorhandene Vorrichtung eingeplant wird, stellt dagegen kein Risiko dar.

Falls die Beschaffung einer neuen Vorrichtung geringere Herstellkosten im Vergleich zum Einsatz vorhandener Vorrichtungen verspricht, diese Entscheidung aber auf Basis von z. T. unsicheren Prognosen getroffen werden muss, hat der Vorrichtungsplaner zwischen den sicheren Konsequenzen mit erhöhten Kosten und den risikobehafteten Konsequenzen mit größeren Kosteneinsparungen abzuwägen. Das Ausfallrisiko der Fertigungsaufträge kann bei der Berechnung der vorrichtungsinduzierten Herstellkosten folgendermaßen berücksichtigt werden:

$$HK_{V,SpA,r} = (BSK_V + BtK_V) \times \frac{b_{SpA,r}}{B_{V,r}} + \sum_{SpA} \left( (1 - r_{SpA}) \times (EK_{SpA} + \mathbf{K}_{AH,SpA} \times \mathbf{T}_{N,SpA}) \right) \quad (5-7)$$

$r_{SpA}$  : Ausfallrisiko [%] eines Fertigungsauftrags bzw. der entsprechenden Spannaufgabe(n)

Das Ausfallrisiko wird zum einen bei den Einsatz- und Fertigungsablaufkosten und zum anderen bei den anteiligen Beschaffungs- und Betriebskosten einkalkuliert. Falls letztere auf Basis der Auftragsstückzahlen berechnet werden, gilt:

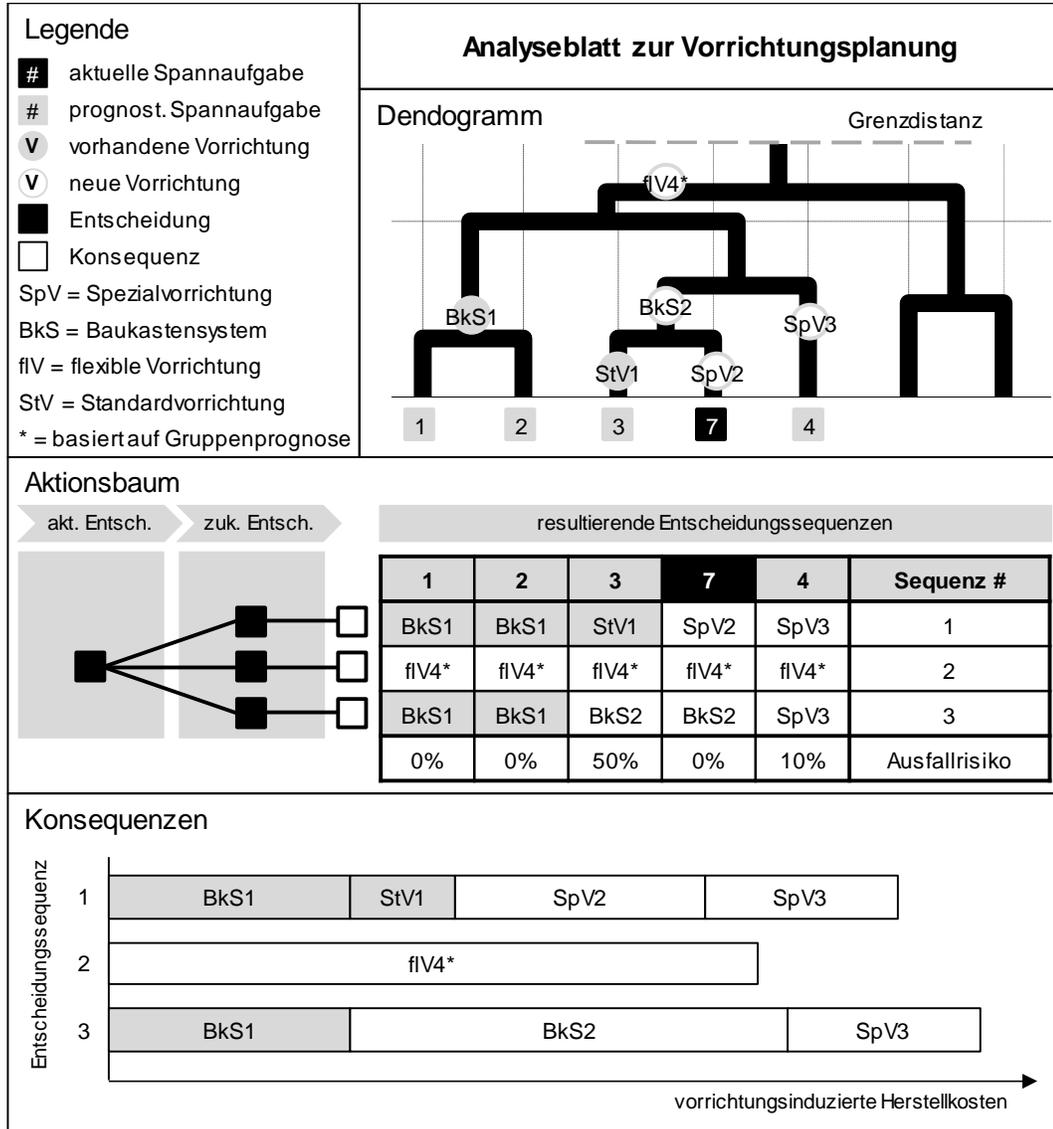
$$b_{SpA,r} = \sum_{SpA} (1 - r_{SpA}) \times N_{SpA} \quad (5-8)$$

$$B_{V,r} = N_{V,BtD} - \sum_{SpA} r_{SpA} \times N_{SpA} \quad (5-9)$$

$N_{SpA}$  : Stückzahlen eines Fertigungsauftrags bzw. der entsprechenden Spannaufgabe(n)

$N_{V,BtD}$  : Stückzahlen einer Vorrichtung, veranschlagt für die gesamte Betriebsdauer

Der Vorrichtungsplaner hat schließlich eine detaillierte Übersicht (Abbildung 58) über die kostenseitigen Konsequenzen seiner aktuellen Vorrichtungsplanung für zukünftige Fertigungsaufträge und kann mit diesem Wissen eine ganzheitlich fundierte Entscheidung über die Vorrichtungsart für den aktuellen Fertigungsauftrag treffen.



## **5.8 Weiteres Vorgehen in der Vorrichtungsbeschaffung**

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik endet mit der Bestimmung der Vorrichtungsart für den aktuellen Fertigungsauftrag. Im betrieblichen Vorrichtungswesen erfolgt im Anschluss die Beschaffung der konkreten Vorrichtung, die je nach der zuvor getroffenen Planungsentscheidung aus

- der Beschaffung und ggf. konstruktiven Anpassung einer im Lager vorhandenen Vorrichtung,
- der Konzeption und Montage einer Baukastenvorrichtung auf Basis eines vorhandenen Baukastensystems oder
- der Konstruktion und Beschaffung einer neuen Vorrichtung

besteht.

In diesem Kapitel wurde das detaillierte Vorgehen der auftragsbezogenen Vorrichtungsplanung in der Lohnfertigung beschrieben. Im folgenden Kapitel wird eine beispielhafte informationstechnische Umsetzung dieser Methodik aufgezeigt und eine technisch-wirtschaftliche Bewertung des Planungsvorgehens durchgeführt.

## 6 Umsetzung und Bewertung der Methodik

### 6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die informationstechnische Umsetzung und eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der in den vorhergehenden Kapiteln entwickelten und beschriebenen Methodik vorgestellt.

### 6.2 Informationstechnische Umsetzung

Das in dieser Arbeit beschriebene Planungsvorgehen basiert auf einer großen Menge zu verarbeitender Daten und kann daher nur effizient durchgeführt werden, wenn der Vorrichtungsplaner durch ein informationstechnisches System unterstützt wird. Ein solches System soll v. a. die Erzeugung und Analyse der auftragsbeschreibenden Daten automatisieren und die Verwaltung und Bereitstellung der Daten unterstützen. Hierfür sind grundsätzlich folgende Architekturkomponenten erforderlich:

- Eine *CAD-Software* zur Modellierung, Verwaltung und Bereitstellung der geometrischen Anforderungen einer Spannaufgabe und zur Umwandlung der proprietären CAD-Modelle in das neutrale STEP-Format,
- eine *Textanalysissoftware* zur automatisierten Umwandlung der STEP-Beschreibung in metrisch skalierte Eingangsdaten der Clusteranalyse,
- eine *Datenverwaltungssoftware*, bestehend aus einem Datenbankmanagementsystem oder einer Tabellenkalkulationssoftware, zur Verwaltung und Bereitstellung der Datensätze und zur Filterung ähnlicher Spannaufgaben anhand fertigungstechnischer Merkmale und
- eine *statistische Analysesoftware* zur hierarchischen Gruppierung von Spannaufgaben mittels Clusteranalyse.

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzte Prototyp (Abbildung 59) besteht aus einer Kombination von drei am Markt erhältlichen Software-Systemen (vgl. Abschnitt 9.8, S. 188). Dies sind die CAD-Software CATIA, das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel und das Mathematikprogramm MATLAB, mit dem die Textanalyse und die Clusteranalyse durchgeführt werden.

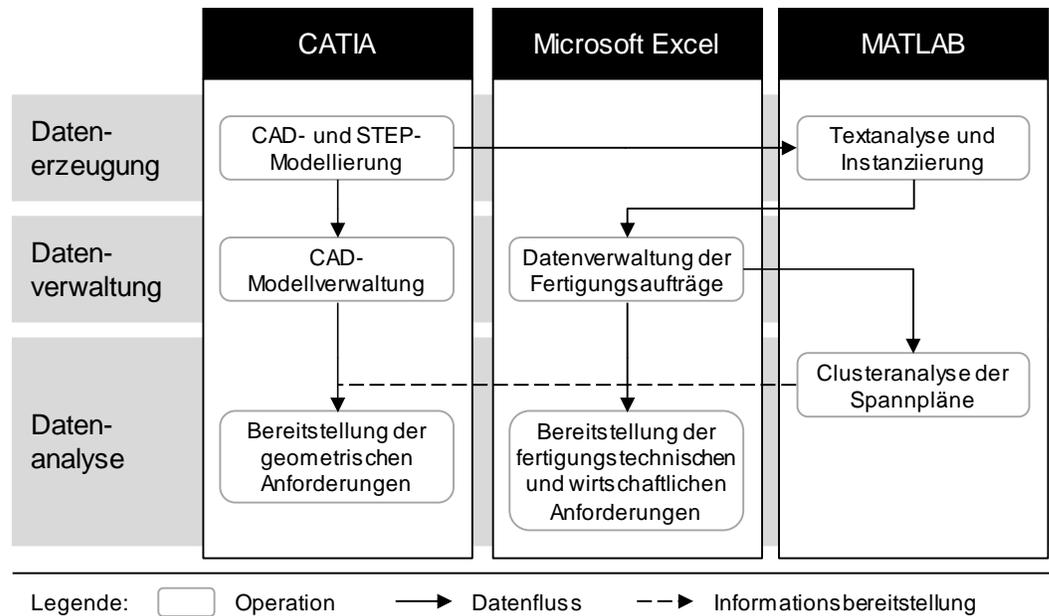


Abbildung 59: Architektur, Informations- und Datenflüsse des prototypisch umgesetzten informationstechnischen Systems

Mit der CAD-Software CATIA werden die geometrischen Anforderungen einer Spannaufgabe nach den Regeln des relevanten Spannmodells modelliert, d. h. die geometrischen CAD-Elemente, die die Anforderungen repräsentieren, werden erzeugt und mit der vorgegebenen Bezeichnung versehen. Abbildung 60 zeigt beispielhaft ein Werkstück mit den durch das Spannmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke definierten Bestimm- und Spannflächen, die als elliptisch begrenzte ebene Flächen modelliert und in  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$ , etc. umbenannt worden sind. Das gesamte CAD-Modell wird anschließend neben dem proprietären CATIA-Format auch im STEP-Format abgespeichert, das die geometrischen Eigenschaften der Bestimm- und Spannflächen in einer standardisierten und strukturierten Form enthält. Abbildung 61 stellt dies für die Bestimmfläche  $B_{y2}$  und die gesuchten Attributwerte des Ortsvektors, des Normalenvektors und der Flächengröße dar.

Die mit MATLAB -Standardfunktionen programmierte Textanalyse (Code siehe Abschnitt 9.3, S. 171) greift im nächsten Schritt auf die STEP-Datei zu und schreibt die dort ausgelesenen Daten direkt in eine zentrale Excel-Datei, in der die Datensätze aller Spannaufgaben nach Spannmodellen getrennt verwaltet werden (Abbildung 62). Der entwickelte Parser durchsucht hierfür die STEP-Beschreibung zunächst nach der Bezeichnung des Informationsobjekts, dessen Attributwerte ausgelesen werden sollen. Wie in Abbildung 61 für die als Ellipse modellierte Bestimmfläche  $B_{y2}$  dargestellt, können die gesuchten Werte dank der strukturierten und standardisierten Beschreibung der Ellipse und ihrer geometri-

schen Subelemente im STEP-Format durch einen einfachen Algorithmus identifiziert werden.

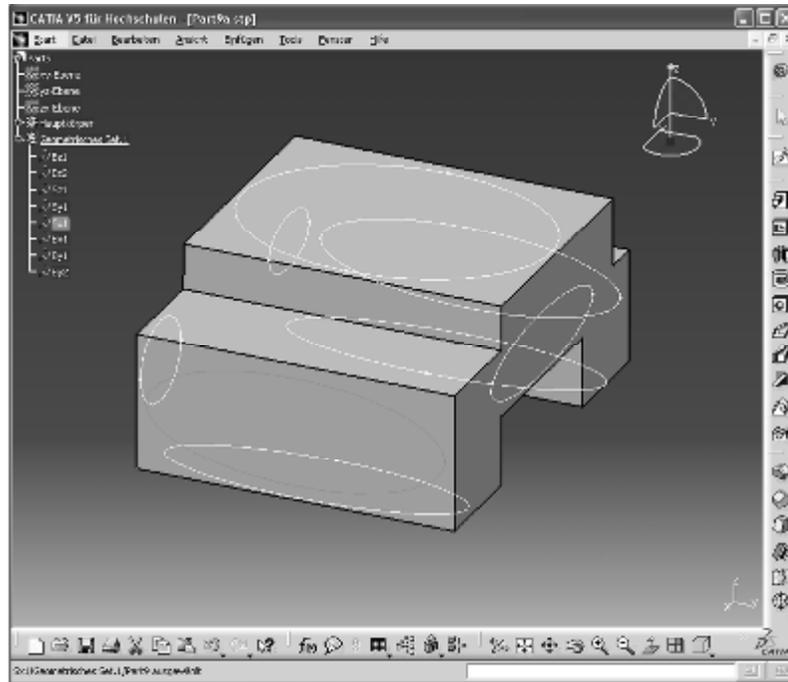


Abbildung 60: Modellierung der geometrischen Anforderungen der Spannaufgabe an eine Vorrichtung im CAD-System

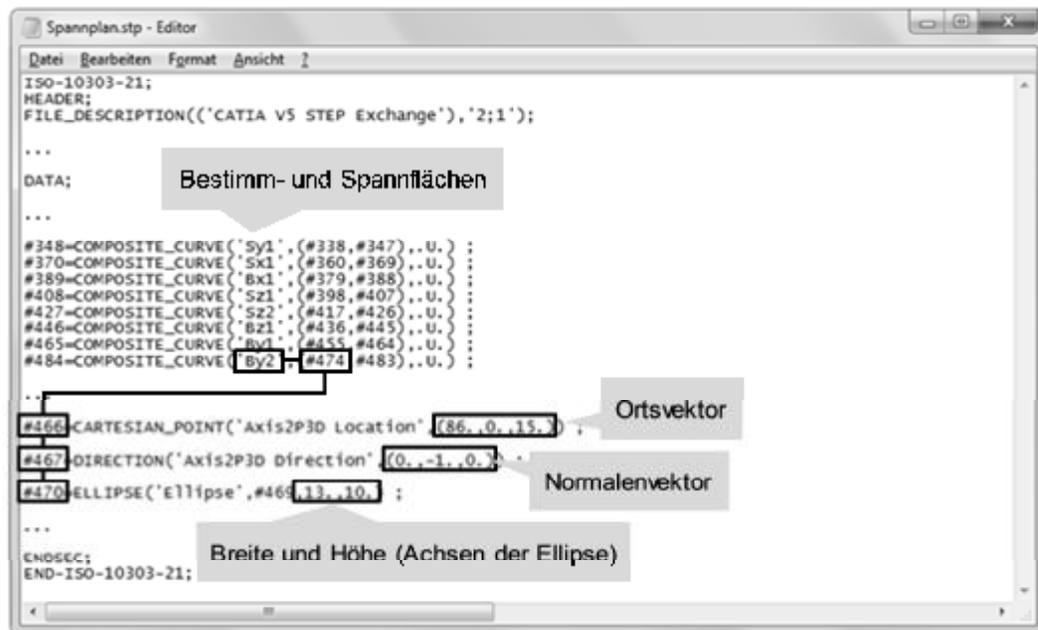


Abbildung 61: Auszug aus der STEP-Beschreibung einer als Ellipse modellierten Bestimmfläche

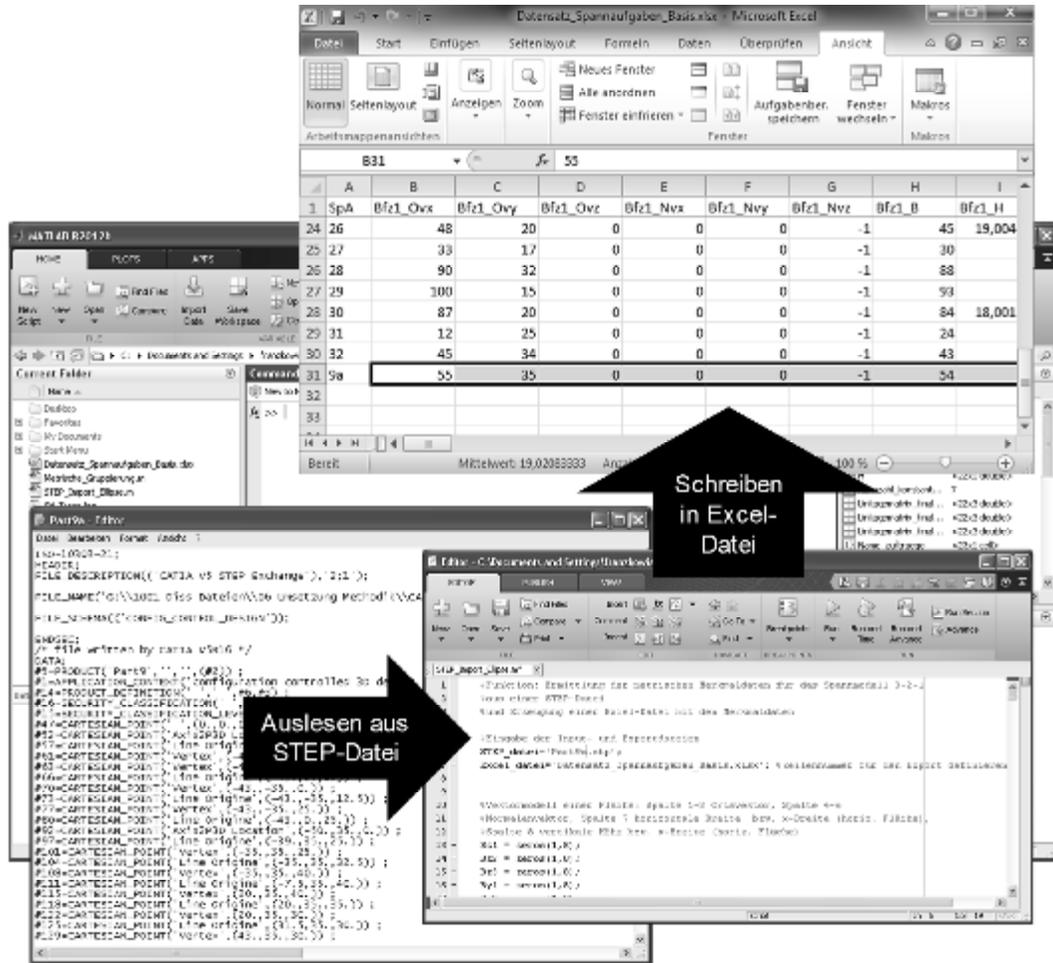


Abbildung 62: Auslesen der Merkmalsdaten einer Spannaufgabe aus der STEP-Datei und Schreiben des Datensatzes in die Microsoft-Excel-Datei mittels MATLAB-Programm

Auf die Datensätze aller nach demselben Spanmodell abgebildeten Spannaufgaben greift die Clusteranalyse zu, die in MATLAB mit Funktionen der Statistics Toolbox umgesetzt wurde (Code siehe Abschnitt 9.4, S. 179). Das jeweilige Gruppierungsergebnis der drei Fusionierungsalgorithmen wird in MATLAB als Dendrogramm interaktiv visualisiert, d. h. bei einer größeren Anzahl an Spannaufgaben kann der Anwender in die interessierenden Bereiche des Dendogramms rein- und rauszoomen (Abbildung 63).

Die durch die Clusteranalyse und das Prognosevorgehen identifizierten Spannaufgaben werden anschließend in Microsoft Excel anhand ihrer fertigungstechnischen Anforderungen und ggf. in CATIA anhand spezieller geometrischer Anforderungen analysiert, um die entscheidungsrelevanten Spannaufgaben zu identifizieren. Die Auftragsdaten dieser Spannaufgaben werden schließlich durch die

zentrale Excel-Datei bereitgestellt, damit die alternativen Vorrichtungsarten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren bestimmt werden können.

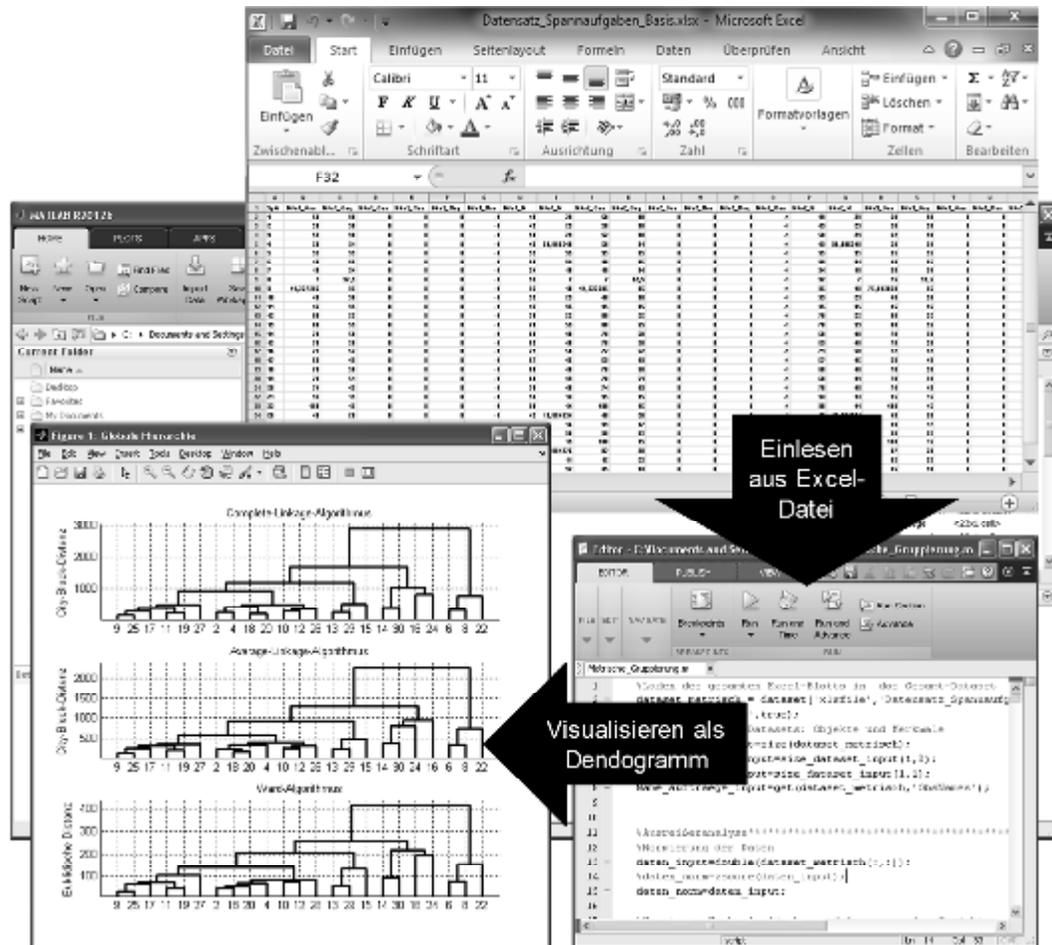


Abbildung 63: Ermittlung der Ähnlichkeitshierarchie von Spannaufgaben mittels Clusteranalyse

### 6.3 Technische Bewertung

Die technische Bewertung der entwickelten Methodik (Abbildung 64) betrachtet die Qualität der einzelnen Methoden und Modelle und orientiert sich dabei an den in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen hinsichtlich der zu verarbeitenden Eingangsdaten, der Vorgehensweise und der Ergebnisse des Planungsvorgehens (vgl. Abbildung 16, S. 46).

Die *Anwendungsbreite der Methodik* wird durch die Spannmodelle zur Beschreibung der geometrischen Anforderungen bestimmt. Die Spannmodelle können frei definiert werden und decken jeweils eine große Bandbreite an Spannfällen ab, da

sie auf allgemeinen Bestimm- und Spannprinzipien basieren. Es ist daher für einen Lohnfertiger möglich, das jeweilige Auftragspektrum umfassend abzubilden. Spannaufgaben, die sich nicht durch ein vorher definiertes Spannmodell beschreiben lassen, können von der Clusteranalyse nicht verarbeitet und nicht mit zurückliegenden Spannaufgaben gruppiert werden. Trotzdem können für solche Spezialfälle eine Einzelprognose planungsrelevanter Spannaufgaben und eine darauf aufbauende starre, rollierende Planung durchgeführt werden.

Die Methodik muss eine *flexible Verarbeitung von Datenformaten* für die als CAD-Elemente modellierten geometrischen Spannanforderungen gewährleisten. Dies wird mit der Verwendung des neutralen STEP-Formats erreicht, durch das die proprietären CAD-Modelle in eine standardisierte, weiterverarbeitbare Beschreibungform umgewandelt werden.

**Anforderungen durch die Eingangsdaten**

- Methodik flexibel anwendbar auf gesamtes Auftragspektrum
- flexible Verarbeitung von Datenformaten

**Anforderungen an die Vorgehensweise**

- auftragsbezogene und zugleich ganzheitliche Planung
- Anpass- und Erweiterbarkeit von Methoden und Modellen an bzw. auf unterschiedliche bzw. sich ändernde Auftragspektren
- hoher Automationsgrad

**Anforderungen an die Ergebnisse**

- Ausführungsart der Vorrichtung für die aktuelle Spannaufgabe unter Berücksichtigung zukünftiger Rationalisierungspotentiale

Bewertung

Legende: Anforderungen nicht erfüllt Ansätze vorhanden wichtige Aspekte umgesetzt  
 Anforderungen überwiegend umgesetzt Anforderungen vollständig umgesetzt

Abbildung 64: Technische Bewertung der entwickelten Planungsmethodik

Die Forderung nach einer *auftragsbezogenen und zugleich ganzheitlichen Vorrichtungspannung* wird durch das umgesetzte Konzept der starren, rollierenden Planung und der damit einhergehenden Berücksichtigung prognostizierter, zukünftiger Spannaufgaben so weit wie möglich erfüllt. Die verwendeten *Methoden und Modelle* wurden so entwickelt, dass sie an die verschiedenen betrieblichen Bedingungen *anpassbar und erweiterbar* sind. Diese Anforderung betrifft zunächst das Informationsmodell mit den darin enthaltenen Spannmodellen, das an das jeweilige Fertigungsspektrum angepasst und um weitere Spannmodelle oder einzelne Attribute erweitert werden kann. Sie schließt auch das automatisierte Instanzierungsvorgehen und die Clusteranalyse mit ein, die beide an die jeweiligen Spannmodelle angepasst werden können. Bei der nachträglichen Änderung

eines Spannmodells ist allerdings zu beachten, dass alle durch dieses Modell beschriebenen Spannaufgaben nachträglich angepasst werden müssen, damit die neuen Merkmale in der Clusteranalyse berücksichtigt werden können. Bei der Umsetzung der Methodik wurden mit der Instanziierung der Datensätze und der Gruppierung von Spannaufgaben diejenigen *Prozessschritte automatisiert*, die mittels expliziten Wissens eine große Datenmenge verarbeiten. Alle weiteren Schritte erfordern das implizite Wissen des Menschen und können daher nicht oder nur mit einem unvertretbar hohen Aufwand automatisiert werden.

Mithilfe des vorgestellten Planungsvorgehens ermittelt der Vorrichtungsplaner die *Ausführungsart und die Funktionalität der Vorrichtung* für die aktuelle Spannaufgabe unter Berücksichtigung zukünftiger Spannaufgaben. Hierfür wurde eine *Gruppierungsmethode* entwickelt, mit der die Ähnlichkeitsstruktur einer großen Anzahl an Spannplänen automatisiert berechnet und visualisiert werden kann. Durch die hohe Merkmalsanzahl und die Möglichkeit zur individuellen Merkmalsgewichtung werden selbst kleine geometrische Unterschiede im Gruppierungsergebnis berücksichtigt und die Ähnlichkeitsstruktur zwischen Spannplänen mit hoher Güte ermittelt (vgl. Abschnitt 9.6, S. 183).

## 6.4 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methodik (Abbildung 65) stellt deren Aufwand und Nutzen einander gegenüber und orientiert sich dabei an den in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen hinsichtlich der Ressourcen und der Ergebnisse des Planungsvorgehens (vgl. Abbildung 16, S. 46).

Bei der Betrachtung des *Planungsaufwands* wird zwischen dem initialen Aufwand zur Einführung der Methodik und dem kontinuierlichen Aufwand für die auftragsorientierte Durchführung der Planung unterschieden. Zur *Implementierung* der Methodik in die betriebliche Vorrichtungsplanung muss diese zunächst an die jeweiligen Anforderungen und Randbedingungen des Anwendungsfelds angepasst werden. Im Wesentlichen sind hierfür folgende Aufwände zu tätigen:

- Anpassung des Informationsmodells und Definition der erforderlichen Spannmodelle in Abhängigkeit der Fertigungsverfahren, der Vorrichtungsfunktionen und des zu fertigenden Teilespektrums (vgl. Abschnitt 5.2, S. 93),
- Anpassung des automatisierten Instanziierungsverfahrens an die betrieblichen Spannmodelle (vgl. Abschnitt 5.4.3, S. 103),

- Anpassung des Gruppierungsverfahrens an die betrieblichen Spannmodelle und Justierung der Gewichtungsfaktoren an die betriebliche Ähnlichkeitsdefinition von Spannvorrichtungen (vgl. Abschnitt 5.5, S. 104),
- Anpassung der Bewertung vorrichtungsinduzierter Kosten und ggf. Hinzunahme qualitativer Größen in die Bewertungsfunktion für Vorrichtungen (vgl. Abschnitt 5.7.3, S. 130),
- Informationstechnische Umsetzung des Planungsvorgehens, ggf. Kauf einer Statistiksoftware für die Textanalyse und die Clusteranalyse (vgl. Abschnitt 6.2, S. 137),
- Roll-out der Planungsmethodik: Schulung der Prozessbeteiligten, Prüfung des Planungserfolgs und ggf. Optimierung der betrieblichen Methoden und Modelle.

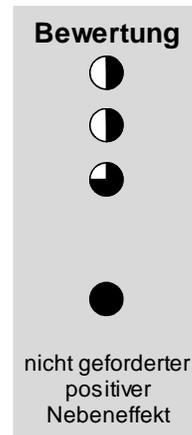
Das für die betriebliche Anpassung der Methodik erforderliche *Wissen* kann nur zum Teil vorausgesetzt werden, da die für die Umsetzung des Instanzierungs- und Gruppierungsverfahrens erforderlichen Detailkenntnisse zur Text- und Clusteranalyse nicht zu den üblichen Fachkenntnissen eines Methodenplaners der Arbeitsvorbereitung zählen. Das Wissen über Bestimm- und Spannprinzipien für die Definition von Spannmodellen wird hingegen vorausgesetzt, ebenso wie über betriebliche Methoden zur Bewertung von Fertigungs- und Vorrichtungskosten.

**Anforderungen an den Ressourcenverbrauch**

- geringe Implementierungskosten
- minimales erforderliches Zusatzwissen für den Methoden- und Vorrichtungsplaner
- geringer Zusatzaufwand im Vergleich zur konventionellen Vorrichtungsplanung

**Anforderungen an die Ergebnisse**

- Ausführungsart der Vorrichtung für die aktuelle Spannaufgabe unter Berücksichtigung zukünftiger Rationalisierungspotentiale
- Steigerung von Wiederverwendungsgrad und Anpassungsfähigkeit einzelner Vorrichtungen durch standardisierte Spanngeometrien



Legende: ○ Anforderungen nicht erfüllt   ◐ Ansätze vorhanden   ◑ wichtige Aspekte umgesetzt  
 ◒ Anforderungen überwiegend umgesetzt   ● Anforderungen vollständig umgesetzt

Abbildung 65: Wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Planungsmethodik

Die Anwendung der Methodik ist für den Vorrichtungsplaner ohne detailliertes Zusatzwissen möglich, da die fachfremden Prozessschritte, d. h. die Instanzierung des Datensatzes und die Gruppierung der Spannaufgaben, weitgehend automatisiert ablaufen. Er muss lediglich Erfahrung darin gewinnen, wie das Er-

gebnis der Clusteranalyse in Form eines Dendogramms richtig zu interpretieren ist.

Der *kontinuierliche Aufwand* für die Durchführung der Methodik wird anhand des Zusatzaufwands im Vergleich zur konventionellen, auftragspezifischen Vorrichtungsplanung bewertet. Die Methodik ist so konzipiert, dass sie sich durch Nutzung bestehender Informationen und Prozesse der Arbeits- und Vorrichtungsplanung möglichst reibungslos in den konventionellen Ablauf einfügt. Bei Betrachtung des Planungsvorgehens für einen Fertigungsauftrag sind Zusatzaufwände für die Auswertung der Clusteranalyse, die Durchführung der Einzelprognose, die anschließende Aufbereitung der Datensätze der prognostizierten Spannaufgaben sowie deren quasi vorgezogene Vorrichtungsplanung im Rahmen der starren, rollierenden Planung festzustellen.

Wird hingegen der Gesamtaufwand für die Vorrichtungsplanung über alle Fertigungsaufträge hinweg betrachtet, ergeben sich planerische Synergieeffekte, da die Datensätze, die identifizierten Vorrichtungsalternativen und die Bewertungen aus früheren Planungssituationen übernommen werden können. D. h. alle Planungstätigkeiten, die sich auf einzelne, prognostizierte Spannaufgaben beziehen, stellen keinen Zusatzaufwand dar, wenn diese in der Zukunft zu realen Planungsaufgaben werden. In dieser Hinsicht werden in Abbildung 66 die je Prozessschritt anfallenden Zusatzaufwände bewertet.

Die beschriebenen Zusatzaufwände entstehen allerdings nicht bei jedem Planungsdurchlauf, da ggf. nicht alle Schritte der Methodik vollzogen werden müssen bzw. können. So reduziert sich der Zusatzaufwand auf Null, wenn die Dringlichkeit eines neuen Fertigungsauftrags die Neuanschaffung einer Vorrichtung verhindert oder bei der Prognose keine planungsrelevanten Spannaufgaben identifiziert werden (vgl. Abbildung 66).

Grundsätzlich fällt der Zusatzaufwand umso geringer aus, je länger die Methodik angewendet wird. Durch die schrittweise Anpassung des Vorrichtungssystems an das Teilespektrum werden die Planungsalternativen für die aktuelle Spannaufgabe und für die prognostizierten Spannaufgaben immer häufiger nur aus vorhandenen Vorrichtungen bestehen, und die Beschaffung einer neuen Vorrichtung wird wesentlich seltener eine wirtschaftliche Option darstellen als in der frühen Aufbauphase des Vorrichtungssystems. In einem solchen Fall müssen die prognostizierten Spannaufgaben nicht mehr bei der Bewertung der Vorrichtungsalternativen berücksichtigt werden und es ist lediglich die am besten geeignete vorhandene Vorrichtung für die aktuelle Spannaufgabe zu identifizieren.

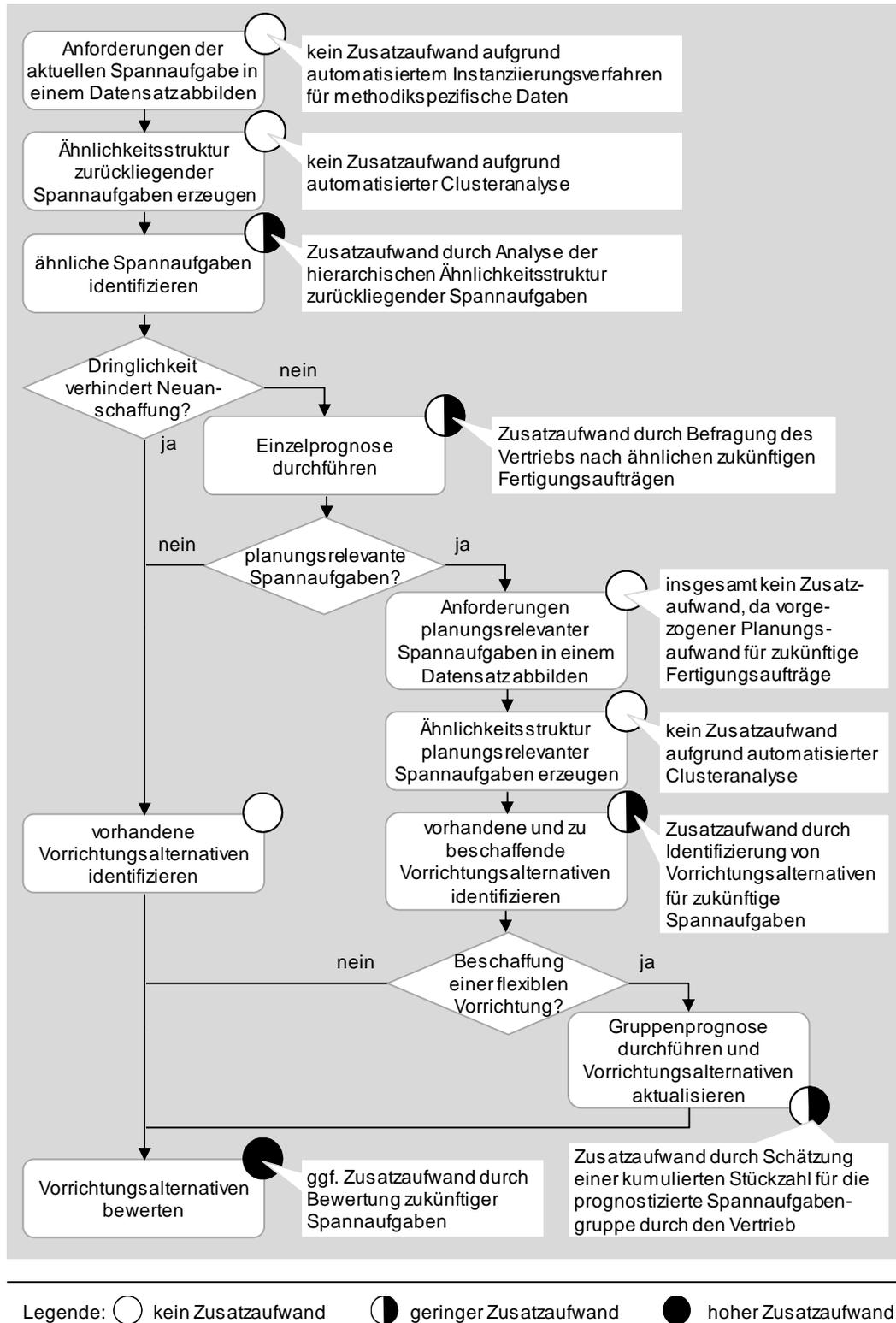


Abbildung 66: Zusatzaufwand der entwickelten Methodik im Vergleich zur konventionellen Vorrichtungsplanung, dargestellt anhand des in Abbildung 46 aufgezeigten Planungsablaufs

Der *Nutzen* der Methodik folgt aus der systematischen Identifizierung und Bewertung von Vorrichtungsalternativen und aus der zukunftsgerichteten Auswahl und Auslegung neuer Vorrichtungen.

Die standardisierte Abbildung der Anforderungen einer Spannaufgabe anhand von Spannmodellen bewirkt eine Vereinheitlichung der Spanngeometrie, die wiederum zu einem höheren Wiederverwendungsgrad bzw. einer besseren Anpassungsfähigkeit von Vorrichtungen und einer leichteren Standardisierung von Vorrichtungs-elementen führt. Dadurch werden *Beschaffungskosten* reduziert, da neue Vorrichtungen seltener erforderlich sind und, falls doch, vermehrt durch Variantenkonstruktion entwickelt werden können.

Die Planung des Vorrichtungseinsatzes unter Berücksichtigung zukünftiger Spannaufgaben hat einen günstigeren Einsatz der verschiedenen Vorrichtungsarten zur Folge. Insbesondere das Einsatzpotential neuer flexibler Vorrichtungen kann durch die ganzheitliche Planung besser bewertet werden, so dass *Beschaffungskosten* bzw. *Einsatz- und Fertigungsablaufkosten* durch den selteneren Einsatz von Spezial- und Baukastenvorrichtungen gesenkt werden.

Die beschriebene Wirkung der rollierenden Planung ist direkt abhängig von der Prognosegüte zukünftiger Spannaufgaben. Es kann in der Praxis nie ein vollständiger Informationsstand über die Zukunft mit ihren auftragsrelevanten Planungsentscheidungen gewonnen werden. Die Methodik ermöglicht es aber, über die Einzelprognose alle direkt vorhersehbaren Rationalisierungspotentiale und über die Gruppenprognose die nicht offensichtlichen Rationalisierungspotentiale weit möglichst in Erfahrung zu bringen und für die aktuelle Vorrichtungsplanung nutzbar zu machen.

## **6.5 Fazit**

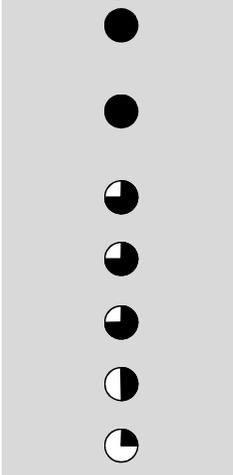
Vor dem Hintergrund der technischen und wirtschaftlichen Bewertung ist eine Einführung und Anwendung dieser Planungsmethodik unter bestimmten betrieblichen Randbedingungen sinnvoll. Grundsätzlich sollten die beschriebenen initialen und kontinuierlichen monetären Aufwände substantiell geringer sein als die durch die Methodik eingesparten Betriebsmittel- und Fertigungskosten. Da diese Kosten jeweils betriebspezifisch ermittelt und einander gegenüber gestellt werden müssen, sind in Abbildung 67 die allgemeingültigen Randbedingungen aufgezeigt, anhand derer auf das Nutzenpotential der Methodik geschlossen werden kann.

Die *Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung der Methodik* ist ein heterogenes und volatiles Produktionsprogramm, das es nicht erlaubt, in einem Schritt das gesamte Vorrichtungssystem einer Fertigungsanlage zu planen. In diesem Umfeld entfaltet die starre, rollierende Planung unter Einbeziehung der vorhersehbaren Spannaufgaben ihre Wirkung. Die zukünftigen Spannaufgaben bergen nur dann Synergiepotential, wenn ihre Anforderungen bei der Anschaffung neuer Vorrichtungen berücksichtigt werden. Daher ist der Nutzen der Methodik an den Bedarf unterschiedlicher Vorrichtungen gekoppelt und in der Aufbauphase eines Vorrichtungssystems am höchsten.

### Randbedingungen

- Produktionsprogramm aus heterogenen, nicht langfristig und sicher planbaren Fertigungsaufträgen
- komplexe Spannanforderungen, die nicht durch eine einzelne, fest in der Fertigungsanlage installierte Vorrichtung erfüllt werden können
- im Aufbau befindliches Vorrichtungssystem, für das regelmäßig neue Vorrichtungen beschafft werden
- hohe Anzahl an Fertigungsaufträgen
- bestehendes Vorrichtungssystem, das überwiegend Spezialvorrichtungen enthält
- bestehendes Vorrichtungssystem, das überwiegend aus einem Baukastensystem besteht
- kurzfristige Fertigungsaufträge

### Nutzenpotential



Legende: ● Voraussetzung für Anwendung der Methodik    ◐ hohes Nutzenpotential  
 ◑ mittleres Nutzenpotential    ◒ niedriges Nutzenpotential

*Abbildung 67: Betriebliche Randbedingung für eine wirtschaftliche Anwendung der Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen*

Bei einem bestehenden Vorrichtungssystem lässt sich ein Nutzenpotential ableiten, wenn es überwiegend aus Spezialvorrichtungen oder einem Baukastensystem besteht. Ein vermehrter Einsatz von flexiblen Vorrichtungen kann in diesen Fällen entweder Beschaffungs- und Betriebskosten für weitere Spezialvorrichtungen sparen oder Einsatz- und Fertigungsablaufkosten reduzieren, die u.a. durch die Montage und Demontage der Baukastenvorrichtungen entstehen. Ein weiterer Indikator für eine wirtschaftliche Anwendung der Methodik ist eine hohe Anzahl an Fertigungsaufträgen, mit der das Synergiepotential zwischen den Spannaufgaben und damit die Wirtschaftlichkeit wiederverwendbarer Vorrichtungen steigen. In Kombination mit einem hohen Anteil kurzfristiger Fertigungsaufträge wirkt sich der hohe Wiederverwendungsgrad des Vorrichtungssystems in einer schnellen Reaktionsfähigkeit des Lohnfertigers aus.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Teilefertiger und Produktionsspezialisten der produzierenden Industrie sind als Zulieferer einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt, da für sie aufgrund der geringen Integration in den Entwicklungsprozess des Herstellers ein hohes Substitutionsrisiko besteht. Als Lohnfertiger müssen sie flexibel auf eingehende Anfragen reagieren und kostengünstig in der geforderten Qualität produzieren. Zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit sind daher eine kontinuierliche Reduzierung der Kosten und stetige Innovationen im Bereich der Fertigungsprozesse und -mittel gefordert.

Diese Arbeit untersucht das Rationalisierungspotential im Vorrichtungswesen eines Lohnfertigers. Vorrichtungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Fertigungskosten und verursachen einen wesentlichen Teil der Betriebsmittelkosten eines Fertigungsauftrags, da sie als Bindeglied zwischen dem zu fertigenden Werkstück und den vorhandenen Produktionsanlagen und Werkzeugen oftmals teilespezifisch ausgelegt sein müssen. Die Analyse von Rationalisierungsmaßnahmen im Vorrichtungswesen zeigt, dass ein durch verschiedene Vorrichtungsarten an das Teilespektrum optimal angepasstes Vorrichtungssystem das größte Potential aufzeigt, den Fertigungsablauf zu optimieren und Herstellkosten zu reduzieren. Dieses Ziel zu erreichen, stellt die Vorrichtungsplanung eines Lohnfertigers vor ein grundsätzliches Problem, da sie i. d. R. nicht über ein mittelfristiges Produktionsprogramm verfügt, auf dessen Basis ein Vorrichtungssystem zukunftsgerichtet und ganzheitlich ausgelegt werden könnte. Stattdessen erfolgt die Vorrichtungsplanung reaktiv und auftragspezifisch, so dass Rationalisierungspotentiale zukünftiger Fertigungsaufträge nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Methodik zur auftragsbezogenen Vorrichtungsplanung vorgestellt, deren ganzheitlicher und zukunftsgerichteter Ansatz schrittweise zu einer an das Teilespektrum angepassten Struktur des gesamten Vorrichtungssystems führt. Das entwickelte Vorgehen richtet sich nach dem Prinzip der starren, rollierenden Planung, d. h. die Vorrichtungsplanung für den aktuellen Fertigungsauftrag berücksichtigt alle vorhersehbaren, entscheidungsrelevanten Fertigungsaufträge der Zukunft.

Der Schwerpunkt der Methodik liegt auf der Gewinnung und Analyse einer möglichst umfassenden *Informationsbasis aus zukunftsrelevanten Spannaufgaben*, um anschließend *Vorrichtungsalternativen* für die aktuelle Spannaufgabe *identifizieren* und unter Einbeziehung des Rationalisierungspotentials zukünftiger Spannaufgaben *ganzheitlich bewerten* zu können.

Die Vorrichtungspannung beginnt mit der Analyse der einzelnen Spannaufgaben des aktuellen Fertigungsauftrags. Hierfür wurde ein *Informationsmodell* entwickelt, das die wirtschaftlichen, werkstückseitigen und fertigungstechnischen Anforderungen einer Spannaufgabe an die einzusetzende Vorrichtung abbildet. Der Kern des Informationsmodells besteht aus verschiedenen Spannmodellen, die die Anforderungen an die Spanngeometrie darstellen. Sie basieren auf allgemeingültigen Bestimm- und Spannprinzipien und können flexibel an verschiedene betriebliche Fertigungsaufgaben angepasst werden.

Die Anforderungen an die Spanngeometrie werden durch eine Vielzahl von Attributen abgebildet. Zur effizienten Erzeugung dieser Daten wurde ein *Instanzierungsvorgehen* erarbeitet, bei dem die Anforderungen zuerst durch den Vorrichtungsplaner über standardisierte geometrische Elemente in einem CAD-System erzeugt und anschließend automatisiert unter Verwendung eines neutralen CAD-Formats ausgelesen und in den Datensatz der Spannaufgabe hineingeschrieben werden.

Zur Ermittlung der zukunftsrelevanten Spannaufgaben werden zunächst zurückliegende Spannaufgaben mit ähnlichen Anforderungen an die Spanngeometrie gesucht. Dies erfolgt über ein auf der Clusteranalyse basierendes hierarchisches *Gruppierungsverfahren*. Diese ähnlichen Spannaufgaben bilden die Grundlage für eine fokussierte *Prognose zukunftsrelevanter Spannaufgaben*, die zusammen mit der aktuellen Spannaufgabe die Informationsbasis für eine starre, rollierende Vorrichtungspannung darstellen.

Die effiziente Auswahl wirtschaftlich sinnvoller Vorrichtungsalternativen für die aktuelle und die zukunftsrelevanten Spannaufgaben wird durch ein vierstufiges *Vorgehen zur Bestimmung der Vorrichtungsalternativen* unterstützt. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist ein Aktionsbaum, der das Entscheidungsfeld des Vorrichtungsplaners anschaulich darstellt. Durch ein *Kostenmodell* kann der Vorrichtungsplaner schließlich die monetären Konsequenzen der verschiedenen Vorrichtungen abschätzen und die beste Alternative identifizieren. Falls diese aus der Beschaffung einer neuen Vorrichtung besteht, können die funktionalen Anforderungen an diese Vorrichtung aus dem Datensatz der aktuellen Spannaufgabe und ggf. aus den Datensätzen der prognostizierten Spannaufgaben abgeleitet werden.

Das bevorzugte *Einsatzgebiet* dieser Methodik in der Lohnfertigung ist charakterisiert durch ein Produktionsprogramm mit vielen heterogenen Fertigungsaufträgen, die weder langfristig noch sicher planbar sind, und komplexen Anforderungen an Spannvorrichtungen, die nur durch verschiedene Vorrichtungen erfüllt werden können. Das vorgestellte Planungsvorgehen sollte ab der frühen Aufbauphase eines Vorrichtungssystems angewendet werden. Es kann aber auch zur

---

Optimierung bestehender Vorrichtungssysteme genutzt werden, wenn diese einen hohen Anteil an Spezialvorrichtungen oder Baukastensystemen aufweisen.

Die Methodik ermöglicht unter diesen Bedingungen eine systematische Vorrichtungsplanung für die Spannaufgaben eines aktuellen Fertigungsauftrags unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Synergiepotentials zukünftiger Spannaufgaben. Ihr *Nutzen* besteht aus einem höheren Wiederverwendungsgrad bzw. einer besseren Anpassungsfähigkeit des Vorrichtungssystems und einem wirtschaftlich optimierten Einsatz verschiedener Vorrichtungsarten, der sich in reduzierten Beschaffungs-, Einsatz- und Fertigungsablaufkosten auswirkt. Das allgemeingültig entwickelte Planungsvorgehen erfordert bei seiner Einführung einen hohen *Anpassungsaufwand* an die betrieblichen Bedingungen, kann aber im Vergleich zur konventionellen, auftragsspezifischen Vorrichtungsplanung mit einem geringen *Zusatzaufwand* und ohne fachfremdes Wissen verfolgt werden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich Ansatzpunkte für *weitere Forschungstätigkeiten*. Eine höhere Automatisierung und Systematisierung der Methodik ist durch die Integration von Verfahren zur rechnergestützten Arbeitsplanung und Vorrichtungskonstruktion möglich (vgl. Abschnitt 2.3.3, S. 19, und Abschnitt 2.3.6, S. 24). Durch die Anwendung dieser Verfahren für die Identifizierung des idealen Spannplans zu Beginn der Vorrichtungsplanung würde der Vorrichtungsplaner bei der Vorrichtungskonzeption und bei der Datensatzerzeugung für die aktuelle Spannaufgabe und ggf. für prognostizierte Spannaufgaben entlastet werden. Außerdem könnte der Wiederverwendungsgrad des Vorrichtungssystems weiter gesteigert werden, da die Festlegung der geometrischen Anforderungen standardisierter erfolgen und zu ähnlicheren Spannplänen führen würde. Der wesentliche Forschungsbedarf hierfür besteht in der Ausweitung der Wissensrepräsentation dieser Verfahren, damit diese auf ein breites Spektrum an Fertigungsverfahren und Werkstückgeometrien anwendbar sind und die Fertigungsaufträge eines Lohnfertigers möglichst komplett abdecken können.

Eine solche Ausweitung des Anwendungsfelds von Arbeitsplanungs- und Vorrichtungskonstruktionssystemen würde es darüber hinaus ermöglichen, Kernelemente der Methodik auf die Analyse eines kompletten Produktionsprogramms zu übertragen, um in einem Schritt die optimale Struktur des gesamten Vorrichtungssystems zu ermitteln. Hierfür müsste das gesamte Auftragspektrum durch Spannmodelle abgebildet und mittels Gruppierungsverfahren analysiert werden. Neben der weitgehenden Automatisierung der Datenerzeugung für das gesamte Auftragspektrum durch Arbeitsplanungs- und Vorrichtungskonstruktionssysteme besteht der Forschungsbedarf in der Anpassung des Datenmodells und des Gruppierungsverfahrens, damit aus der Ähnlichkeitsstruktur aller Spannaufgaben

die einzelnen Vorrichtungen sowie deren Ausführungsart und funktionale Anforderungen abgeleitet werden können.

Ein Ansatz zur Erweiterung der Methodik liegt in der rechnerunterstützten Konstruktion einer neuen Vorrichtung auf Basis des Planungsergebnisses. Das Planungsergebnis besteht aus den kumulierten Anforderungen der aktuellen Spannaufgabe und ggf. prognostizierter Spannaufgaben an die zu entwickelnde Vorrichtung. Durch ein Vorrichtungskonstruktionssystem könnte ein für alle Spannaufgaben geeigneter Spannplan aus Bestimm- und Spannungspunkten ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2.3.6, S. 24). Um auf diese Weise die Konzeption einer Baukasten-, Spezial- oder flexiblen Vorrichtungen zu automatisieren, ist eine Ausweitung des Informationsmodells zur Beschreibung der Spannaufgaben erforderlich (vgl. Abschnitt 4.6, S. 74), und es sind geeignete Optimierungs- und Analysemethoden zu entwickeln, mit denen die Spannpläne ermittelt und bewertet werden.

---

## 8 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. In: Annals of CIRP 55 (2006) 1, S. 433–436.

ABONYI & FEIL 2007

Abonyi, J.; Feil, B.: Cluster Analysis for Data Mining and System Identification. Basel: Birkhäuser 2007. ISBN: 978-3-7643-7987-2.

ALICKE 2003

Alicke, K.: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-540-44370-3.

AMARAL ET AL. 2005

Amaral, N.; Rencis, J. J.; Rong, Y.: Development of a finite element analysis tool for fixture design integrity verification and optimisation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25 (2005) 5-6, S. 409–419.

AMF 2009

Andreas Maier GmbH (Hrsg.): Vakuumschanntechnik.  
<http://www.amf.de/de/downloads/current-catalogues>. 22.04.2012.

ANDERL & TRIPPNER 2000

Anderl, R.; Trippner, D.: STEP, Standard for the Exchange of Product Model Data. Stuttgart: Teubner 2000. ISBN: 3-519-06377-8.

ANDERSON 2008

Anderson, D. M.: Build-to-order & mass customization. Cambria, Calif.: CIM Press 2008. ISBN: 1-878072-30-7.

AOYAMA & KAKINUMA 2005

Aoyama, H.; Kakinuma, Y.: Development of Fixture Devices for Thin and Compliant Workpieces. Annals of the CIRP 54 (2005) 1, S. 325–328.

AUCH 1989

Auch, M.: Fertigungsstrukturierung auf der Basis von Teilefamilien. Diss. Universität Stuttgart. Berlin: Springer 1989. ISBN: 3-540-51290-X. (IPA-IAO Forschung und Praxis 135).

BACKHAUS ET AL. 2006

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. 11. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-27870-2.

BÄRTLE ET AL. 2009

Bärtle, J.; Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.; Reiter, A.; Böhm, S.; Tanasie, G.; Löwer, T.; Friedberger, A.; Fricke, S.; Müller, G.: Entwicklung eines elektronenstrahlbasierten Mikro-Produktions-Zentrums. Planegg: pro beam AG & Co. KGaA 2009.

BANSAL ET AL. 2008

Bansal, S.; Nagarajan, S.; Reddy, N. V.: An integrated fixture planning system for minimum tolerances. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 5-6, S. 501–513.

BARDELEBEN 1972

Bardeleben, W. von: Systematische Betriebsmittelplanung, Methodik und Hilfsmittel, gezeigt am Beispiel der Vorrichtungskonstruktion. Diss. RWTH Aachen 1972.

BERGS 1981

Bergs, S.: Optimalität bei Cluster-Analysen. Diss. Universität Münster 1981.

BERNDT 1996

Berndt, R.: Marketing 1. 3 Aufl. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-60812-5.

BI & ZHANG 2001

Bi, Z. M.; Zhang, W. J.: Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research* 39 (2001) 13, S. 2867–2894.

BURBIDGE 1971

Burbidge, J.-L.: Production flow analysis. *The Production Engineer* 50 (1971) 4, S. 139–152.

CAMPBELL 1994

Campbell, P. D.: Basic fixture design. New York, N.Y: Industrial Press 1994. ISBN: 0-8311-3052-0.

CECIL 2001

Cecil, J.: Computer-Aided Fixture Design - A Review and Future Trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18 (2001) 11, S. 790–793.

CHAN & LIN 1996

Chan, K. C.; Lin, C. S.: Development of a computer numerical control (CNC) modular fixture-machine design of a standard multifinger module. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 11 (1996) 1, S. 18–26.

CHEN ET AL. 2007

Chen, G.-F.; Sun, Y.-Z.; Liu, W.-J.: Study on Integrated Fixture Design System. *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Hong Kong, 19.-22.08.2007*, S. 2362–2367.

CREMER 1992

Cremer, R.: Informationsmodellierung für die integrierte Arbeitsplanerstellung im Bereich der zerspanenden Fertigung. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1992. ISBN: 3-86111-267-1. (Berichte aus dem Werkzeugmaschinenlabor Bd. 2).

---

DAENZER 1989

Daenzer, W. F.: Systems engineering. Nachdr., 6. Aufl. Betriebswissenschaftliches Institut. Zürich: Verl. Industrielle Organisation 1989. ISBN: 3-85743-906-8.

DEUSE 1998

Deuse, J.: Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodelldaten. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1998. ISBN: 3-8265-4252-5. (Berichte aus der Produktionstechnik Band 24/98).

DIN 1978

Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Spannzeugnormen. Berlin: Beuth 1978. ISBN: 3-410-10927-7. (DIN-Taschenbuch 14).

DIN 4002-2

DIN 4002-2: Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch - Teil 2: Begriffe und konzeptionelles Informationsmodell. Berlin: Beuth 2007.

DIN 6300

DIN 6300: Vorrichtungen für die Fixierung der Lage von Werkstücken während formändernder Fertigungsverfahren - Benennungen und deren Abkürzungen. Berlin: Beuth 2009.

DIN 66001

DIN 66001: Informationsverarbeitung - Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: Beuth 1983.

DUDEN 2009

Dudenredaktion (Hrsg.): Duden 01. Die deutsche Rechtschreibung. 25. Aufl. Mannheim: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus 2009. ISBN 978-3-411-04015-5.

DUNG 1997

Dung, D. T.: Innovative Konfiguration einer gruppentechnologieorientierten Methodenbank zur Rationalisierung flexibler Fertigungen. Diss. Universität Magdeburg 1997.

EIGNER & FEIßT 2009

Eigner, M.; Faißt, K. G.: Forschungsfelder für die holistische Optimierung der Produktentstehung. ZWF 104 (2009) 3, S. 110–111.

ETSCHIEDT 1997

Etscheidt, K.: Automatisierte Montage modularer Spannvorrichtungen mit Industrierobotern. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1997. ISBN: 3-8265-2942-1. (Berichte aus der Produktionstechnik Band 20/97).

EVERITT 1995

Everitt, B. S.: Cluster analysis. 3. Aufl. London: Arnold 1995. ISBN: 0-340-584793.

### EVERSHEIM 1989a

Eversheim, W.: Arbeitsvorbereitung. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI Verlag 1989. ISBN: 3-18-400840-1. (Organisation in der Produktionstechnik 3).

### EVERSHEIM 1989b

Eversheim, W.: Fertigung und Montage. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI Verlag 1989. ISBN: 3-18-400841-X. (Organisation in der Produktionstechnik 4).

### EVERSHEIM & SCHUH 1996

Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte - Produktion und Management. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-59360-8.

### EVERSHEIM 1999

Eversheim, W.: Planung von Produktionssystemen – Analyse der Produktionsaufgabe. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin: Springer 1999. ISBN: 3-540-65453-4. (Produktion und Management 3).

### FAHRMEIR ET AL. 1996

Fahrmeir, L.; Hamerle, A.; Tutz, G. (Hrsg.): Multivariate statistische Verfahren. Berlin: de Gruyter 1996. ISBN: 3-11-013806-9.

### FLEISCHER ET AL. 2006

Fleischer, J.; Denkena, B.; Winfough, B.; Mori, M.: Workpiece and Tool Handling in Metal Cutting Machines. Annals of the CIRP 55 (2006) 2, S. 817–839.

### FREIST 1985

Freist, C.: Einsatzmöglichkeiten statistischer Verfahren in CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI Verlag 1985. ISBN: 3-18-149202-7. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 92).

### FU ET AL. 2003

Fu, M. W.; Ong, S. K.; Lu, W. F.; Lee, I. B.; Nee, A. Y.: An approach to identify design and manufacturing features from a data exchange part model. CAD 35 (2003) 11, S. 979–993.

### GÖTTKER 1990

Göttker, A.: Untersuchung rechnergestützter Verfahren zur Teilefamilienbildung. Diss. Universität Dortmund. Köln: Verl. TÜV Rheinland 1990. ISBN: 3-88585-850-9.

### GRABOWSKI ET AL. 1993

Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.: Integriertes Produktmodell. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth 1993. ISBN: 3-410-12920-0. (Entwicklungen zur Normung von CIM).

---

GRANOW 1984

Granow, R.: Strukturanalyse von Werkstückspektren. Planungshilfsmittel beim Aufbau flexibel ausgelegter Fertigungen. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag 1984. ISBN: 3-18-147402-9. (Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 2 Nr. 74).

GRIENITZ ET AL. 2009

Grienitz, V.; Schmidt, A.; Ley, S.: Zukunftsstudie zur Wettbewerbsfähigkeit der Automobilzulieferindustrie in Südwestfalen 2015. Paderborn: Westfalia Druck 2009. ISBN: 978-3-00-027409-1.

GRÜNIG & KÜHN 2006

Grünig, R.; Kühn, R.: Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-29582-8.

GULDI 2005

Guldi, A.: Unternehmensspezifisches Klassifikationssystem zur effizienten Datenverwaltung (mit Anwendungsszenarien aus der Praxis). Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe 2005. ISBN: 3-937300-25-2.

HAHN ET AL. 1970

Hahn, R.; Kunerth, W.; Roschmann, K.: Die Teileklassifizierung. Heidelberg: Industrie-Verlag Carlheinz Gehlen 1970. (Handbuch der Rationalisierung Nr. 21).

HAMEDI 2005

Hamedi, M.: Intelligent Fixture Design through a Hybrid System of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. Artificial Intelligence Review 23 (2005) 3, S. 295–311.

HAMELMANN 1996

Hamelmann, S.: Systementwicklung zur Automatisierung der Arbeitsplanung. Düsseldorf: VDI Verlag 1996. ISBN: 3-18-319520-8. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 195).

HANDL 2002

Handl, A.: Multivariate Analysemethoden. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-540-43386-4.

HARGROVE & KUSIAK 1994

Hargrove, S. K.; Kusiak, A.: Computer-aided fixture design: a review. International Journal of Production Research 32 (1994) 4, S. 733–753.

HAUSKNECHT 1989

Hausknecht, M.: Expertensystem zur Konfigurationsplanung Flexibler Fertigungsanlagen. Düsseldorf: VDI Verlag 1989. ISBN: 3-18-147802-4. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 178).

### HAZEN & WRIGHT 1997

Hazen, F. B.; Wright, P. K.: Workholding automation: innovations in analysis, design and planning. *Manufacturing Review* 3 (1997) 4, S. 224–236.

### HEIGL & RENNHAKE 2008

Heigl, K. M.; Rennhak, C.: Zukünftige Wettbewerbsstrategien für Automobilzulieferer. Stuttgart: ibidem 2008. ISBN: 978-389821-902-0.

### HEIMBROCK 2001

Heimbrock, K. J.: Kompetenzpartnermanagement. Beschaffung in dynamischen Märkten. Wiesbaden: Gabler 2001. ISBN: 3-409-11733-4.

### HENNING & KUTSCHA 1994

Henning, K.; Kutscha, S.: Informatik im Maschinenbau. 4. Aufl. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3-540-57508-1.

### HESSELMANN 1988

Hesselmann, U.: Werkstückanalyse auf der Basis multivariater statistischer Verfahren. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag 1988. ISBN: 3-18-145702-7. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 157).

### HOFBAUER ET AL. 2009

Hofbauer, G.; Mashhour, T.; Fischer, M.: Lieferantenmanagement. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 978-3-486-58888-0.

### HOFFMAN 1987

Hoffman, E. G.: Modular Fixturing. Lake Geneva, Wis.: Manufacturing Technology Press 1987. ISBN: 0-932819-00-1.

### HOFFMAN 2004

Hoffman, E. G.: Jig and fixture design. 5. Aufl. Clifton Park NY: Thomson/Delmar Learning 2004. ISBN: 1-4018-1107-8.

### HORST WITTE 2010

Horst Witte Gerätebau Barskamp KG: CAD-Konstruktion, Alufix-Experte. <http://www.horst-witte.de/de/produkte/service/cad-konstruktionen.php>. 04.02.2010.

### HORST WITTE 2012

Horst Witte Gerätebau Barskamp KG: E-Katalog. <http://www.horst-witte.de/>. 22.04.2012.

### HUNTER ET AL. 2006

Hunter, R.; Rios, J.; Perez, J. M.; Vizan, A.: A functional approach for the formalization of the fixture design process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006) 3, S. 683–697.

### HÜTTNER 1986

Hüttner, M.: Prognoseverfahren und ihre Anwendung. Berlin: de Gruyter 1986. ISBN: 3-11-010826-7.

---

ISO 10303-11

ISO 10303-11: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 11: Description Methods: The EXPRESS Language Reference Manual. 1994.

JEBARAJ & SINGH 2005

Jebaraj, C.; Singh, D.: Feature-based design for process planning of machining processes with optimization using genetic algorithms. *International Journal of Production Research* 43 (2005) 18, S. 3855–3887.

JIANG ET AL. 1988

Jiang, W.; Wang, Z.; Cai, Y.: Computer-Aided Group Fixture Design. *Annals of the CIRP* 37 (1988) 1, S. 145–148.

JONSSON ET AL. 2008

Jonsson, M.; Kihlman, H.; Ossbahr, G.: Coordinate Controlled Fixturing for Affordable Reconfigurable Tooling. *Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems 2008*, S. 356–366.

KANG & PENG 2008

Kang, X.; Peng, Q.: Fixture Feasibility: Methods and Techniques for Fixture Planning. *Computer-Aided Design & Applications* 5 (2008) 1-4, S. 424–433.

KANG ET AL. 2003

Kang, Y.; Rong, Y.; Yang, J. C.: Computer-Aided Fixture Design Verification. Part 1. The Framework and Modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21 (2003) 10-11, S. 827–835.

KARPATHI & SURESH 1992

Karpathi, S.; Suresh, N. C.: Machine-component cell formation in group technology: a neural network approach. *International Journal of Production Research* 30 (1992) 6, S. 1353–1367.

KAYA 2006

Kaya, N.: Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms. *Computers in Industry* 57 (2006) 2, S. 112–120.

KEDZIERSKI 1968

Kedzierski, H.: Die Zuordnung von Drehwerkzeugen zu Drehteilgeometrie unter besonderer Berücksichtigung der Fertigung auf numerisch gesteuerten Drehmaschinen. Diss. TU Berlin 1968.

KIENER ET AL. 2006

Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M.: *Produktions-Management*. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 3-486-58059-0.

KLEIN & SCHOLL 2004

Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung*. München: Vahlen 2004. ISBN: 3-8006-3060-5.

### KLUBMANN 2009

Klußmann, J. H.: Einsatzpotentiale de Mobile Computing in der Produktionslogistik von Auftragsfertigern. Garbsen: PZH 2009. ISBN: 978-3-941416-15-4.

### KONG & CEGLAREK 2006

Kong, Z.; Ceglarek, D.: Fixture Workspace Synthesis for Reconfigurable Assembly Using Procrustes-Based Pairwise Configuration Optimization. *Journal of Manufacturing Systems* 25 (2006) 1, S. 25–38.

### KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 48 (1999) 2, S. 527–539.

### KRATZER 1993

Kratzer, K. P.: Neuronale Netze. 2. Aufl. München: Hanser 1993. ISBN: 3-446-17315-3.

### KRÖNERT 1997

Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichteilsuche und Standardisierung. Diss. TU München. Berlin: Springer 1997. ISBN: 3-540-63338-3. (Forschungsberichte *iwb* 108).

### KÜNZEL 1995

Künzel, R.: Strukturierung von großen Werkstückspektren mit Verfahren der klassifikatorischen und unscharfen Datenanalyse. Diss. Ruhr Universität Bochum. Aachen: Shaker 1995. ISBN: 3-8265-1343-6. (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme Band 4/95).

### LANDERS ET AL. 2006

Landers, R. G.; Ruan, J.; Liou, F.: Reconfigurable Manufacturing Equipment. In: Dashchenko, A. I. et al. (Hrsg.): *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 3-540-29391-4.

### LAUX 2007

Laux, H.: *Entscheidungstheorie*. 7. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-71161-2.

### LAY ET AL. 2009

Lay, G.; Kinkel, S.; Jäger, A.: Stellhebel für mehr Produktivität. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Hrsg.). Karlsruhe: 2009. (PI-Mitteilung Nr. 48).

### LI ET AL. 2006

Li, K.; Liu, R.; Bai, G.; Zhang, P.: Development of an intelligent jig and fixture design system. In: IEEE (Hrsg.): *7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design*, Hangzhou, China, 17.-19.11.2006, S. 1–5.

---

LIAO & LEE 1994

Liao, T. W.; Lee, K. S.: Integration of a feature-based CAD system and an ART1 neural model for GT coding and part family forming. *Computers & Industrial Engineering* 26 (1994) 1, S. 93–104.

LIU 1994

Liu, C.: A Systematic Conceptual Design of Modular Fixtures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9 (1994) 4, S. 217–224.

LOCK 1984

Lock, F.: Konzeption und Entwicklung von Vorrichtungssystemen für die spanende Fertigung. Diss. RWTH Aachen 1984.

LORENZ 2006

Lorenz, U.: Sicher und rationell fixieren - Produktivität erfordert optimale Spannmittel. *WB o. Jhg.* (2006) 1-2, S. 54–57.

LÜHRSEN 1996

Lührsen, H.: Die Entwicklung von Datenbanken für das Produktmodell der ISO-Norm STEP. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg 1996.

LÜTJENS 2008

Lütjens, P.: Große Vorteile durch Kombinationsbearbeitung. *WB o. Jhg.* (2008) 9, S. 114–115.

LUGGEN 1991

Luggen, W. W.: *Flexible manufacturing cells and systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall 1991. ISBN: 0-13-321738-8.

LUSZEK 1990

Luszek, G.: Entwicklung einer Systematik zur Schweißablaufplanung als Teil der Off-line-Programmierung von Bahnschweißrobotern. Diss. RWTH Aachen 1990.

MARFELS & SCHNEIDER 1989

Marfels, W.; Schneider, A.: *Vorrichtungen in der Schweißtechnik: Maßnahmen zur Rationalisierung der Fertigung*. Düsseldorf: DVS-Verlag 1989. ISBN: 3-87155-089-2. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 78).

MARTIN 1989

Martin, J.: *Gruppentechnologische Fertigungsstrukturen*. Diss. Universität Dortmund. Köln: Verl. TÜV Rheinland 1989. ISBN: 3-88585-665-4.

MATRIX 2010

MATRIX GmbH Stuttgart.: <http://www.matrix-innovations.com>. 16.10.2010.

MATTMÜLLER 1992

Mattmüller, R.: *Marketing-Prognosen für den Handel*. 2., überarb. Aufl. Augsburg: FGM-Verlag 1992. ISBN: 3-921953-28-6.

MAURI ET AL. 1986

Mauri, H.; Jung, A.; Schimitzek, G.: *Vorrichtungen I*. 11. Aufl. Berlin: Springer 1986. ISBN: 3-540-15831-6. (Fertigung und Betrieb Band 8).

MERVYN ET AL. 2005

Mervyn, F.; Senthil Kumar, A.; Nee, A. Y.: Automated synthesis of modular fixture designs using an evolutionary search algorithm. *International Journal of Production Research* 43 (2005) 23, S. 5047–5070.

MICHEL 1990

Michel, W.: *Aspekte zum Einsatz automatischer Spannvorrichtungen in der flexibel automatisierten Fertigung*. Diss. Universität Dortmund 1990.

MITROFANOW 1960

Mitrofanow, S. P.: *Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie*. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1960.

MORIWAKI 2008

Moriwaki, T.: Multi-functional machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 2, S. 736–749.

MÜCKE 2005

Mücke, K.: Für wechselnde Aufträge bestens gerüstet. *WB o. Jhg.* (2005) 9, S. 106–109.

MUTHSAM 2001

Muthsam, H.: *Planung von Aufspannungsinhalten bei der Arbeitsplanerstellung durch optionserhaltende Entscheidungssystematik*. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2001. ISBN: 3-931388-58-1. (IPA-IAO Forschung und Praxis 333).

NACHTWEY ET AL. 2007

Nachtwey, A.; Behrendt, A.; Riedel, R.: Beherrschung der Variantenvielfalt mittels der Clusteranalyse. *ZWF* 102 (2007) 7-8, S. 446–450.

NEE ET AL. 1992

Nee, A. Y.; Senthil Kumar, A.; Prombanpong, S.; Puah, K. Y.: A Feature-Based Classification Scheme for Fixtures. *Annals of the CIRP* 41 (1992) 1, S. 189–192.

NEE ET AL. 1995

Nee, A. Y.; Whybrew, K.; Senthil Kumar, A.: *Advanced fixture design for FMS*. London: Springer 1995. ISBN: 3-540-19908-X. (Advanced manufacturing series).

NEITZEL 1990

Neitzel, R.: *Entwicklung wissensbasierter Systeme für die Vorrichtungskonstruktion*. Braunschweig: Vieweg 1990. ISBN: 3-528-06384-X. (Fortschritte der CAD-Technik 2).

---

OHL 2000

Ohl, S.: Prognose und Planung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie. Düsseldorf: VDI Verlag 2000. ISBN: 3-18-312016-X. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 120).

OPITZ 1968

Opitz, H.: Verschlüsselungsrichtlinien und Definitionen zum werkstückbeschreibenden Klassifizierungssystem. Essen: Girardet 1968.

PEHLIVAN & SUMMERS 2008

Pehlivan, S.; Summers, J. D.: A review of computer-aided fixture design with respect to information support requirements. *International Journal of Production Research* 46 (2008) 4, S. 929–947.

PEPELS 1995

Pepels, W.: Marketingforschung und Absatzprognose. Wiesbaden: Gabler 1995. ISBN: 3-409-13514-6.

PRABHAHARAN ET AL. 2007

Prabhakaran, G.; Padmanaban, K. P.; Krishnakumar, R.: Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (2007) 11-12, S. 1090–1103.

QIN ET AL. 2006

Qin, G. H.; Zhang, W. H.; Wan, M.: A mathematical approach to analysis and optimal design of a fixture locating scheme. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29 (2006) 2-4, S. 349–359.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Franzkowiak, M.; Reiter, A.; Böhm, S.; Tanasie, G.; Löwer, T.; Bärtele, J.; Fricke, S.; Müller, G.; Friedberger, A.: Elektronenstrahlbasierte Fertigung von Mikroprodukten. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 11/12, S. 868–872.

REINHART & ABELE 2011

Reinhart, G.; Abele E.: *Zukunft der Produktion*. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

SCHENCK & WILSON 1994

Schenck, D. A.; Wilson, P. R.: *Information modeling*. New York: Oxford Univ. Press 1994. ISBN: 978-0195087147.

SCHERRER & LAU 2009

Scherrer, A.; Lau, M.: Produktivitätsfaktor Werkstück-Spanntechnik. *VDI-Z* 151 (2009) 9, S. 44–45.

SCHIEMENZ & SCHÖNERT 2005

Schiemenz, B.; Schönert, O.: *Entscheidung und Produktion*. 3., überarb. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3-486-57716-6.

SCHMIDT 2007

Schmidt, P.-G.: Projektorientierte ERP-Lösungen für die Lohnfertigung. PPS Management 12 (2007) 4, S. 51–54.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2008

Scholz-Reiter, B.; Lütjen, M.; Heger, J.: Integrated simulation method for investment decisions of micro production systems. Microsystem Technologies 14 (2008) 12, S. 2001–2005.

SCHUH ET AL. 2009

Schuh, G.; Kreysa, J.; Orilski, S.: Roadmap "Hybride Produktion". ZWF 104 (2009) 5, S. 385–391.

SCHULZ 1993

Schulz, C.: Ein Referenzmodell für die Entwicklung wissensbasierter Systeme zur Unterstützung der Arbeitsplanerstellung. Diss. Universität Kaiserslautern 1993.

SCHULTZ 2000

Schultz, H.: Elektronenstrahlschweißen. 2. Aufl. Düsseldorf: DVS-Verlag 2000. ISBN: 3-87155-192-9.

SCHURZ 2006

Schurz, G.: Einführung in die Wissenschaftstheorie. Darmstadt: WBG Wiss. Buchges. 2006. ISBN: 3-534-15462-2.

SIEBENALER & MELKOTE 2006

Siebenaler, S. P.; Melkote, S. N.: Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (2006) 1, S. 51–58.

SPÄTH & BINGEMER 1977

Späth, H.; Bingemer, F. (Hrsg.): Fallstudien Cluster-Analyse. München: Oldenbourg 1977. ISBN: 3-486-20771-7.

STAUD 2005

Staud, J. L.: Datenmodellierung und Datenbankentwurf. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-20577-2.

SUN & CHEN 1995

Sun, S. H.; Chen, J. L.: A Modular Design System Based on Case-Based Reasoning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 10 (1995) 6, S. 389–395.

TANG ET AL. 1999

Tang, X.; Zhang, X.; Tao, R.: Flexible Fixture Device with Magneto-Rheological Fluids. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 10 (1999) 9, S. 690–694.

---

TIAN ET AL. 2006

Tian, S.; Huang, Z.; Chen, L.; Wang, Q.: A feature-based approach for optimal workpiece localization and determination of feasible clamping regions. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 30 (2006) 1-2, S. 76–86.

TRAPPEY & LIU 1990

Trappey, J. C.; Liu, C. R.: A Literature Survey of Fixture-Design Automation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 5 (1990) 3, S. 240–255.

VDI 1992

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Vorrichtungen, Rationelle Planung und Konstruktion. Düsseldorf: VDI Verlag 1992. ISBN: 3-18-401175-5.

VDI 2012

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Studie Produktion und Logistik in Deutschland 2025. Düsseldorf: VDI Verlag 1992.

VDI 2218

VDI-Richtlinie 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Feature-Technologie. Berlin: Beuth 2003.

VDI 2221

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VDI 2222

VDI-Richtlinie 2222: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth 1997.

VDI 2860

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Berlin: Beuth 1990.

VDI 5610

VDI-Richtlinie 5610: Wissensmanagement im Ingenieurwesen, Blatt 1. Berlin: Beuth 2009.

VDA 4961

VDA-Empfehlung 4961/2: Kooperationsmodelle und SE-Checkliste zur Abstimmung der Datenlogistik in SE-Projekten. Verband der Automobilindustrie e. V. (Hrsg.): Frankfurt/M. 2001.

VOEGELE 1997

Voegele, Arno (Hrsg.): Das grosse Handbuch Konstruktions- und Entwicklungsmanagement. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie 1997. ISBN: 3-478-91690-9.

### VOSSEN 2008

Vossen, G.: Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbankmanagementsysteme. 5., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 978-3-486-27574-2.

### WARNECKE ET AL. 1996

Warnecke, H. J.; Bullinger, H. J.; Hichert, R.; Voegele, A.: Kostenrechnung für Ingenieure. 5. überarb. und erw. Aufl. München: Hanser 1996. ISBN: 3-446-18695-6.

### WEBER 1983

Weber, G.: Gestaltung eines integrierten Produktionssystems für die Sortenfertigung unter Einsatz der Clusteranalyse. Diss. Universität Stuttgart. Berlin: Springer 1983. ISBN: 3-540-12650-3.

### WEGENER ET AL. 2008

Wegener, K.; Weikert, S.; Lorenzer, T.: Jederzeit wandlungsfähig. Wie der Anwender mit rekonfigurierbaren Systemen gewinnt. WB o. Jhg. (2008) 12, S. 22–26.

### WEIßKOPF 2002

Weißkopf, J.: Automatische Produktdatenklassifikation in heterogenen Datenbeständen. Diss. Universität (TH) Karlsruhe 2002.

### WESTKÄMPER 2005

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer 2005. ISBN 3-540-26039-0.

### WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Produktion – Wandlungsfähigkeit in der industriellen Produktion. München: Transfer-Centrum 2006. ISBN 3-931511-88-X.

### WIENDAHL 1973

Wiendahl, H.-P.: Technische Struktur- und Investitionsplanung. Essen: Girardet 1973.

### WIENDAHL 2009

Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. ZWF 104 (2009) 1-2, S. 32–37.

### WILDEMANN 1996

Wildemann, H.: Entwicklungsstrategien für Zulieferunternehmen. München: Transfer-Centrum 1996. ISBN: 3-929918-05-6.

### WILDEMANN 2008

Wildemann, H.: Einkaufspotenzialanalyse: Programme zur partnerschaftlichen Erschließung von Rationalisierungspotenzialen. München: Transfer-Centrum 2008. ISBN: 978-3-937236-66-7.

---

WILDEMANN 2009

Wildemann, H.: Global Sourcing. Leitfaden zur Erschließung internationaler Beschaffungsquellen. 3. Aufl. München: Transfer-Centrum 2009. ISBN: 978-3-937236-44-5.

WILLY 1994

Willy, A.: Vorrichtungssysteme für die flexibel automatisierte Montage. Diss. Universität Stuttgart. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3-540-57784-X.

WILSON & HOLT 1962

Wilson, F. W.; Holt, J. M. (Hrsg.): Handbook of Fixture Design. New York: McGraw-Hill 1962.

WÖRN & BAUER 2006

Wörn, A.; Bauer, J.: Verwandlungskünstler. Trendbericht: Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen. WB o. Jhg. (2006) 9, S. 58–67.

WULFSBERG & LEHMANN 2003

Wulfsberg, J. P.; Lehmann, J.: Spanntechnik für die Mikrofertigung. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 3, S. 146–149.

YAO ET AL. 2007

Yao, S.; Han, X.; Yang, Y.; Rong, Y. K.; Huang, S. H.; Yen, D. W.; Zhang, G.: Computer aided manufacturing planning for mass customization: part 2, automated setup planning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2007) 32, S. 205–217.

YOUNG & FATHIANATHAN 2009

Young, N.; Fathianathan, M.: Reconfigurable Manufacturing System Design for a Contract Manufacturer Using a Co-operative Co-evolutionary Multi-agent Approach. In: Wang, L; Nee, A.: Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing. London: Springer 2009, S. 117–136. ISBN: 978-1-84882-287-0

ZÄH & FRANZKOWIAK 2006

Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.: Flexible Handling System for an Electron Beam Based Micro Production Centre. In: Proceedings of the 6th euspen International Conference. Baden bei Wien: Copy & Druck 2006, S. 24–27.

ZAHN 1999

Zahn, G.: Wissensbasiertes Datenmodell zur Integration von Konstruktion, Arbeitsplanerstellung und Spannplanung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag 1999. ISBN: 3-18-329420-6. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 294).

ZAHN 2011

Zahn, E.: Strategisches Management globaler Produktionsnetzwerke. In: Kemper, H.-G.; Pedell, B.; Schäfer, H. (Hrsg.): Management vernetzter Produktionssysteme. München: Vahlen 2011. ISBN: 978-3-8006-4224-3.

### ZHANG 1993

Zhang, B.: Automatisierung komplexen Werkstückspannens auf frei verfahrbaren Systempaletten. Diss. Universität Dortmund. Düsseldorf: VDI Verlag 1993. ISBN: 3-18-140102-1. (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 301).

### ZHANG & PENG 2005

Zhang, Y.; Peng, G.: Development of an integrated system for setup planning and fixture design in CAPP. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME, Monterey, California, USA, 24.-28.07.2005, S. 1401–1406.

### ZHENG & CHEW 2010

Zheng, Y.; Chew, C.-M.: A geometric approach to automated fixture layout design. *Computer-Aided Design* 43 (2010) 3, S. 202-212.

### ZHUANG & GOLDBERG 1997

Zhuang, Y.; Goldberg, K.: Design rules for tolerance-insensitive and multi-purpose fixtures. In: IEEE (Hrsg.): ICAR '97. Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics, Monterey, California, USA, 07.-09.07.1997, S. 681–686.

### ZIMMERMANN 1967

Zimmermann, D.: Eine allgemeine Formenordnung für Werkstücke. Gestaltung, Handhabung und Rationalisierungserfolg. Stuttgart: Technischer Verlag Grossmann 1967.

## 9 Anhang

### 9.1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zur Planung und Konstruktion von Vorrichtungen für eine in der Lohnfertigung eingesetzte Produktionsanlage untersucht, deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

#### GRATZ 2006

Gratz, Ferdinand: Entwicklung eines flexiblen Werkstückträgers und Einspannsystems für ein elektronenstrahlbasiertes Mikroproduktionszentrum (Nr. 2005/21). Bearbeitungszeitraum: 01.09.2005 – 01.03.2006.

#### KLIMA 2006

Klima, Martin: Konzeptionelle Entwicklung eines Systems aus Magazinierung, Zuführeinheit und Schleuse für Werkstückträger eines Mikroproduktionszentrums (Nr. 2006/29). Bearbeitungszeitraum: 01.03.2006 – 01.09.2006.

#### KRIEG 2007

Krieg, Florian: Konzeption einer Verfah- und Positioniereinheit für ein elektronenstrahlbasiertes Mikroproduktionszentrum (Nr. 2007/20). Bearbeitungszeitraum: 16.02.2007 – 16.08.2007.

#### SPINDLER 2007

Spindler, Erich: Methodik zur Entwicklung von Einspannsystemen für durchgängige Prozessketten in der Elektronenstrahl-Mikrofertigung (Nr. 2007/12). Bearbeitungszeitraum: 01.06.2007 – 01.12.2007.

#### SCHEININ 2008

Scheinin, Vadim: Entwicklung eines Datenmodells zur Beschreibung von Spannvorrichtungen (Nr. 2008/17). Bearbeitungszeitraum: 14.05.2008 – 14.10.2008.

## 9.2 EXPRESS-G

Die Datenstruktur des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Informationsmodells wird mithilfe der grafischen Notation EXPRESS-G dargestellt. Die dabei verwendeten Symbole werden in Abbildung 68 erklärt.

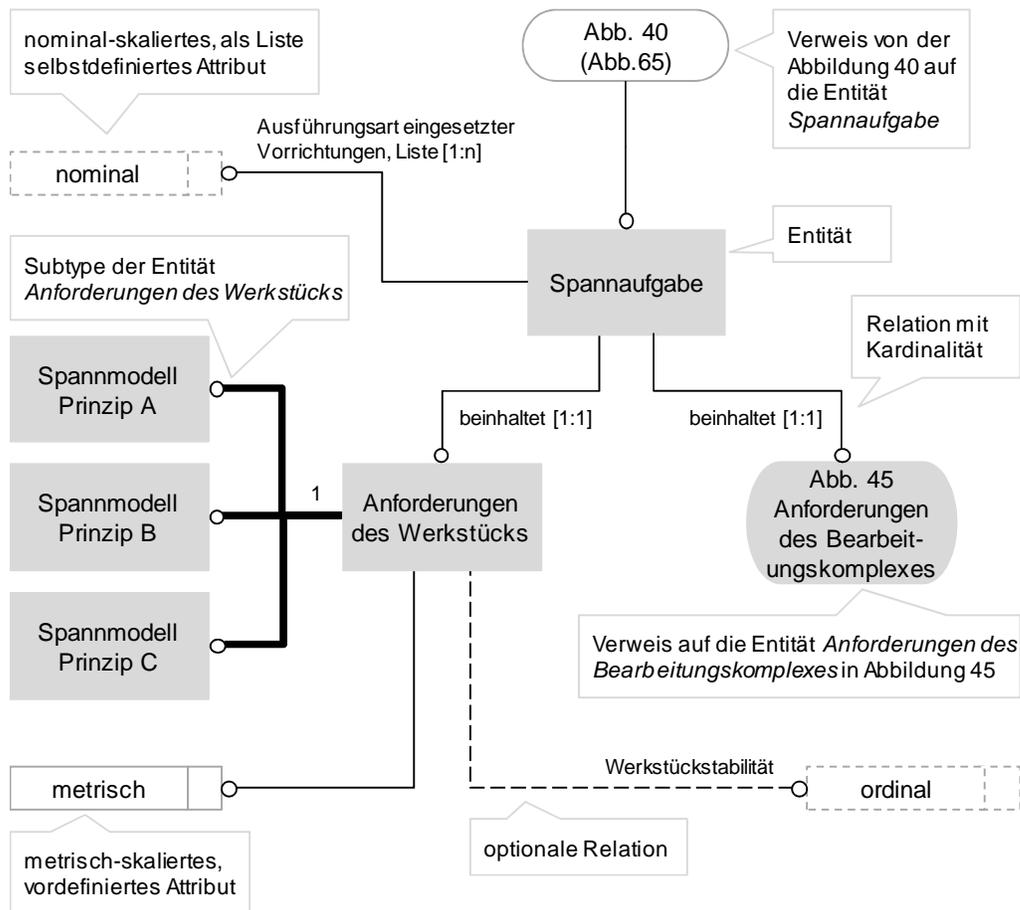


Abbildung 68: Darstellungselemente von EXPRESS-G, erklärt anhand eines Ausschnitts der Datenstruktur einer Spannaufgabe

Für eine weiterführende Erläuterung wird auf das *EXPRESS Language Reference Manual* der Normenreihe ISO 10303-11 und die spezifische Fachliteratur verwiesen, z. B. ANDERL & TRIPPNER (2000, S. 54 ff.) oder GRABOWSKI ET AL. (1993, S. 31 ff.).

## 9.3 Extraktion von Merkmalsausprägungen aus einer STEP-Datei

In diesem Abschnitt ist der mit dem System MATLAB programmierte Code zur Extraktion der geometrischen Merkmalsausprägungen aus einer STEP-Datei dokumentiert. Dieser Parser enthält im Wesentlichen folgende Funktionen:

1. Einlesen der STEP-Datei,
2. Konvertieren der Zeilen in das String-Format,
3. Sequentielles Durchsuchen der Zeilen nach den im CAD-System bezeichneten Geometrieelementen (hier: sechs Bestimm- und sechs Spannflächen mit den Bezeichnungen  $B_{z1}$ ,  $B_{z2}$ ,  $B_{z3}$ , etc.),
4. Identifizieren der Zeilenidentnummer für jedes Geometrieelement,
5. Berechnen der Zeilenidentnummern der gesuchten Merkmale des Geometrieelements (hier: Ortsvektor, Normalenvektor und Flächengröße der Bestimm- und Spannflächen) mithilfe der im STEP-Format verwendeten systematischen Darstellung der Geometrieelemente,
6. Auslesen der Merkmalsausprägungen und
7. Export der Merkmalsausprägungen in eine Microsoft-Excel-Datei.

MATLAB-Programmcode:

```
%Funktion: Ermittlung der metrischen Merkmalsdaten für das Spannmodell 3-2-1
aus einer STEP-Datei und Erzeugung einer Excel-Datei mit den Merkmalsdaten

%Eingabe der Import- und Exportdateien

STEP_datei = 'Part33a.stp';
Excel_datei = 'Spannmodell_Prisma.xlsx';

%Vektormodell der Bestimm- und Spannflächen

%Spalte 1-3 Ortsvektor,
%Spalte 4-6 Normalenvektor,
%Spalte 7 horizont. Breite (vertik. Fläche) bzw. x-Breite (horizont. Fläche),
%Spalte 8 vertikale Höhe (vertik. Fläche) bzw. y-Breite (horizont. Fläche)
Bz1 = zeros(1, 8);
Bz2 = zeros(1, 8);
Bz3 = zeros(1, 8);
By1 = zeros(1, 8);
By2 = zeros(1, 8);
Bx1 = zeros(1, 8);
Sz1 = zeros(1, 8);
Sz2 = zeros(1, 8);
Sz3 = zeros(1, 8);
Sy1 = zeros(1, 8);
Sy2 = zeros(1, 8);
Sx1 = zeros(1, 8);

%Zeilen-IDs für die Zusatzflächen: diese sind per default=0 für spätere Abfrage,
ob Zusatzflächen vorhanden sind.
zeilen_id_cell_By2 = {0};
zeilen_id_cell_Bz2 = {0};
zeilen_id_cell_Bz3 = {0};
zeilen_id_cell_Sy2 = {0};
zeilen_id_cell_Sz2 = {0};
zeilen_id_cell_Sz3 = {0};

%fid = file identifier
```

```

fid = fopen(STEP_datei, 'r');

%Identifizierung der Zeilenidentnummer für jede Fläche in der STEP-Datei

%while-Schleife, mit der alle Zeilen der eingeleseenen Datei durchlaufen werden
bis "feof == 1" das Ende anzeigt
while feof(fid) == 0;
    zeile = fgetl(fid); %Einlesen einer Zeile
    zeile_str = sscanf(zeile, '%s '); %Transformation der Zeile in string-
Format
    %Sequentielle Abfrage der Flächenbezeichnungen und
    %ggf. Identifizierung der Zielidentnummer
    if strfind(zeile_str, 'Bx1') >= 1;
        zeilen_id_cell_Bx1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'By1') >= 1;
        zeilen_id_cell_By1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'By2') >= 1;
        zeilen_id_cell_By2 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Bz1') >= 1;
        zeilen_id_cell_Bz1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Bz2') >= 1;
        zeilen_id_cell_Bz2 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Bz3') >= 1;
        zeilen_id_cell_Bz3 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sz1') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sz1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sz2') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sz2 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sz3') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sz3 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sy1') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sy1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sy2') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sy2 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;
    if strfind(zeile_str, 'Sx1') >= 1;
        zeilen_id_cell_Sx1 = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*25c %d %*s');
    end;

end;

%Einlesen der Merkmalsausprägungen und Schreiben in die Flächenvektoren

fid = fopen(STEP_datei, 'r');

while feof(fid) == 0;
    zeile = fgetl(fid);
    zeile_str = sscanf(zeile, '%s ');
    %Fläche Bx1
    %horizontale Breite bzw. x-Breite
    zeilen_id_horBreite = zeilen_id_cell_Bx1{1, 1} - 4;
    str_horBreite = strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
    if strfind(zeile_str, str_horBreite) == 1;
        Bfx1_horBreite_cell = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
    %*s');
        Bx1(1, 7) = Bfx1_horBreite_cell{1, 1};
    end;
    %vertikale Höhe bzw. y-Breite
    zeilen_id_vertHoehe = zeilen_id_cell_Bx1{1, 1} - 4;
    str_vertHoehe = strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
    if strfind(zeile_str, str_vertHoehe) == 1;
        Bfx1_vertHoehe_cell = textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
    %f32 %*s');
        Bx1(1, 8) = Bfx1_vertHoehe_cell{1, 1};
    end;
    %Normalenvektor

```

```

zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Bx1{1,1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Bfx1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Bx1(1,i+3)=Bfx1_nvek_cell{1,i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Bx1{1,1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
    Bfx1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Bx1(1,i)=Bfx1_ovek_cell{1,i};
    end;
end;

%Fläche By1
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_By1{1,1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
    Bfy1_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
    By1(1,7)=Bfy1_horBreite_cell{1,1};
end;
%vertikale Höhe bzw. y-Breite
zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_By1{1,1}-4;
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Bfy1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
    By1(1,8)=Bfy1_vertHoehe_cell{1,1};
end;
%Normalenvektor
zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_By1{1,1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Bfy1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        By1(1,i+3)=Bfy1_nvek_cell{1,i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_By1{1,1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
    Bfy1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        By1(1,i)=Bfy1_ovek_cell{1,i};
    end;
end;

%Fläche By2
if zeilen_id_cell_By2{1,1}==0;
    By2=By1;
else
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_By2{1,1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
    Bfy2_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
    By2(1,7)=Bfy2_horBreite_cell{1,1};
end;
%vertikale Höhe bzw. y-Breite
zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_By1{1,1}-4;
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Bfy1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');

```

```

        By1(1,8)=Bfy1_vertHoehe_cell{1,1};
    end;
    %Normalenvektor
    zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_By2{1,1}-7;
    str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
        Bfy2_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*32c %f32 %c %f32 %c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            By2(1,i+3)=Bfy2_nvek_cell{1,i};
        end;
    end;
    %Ortsvektor
    zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_By2{1,1}-8;
    str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
        Bfy2_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*37c %f32 %c %f32 %c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            By2(1,i)=Bfy2_ovek_cell{1,i};
        end;
    end;
    end;

    %Fläche Bz1
    %horizontale Breite bzw. x-Breite
    zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Bz1{1,1}-4;
    str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
    if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
        Bfz1_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*20c %d %c %f32
%*s');
        Bz1(1,7)=Bfz1_horBreite_cell{1,1};
    end;
    %vertikale Höhe bzw. y-Breite
    zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Bz1{1,1}-4;
    str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
    if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
        Bfz1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*20c %d %c %d %c
%f32 %*s');
        Bz1(1,8)=Bfz1_vertHoehe_cell{1,1};
    end;
    %Normalenvektor
    zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Bz1{1,1}-7;
    str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
        Bfz1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*32c %f32 %c %f32 %c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Bz1(1,i+3)=Bfz1_nvek_cell{1,i};
        end;
    end;
    %Ortsvektor
    zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Bz1{1,1}-8;
    str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
        Bfz1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*37c %f32 %c %f32 %c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Bz1(1,i)=Bfz1_ovek_cell{1,i};
        end;
    end;
    end;

    %Fläche Bz2
    if zeilen_id_cell_Bz2{1,1}==0;
        Bz2=Bz1;
    else
        %horizontale Breite bzw. x-Breite
        zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Bz2{1,1}-4;
        str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
        if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
            Bfz2_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%c %d %*20c %d %c %f32
%*s');
            Bz2(1,7)=Bfz2_horBreite_cell{1,1};
        end;
        %vertikale Höhe bzw. y-Breite
        zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Bz2{1,1}-4;
    end;

```

### 9.3 Extraktion von Merkmalsausprägungen aus einer STEP-Datei

```
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Bfz2_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
    Bz2(1, 8)=Bfz2_vertHoehe_cell{1, 1};
end;
%Normalenvektor
zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Bz2{1, 1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Bfz2_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Bz2(1, i+3)=Bfz2_nvek_cell{1, i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Bz2{1, 1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
    Bfz2_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Bz2(1, i)=Bfz2_ovek_cell{1, i};
    end;
end;
end;

%Fläche Bz3
if zeilen_id_cell_Bz3{1, 1}==0;
    Bz3=Bz1;
else
    %horizontale Breite bzw. x-Breite
    zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Bz3{1, 1}-4;
    str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
    if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
        Bfz3_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
        Bz3(1, 7)=Bfz3_horBreite_cell{1, 1};
    end;
    %vertikale Höhe bzw. y-Breite
    zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Bz3{1, 1}-4;
    str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
    if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
        Bfz3_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
        Bz3(1, 8)=Bfz3_vertHoehe_cell{1, 1};
    end;
    %Normalenvektor
    zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Bz3{1, 1}-7;
    str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
        Bfz3_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Bz3(1, i+3)=Bfz3_nvek_cell{1, i};
        end;
    end;
    %Ortsvektor
    zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Bz3{1, 1}-8;
    str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
        Bfz3_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Bz3(1, i)=Bfz3_ovek_cell{1, i};
        end;
    end;
end;
end;

%Fläche Sz1
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sz1{1, 1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
```

```

        Sfz1_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
        Sz1(1,7)=Sfz1_horBreite_cell{1,1};
        end;
        %vertikale Höhe bzw. y-Breite
        zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sz1{1,1}-4;
        str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
        if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
            Sfz1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
            Sz1(1,8)=Sfz1_vertHoehe_cell{1,1};
        end;
        %Normalenvektor
        zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sz1{1,1}-7;
        str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
        if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
            Sfz1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
            for i=1:3
                Sz1(1,i+3)=Sfz1_nvek_cell{1,i};
            end;
        end;
        %Ortsvektor
        zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sz1{1,1}-8;
        str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
        if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
            Sfz1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
            for i=1:3
                Sz1(1,i)=Sfz1_ovek_cell{1,i};
            end;
        end;

        %Fläche Sz2
        if zeilen_id_cell_Sz2{1,1}==0;
            Sz2=Sz1;
        else
            %horizontale Breite bzw. x-Breite
            zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sz2{1,1}-4;
            str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
            if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
                Sfz2_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
                Sz2(1,7)=Sfz2_horBreite_cell{1,1};
            end;
            %vertikale Höhe bzw. y-Breite
            zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sz2{1,1}-4;
            str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
            if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
                Sfz2_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
                Sz2(1,8)=Sfz2_vertHoehe_cell{1,1};
            end;
            %Normalenvektor
            zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sz2{1,1}-7;
            str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
            if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
                Sfz2_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
                for i=1:3
                    Sz2(1,i+3)=Sfz2_nvek_cell{1,i};
                end;
            end;
            %Ortsvektor
            zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sz2{1,1}-8;
            str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
            if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
                Sfz2_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
                for i=1:3
                    Sz2(1,i)=Sfz2_ovek_cell{1,i};
                end;
            end;
        end;

        %Fläche Sz3

```

```

if zeilen_id_cell_Sz3{1, 1}==0;
    Sz3=Sz1;
else
    %horizontale Breite bzw. x-Breite
    zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sz3{1, 1}-4;
    str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
    if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
        Sfz3_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
*s');
        Sz3(1, 7)=Sfz3_horBreite_cell{1, 1};
    end;
    %vertikale Höhe bzw. y-Breite
    zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sz3{1, 1}-4;
    str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
    if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
        Sfz3_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
        Sz3(1, 8)=Sfz3_vertHoehe_cell{1, 1};
    end;
    %Normalenvektor
    zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sz3{1, 1}-7;
    str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
        Sfz3_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Sz3(1, i+3)=Sfz3_nvek_cell{1, i};
        end;
    end;
    %Ortsvektor
    zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sz3{1, 1}-8;
    str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
    if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
        Sfz3_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Sz3(1, i)=Sfz3_ovek_cell{1, i};
        end;
    end;
end;
end;

%Fläche Sy1
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sy1{1, 1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
    Sfy1_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
*s');
    Sy1(1, 7)=Sfy1_horBreite_cell{1, 1};
end;
%vertikale Höhe bzw. y-Breite
zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sy1{1, 1}-4;
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Sfy1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
    Sy1(1, 8)=Sfy1_vertHoehe_cell{1, 1};
end;
%Normalenvektor
zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sy1{1, 1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Sfy1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Sy1(1, i+3)=Sfy1_nvek_cell{1, i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sy1{1, 1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
    Sfy1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Sy1(1, i)=Sfy1_ovek_cell{1, i};
    end;
end;
end;
end;

```

```

end;
end;

%Fläche Sy2
if zeilen_id_cell_Sy2{1,1}==0;
    Sy2=Sy1;
else
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sy2{1,1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
    Sfy2_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
    Sy2(1,7)=Sfy2_horBreite_cell{1,1};
end;
%vertikale Höhe bzw. y-Breite
zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sy2{1,1}-4;
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Sfy2_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
    Sy2(1,8)=Sfy2_vertHoehe_cell{1,1};
end;
%Normalenvektor
zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sy2{1,1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Sfy2_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Sy2(1,i+3)=Sfy2_nvek_cell{1,i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sy2{1,1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;
    Sfy2_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Sy2(1,i)=Sfy2_ovek_cell{1,i};
    end;
end;
end;

%Fläche Sx1
%horizontale Breite bzw. x-Breite
zeilen_id_horBreite=zeilen_id_cell_Sx1{1,1}-4;
str_horBreite=strcat('#', num2str(zeilen_id_horBreite), '=');
if strfind(zeile_str, str_horBreite)==1;
    Sfx1_horBreite_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %f32
%*s');
    Sx1(1,7)=Sfx1_horBreite_cell{1,1};
end;
%vertikale Höhe bzw. y-Breite
zeilen_id_vertHoehe=zeilen_id_cell_Sx1{1,1}-4;
str_vertHoehe=strcat('#', num2str(zeilen_id_vertHoehe), '=');
if strfind(zeile_str, str_vertHoehe)==1;
    Sfx1_vertHoehe_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*20c %*d %*c %*d %*c
%f32 %*s');
    Sx1(1,8)=Sfx1_vertHoehe_cell{1,1};
end;
%Normalenvektor
zeilen_id_nvek=zeilen_id_cell_Sx1{1,1}-7;
str_nvek=strcat('#', num2str(zeilen_id_nvek), '=');
if strfind(zeile_str, str_nvek)==1;
    Sfx1_nvek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*32c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
    for i=1:3
        Sx1(1,i+3)=Sfx1_nvek_cell{1,i};
    end;
end;
%Ortsvektor
zeilen_id_ovek=zeilen_id_cell_Sx1{1,1}-8;
str_ovek=strcat('#', num2str(zeilen_id_ovek), '=');
if strfind(zeile_str, str_ovek)==1;

```

```

        Sfx1_ovek_cell=textscan(zeile_str, '%*c %*d %*37c %f32 %*c %f32 %*c
%f32 %*s');
        for i=1:3
            Sx1(1,i)=Sfx1_ovek_cell{1,i};
        end;
    end;

end;

status = fclose(fid);

%Kopieren der Merkmalsausprägungen in eine lxm-Matrix

spanmerkmal=zeros(1,96);

spanmerkmal(1,1:8)=Bz1(1,:);
spanmerkmal(1,9:16)=Bz2(1,:);
spanmerkmal(1,17:24)=Bz3(1,:);
spanmerkmal(1,25:32)=By1(1,:);
spanmerkmal(1,33:40)=By2(1,:);
spanmerkmal(1,41:48)=Bx1(1,:);

spanmerkmal(1,49:56)=Sz1(1,:);
spanmerkmal(1,57:64)=Sz2(1,:);
spanmerkmal(1,65:72)=Sz3(1,:);
spanmerkmal(1,73:80)=Sy1(1,:);
spanmerkmal(1,81:88)=Sy2(1,:);
spanmerkmal(1,89:96)=Sx1(1,:);

%Export der Merkmalsausprägungen in eine Excel-Datei

%Auswahl der Datei erfolgt oben
%WICHTIG: Zeilennummer in Excel-Datei muss jeweils angepasst werden!
xlswrite(Excel_datei, spanmerkmal, 'B142:CS142')

```

## 9.4 Clusteranalyse zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben

In diesem Abschnitt ist der mit dem System MATLAB programmierte Code zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben mittels Clusteranalyse dokumentiert. Das Programm enthält im Wesentlichen folgende Funktionen:

1. Einlesen der Datensätze aller Spannaufgaben,
2. Aufbereitung der Datensätze,
3. Berechnung der Distanzmatrizen für verschiedene Distanzmaße,
4. Clusterbildung und Darstellung der Ähnlichkeitsstruktur für verschiedene Distanzmaße und Fusionierungsalgorithmen.

MATLAB-Programmcode:

```

%Einlesen der Datensätze aller Spannaufgaben

dataset_metrisch = dataset('xlsfile', 'Datensatz_Spannaufgaben_Basis.xlsx', ...
    'ReadObsNames', true, 'ReadVarNames', true);

%Auslesen der Datensätze
size_dataset_input=size(dataset_metrisch);
anzahl_merkmal_input=size_dataset_input(1,2);
anzahl_objekte_input=size_dataset_input(1,1);
Name_spannaufgaben_input=get(dataset_metrisch, 'ObsNames');

%Gewichtungsvektor einlesen
Gewichtungsvektor=xlswrite('Datensatz_Spannaufgaben_Basis.xlsx', ...
    'Gewichtungsfaktoren', 'A4:CR4');

```

```

% Aufbereitung der Datensätze

daten_input=double(datasets_metro(:, :));

%Löschung konstanter Merkmale
for i=anzahl_merkmale_input:-1:1
    Spaltenminimum=min(daten_input(:, i));
    Spaltenmaximum=max(daten_input(:, i));
    Kennzahl_konstante_Merkmale=Spaltenmaximum-Spaltenminimum;
    if Kennzahl_konstante_Merkmale==0
        datasets_metro(:, i)=[];
        Gewichtsvektor(:, i)=[];
        daten_input(:, i)=[];
    end;
end;

%Aktualisierung der Merkmalanzahl
size_datasets_konstantmerkmale=size(datasets_metro);
anzahl_merkmale=size_datasets_konstantmerkmale(1, 2);

%Gewichtung der Merkmale
daten_gew=daten_input;
for i=1:anzahl_merkmale
    for k=1:anzahl_objekte_input
        daten_gew(k, i)=Gewichtsvektor(1, i)*daten_input(k, i);
    end;
end;

%Umwandlung Matrix in Dataset
datasets_gew = replacedata(datasets_metro, daten_gew);

%Aktualisierung der Objektanzahl und -namen
size_datasets_final=size(datasets_gew);
anzahl_objekte=size_datasets_final(1, 1);
Name_spannaufgaben=get(datasets_gew, 'ObsNames');

daten_final=double(datasets_gew(:, :));

%Merkmalgewichtung reduzierter Datensatz
daten_final_gew=daten_final;
for i=1:anzahl_merkmale
    for k=1:anzahl_objekte
        daten_final_gew(k, i)=Gewichtsvektor(1, i)*daten_final(k, i);
    end;
end;

%Umwandlung Matrix in Dataset
datasets_final_gew = replacedata(datasets_gew, daten_final_gew);

%Berechnung der Distanzmatrizen für verschiedene Distanzmaße

Distanz_final_euclidean = pdist(datasets_final_gew, 'euclidean');
Distanzmatrix_final_euclidean = squareform(Distanz_final_euclidean);

Distanz_final_cityblock = pdist(datasets_final_gew, 'cityblock');
Distanzmatrix_final_cityblock = squareform(Distanz_final_cityblock);

%Clusterbildung und Darstellung der Ähnlichkeitsstruktur für verschiedene Di-
stanzmaße und Fusionsalgorithmen

%Dendrogramm mit City Block und Complete
Linkagematrix_final_Complete = linkage(Distanz_final_cityblock, 'complete');
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [1 scrsz(4)/17 scrsz(3)/1 scrsz(4)/1.15], ...
    'Name', 'Globale Hierarchie', 'Color', 'white');
subplot(3, 1, 1)
p=0;
H = dendrogram(Linkagematrix_final_Complete, p, 'labels', Name_spannaufgaben);
grid
set(H, 'LineWidth', 2.5, 'Color', 'black')
title('Complete-Linkage-Algorithmus')
ylabel('City-Block-Distanz');

%Dendrogramm mit City Block und Average
Linkagematrix_final_city_average = linkage(Distanz_final_cityblock, 'average');
subplot(3, 1, 2)

```

```

H = dendrogram(Linkagematrix_final_city_average, p, 'label s',
Name_spannaufgaben);
grid
set(H, 'LineWidth', 2.5, 'Color', 'black')
title('Average-Linkage-Algorithmus')
ylabel('City-Block-Distanz');

%Dendrogramm mit Euclidean und Ward
Linkagematrix_final_eucl_ward = linkage(Distanz_final_euclidean, 'weighted');
subplot(3, 1, 3)
H = dendrogram(Linkagematrix_final_eucl_ward, p, 'label s', Name_spannaufgaben);
grid
set(H, 'LineWidth', 2.5, 'Color', 'black')
title('Ward-Algorithmus')
ylabel('Euklidische Distanz');

```

## 9.5 Fusionierungsalgorithmen der Clusteranalyse

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren der hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse leiten sich aus einer allgemeinen Fusionierungsvorschrift ab (siehe Formel 5-4, S. 110):

$$D(R, P + Q) = A \cdot D(R, P) + B \cdot D(R, Q) + E \cdot D(P, Q) + G \cdot |D(R, P) - D(R, Q)|$$

mit

- $D(R, P)$  : Distanz zwischen den Clustern  $R$  und  $P$
- $D(R, Q)$  : Distanz zwischen den Clustern  $R$  und  $Q$
- $D(P, Q)$  : Distanz zwischen den Clustern  $P$  und  $Q$

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die einzelnen Verfahren. Durch die Wahl der Konstanten  $A$ ,  $B$ ,  $E$  und  $G$  ergibt sich jeweils der Fusionierungsalgorithmus, der die Distanz  $D(R; P+Q)$  zwischen einem neuen Cluster ( $P+Q$ ), bestehend aus den Objekten  $P$  und  $Q$ , und einem Objekt  $R$  ermittelt.

Verfahren	Konstante			Distanzberechnung	
	A	B	E		G
Single Linkage	0,5	0,5	0	-0,5	$0,5 \cdot (D(R, P) + D(R, Q) -  D(R, P) - D(R, Q) )$
Complete Linkage	0,5	0,5	0	0,5	$0,5 \cdot (D(R, P) + D(R, Q) +  D(R, P) - D(R, Q) )$
Average Linkage	0,5	0,5	0	0	$0,5 \cdot (D(R, P) + D(R, Q))$
Centroid	$\frac{NP}{NP + NQ}$	$\frac{NQ}{NP + NQ}$	$-\frac{NP \cdot NQ}{(NP + NQ)^2}$	0	$\frac{1}{NP + NQ} \{ NP \cdot D(R, P) + NQ \cdot D(R, Q) \} - \frac{NP \cdot NQ}{(NP + NQ)^2} \cdot D(P, Q)$
Median	0,5	0,5	-0,25	0	$0,5 \cdot (D(R, P) + D(R, Q)) - 0,25 \cdot D(P, Q)$
Ward	$\frac{NR + NP}{NR + NP + NQ}$	$\frac{NR + NP}{NR + NP + NQ}$	$-\frac{NR}{NR + NP + NQ}$	0	$\frac{1}{NR + NP + NQ} \{ (NR + NP) \cdot D(R, P) + (NR + NQ) \cdot D(R, Q) - NR \cdot D(P, Q) \}$

Mit: NR = Zahl der Objekte in Gruppe R, NP = Zahl der Objekte in Gruppe P, NQ = Zahl der Objekte in Gruppe Q

Tabelle 12: Distanzberechnung der in dieser Arbeit untersuchten Fusionierungsalgorithmen (BACKHAUS 2006, S. 517)

## 9.6 Untersuchtes Teilespektrum

Das im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der Clusteranalyse entwickelte Vorgehen zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben (vgl. Abschnitt 5.5, S. 104) wurde anhand eines theoretischen Teilespektrums validiert. Abbildung 69 zeigt die mit diesem Verfahren berechnete Ähnlichkeitsstruktur des Basisspektrums an Teilen.

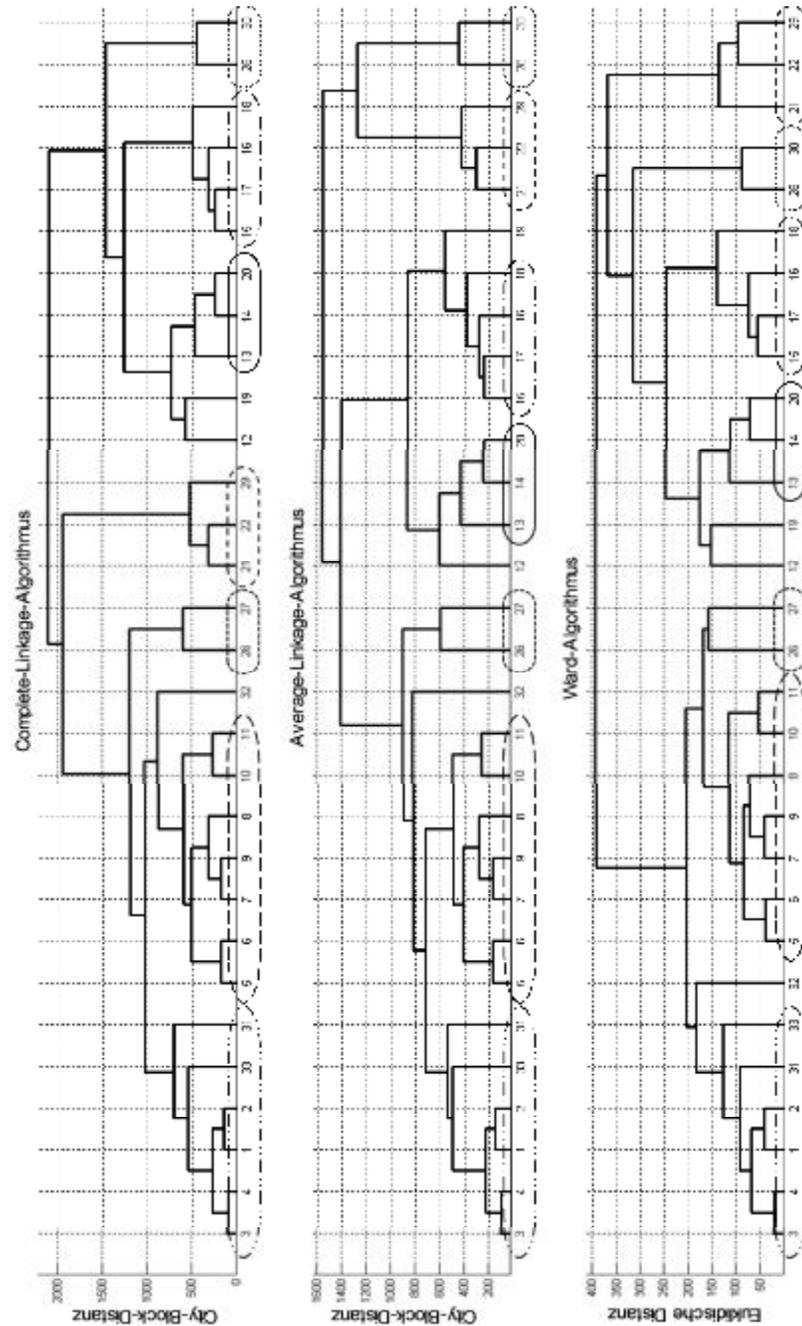
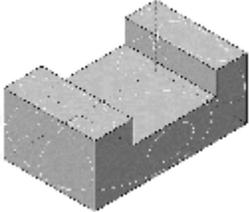
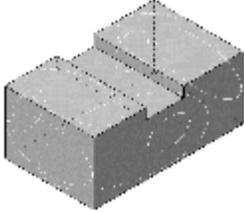
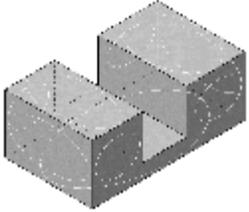
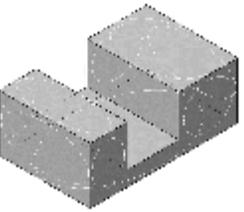
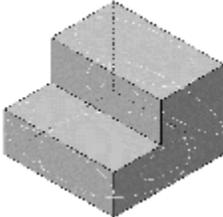
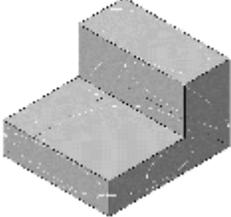
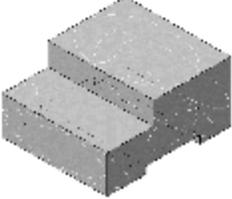
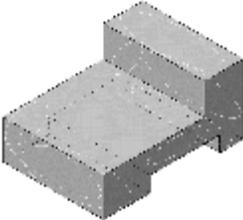
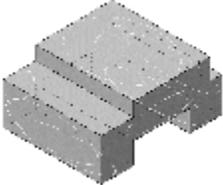
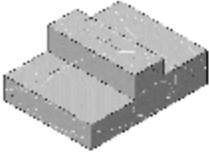
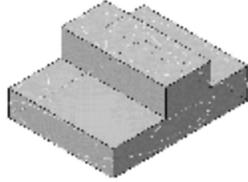
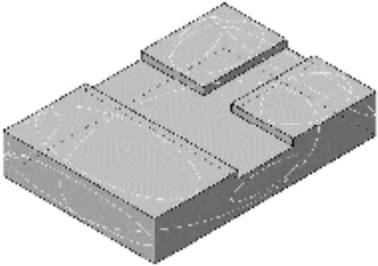
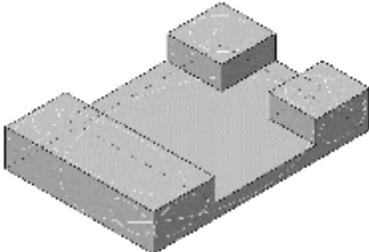
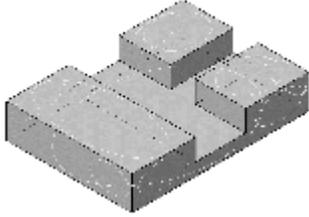
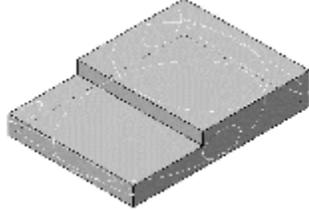
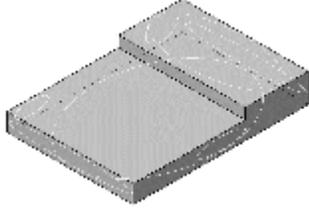
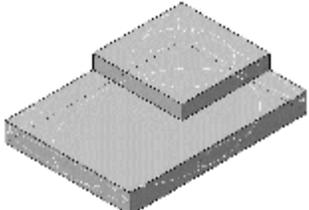
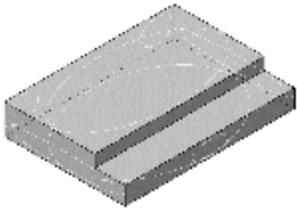
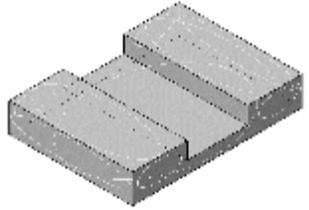
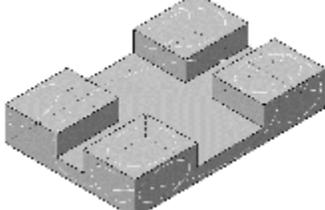
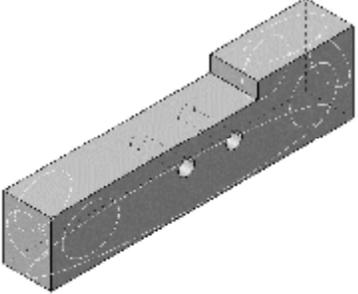
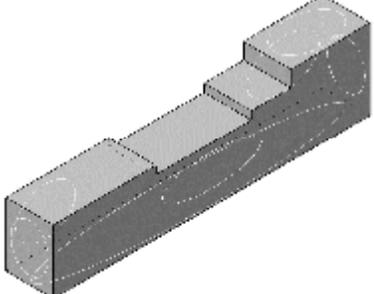
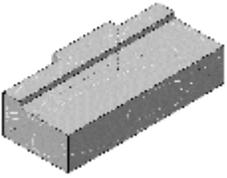
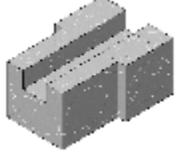
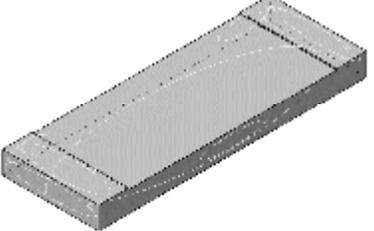
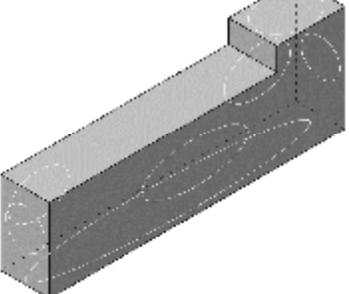
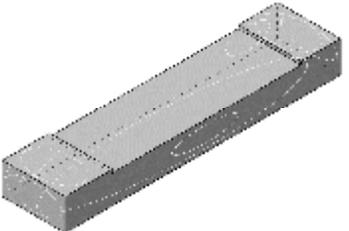
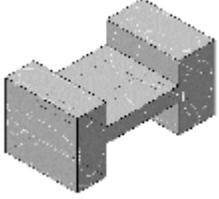
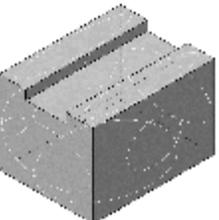
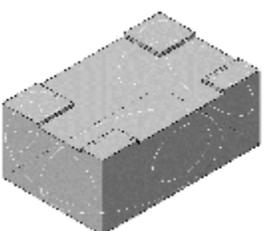


Abbildung 69: Ähnlichkeitsstruktur des Basisteilespektrums, ermittelt mit verschiedenen Distanzmaßen und Fusionierungsalgorithmen

In der nachstehenden Tabelle 13 sind die einzelnen Teile des Basisspektrums anhand ihrer CAD-Modelle und ihrer Spannpläne dargestellt. Die Spannpläne, bestehend aus den möglichen Bestimm- und Spannflächen, wurden nach dem Spannmodell zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke erstellt (vgl. Abschnitt 5.2.4.2, S. 97). Darüber hinaus wurden noch weitere Varianten dieser Teile erzeugt, um die Feinabstimmung des Gruppierungsverfahrens durchzuführen und insbesondere die Merkmalgewichtung zu validieren.

Teil 1 (Breite 100 x Tiefe 60 x Höhe 40) 	Teil 2 (100x60x42) 
Teil 3 (104x60x40) 	Teil 4 (100x62x38) 
Teil 5 (70x70x50) 	Teil 6 (80x70x50) 
Teil 7 (80x68x40) 	Teil 8 (90x65x45) 
Teil 9 (85x70x30) 	Teil 10 (80x60x30) 

<p>Teil 11 (90x70x35)</p> 	<p>Teil 12 (160x110x28)</p> 
<p>Teil 13 (160x110x27)</p> 	<p>Teil 14 (140x100x27)</p> 
<p>Teil 15 (140x100x25)</p> 	<p>Teil 16 (144x104x24)</p> 
<p>Teil 17 (138x98x26)</p> 	<p>Teil 18 (140x100x25)</p> 
<p>Teil 19 (140x102x24)</p> 	<p>Teil 20 (144x98x25)</p> 

<p>Teil 21 (Breite 190 x Tiefe 30 x Höhe 50)</p> 	<p>Teil 22 (200x30x50)</p> 
<p>Teil 26 (95x40x20)</p> 	<p>Teil 27 (65x45x30)</p> 
<p>Teil 28 (180x65x15)</p> 	<p>Teil 29 (195x32x70)</p> 
<p>Teil 30 (175x40x20)</p> 	<p>Teil 31 (95x50x45)</p> 
<p>Teil 32 (90x70x62)</p> 	<p>Teil 33 (110x70x45)</p> 

*Tabelle 13: Basisteilespektrum zur Validierung des entwickelten Verfahrens zur Ermittlung ähnlicher Spannaufgaben*

## 9.7 Analyseblatt für die Vorrichtungplanung

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Analyseblatt dient der strukturierten Ergebnisdokumentation bei der vierstufigen Bestimmung der Vorrichtungsalternativen (vgl. Abschnitt 5.7.2, S. 119). Die Verwendung des Analyseblatts wird in Abbildung 70 erläutert.

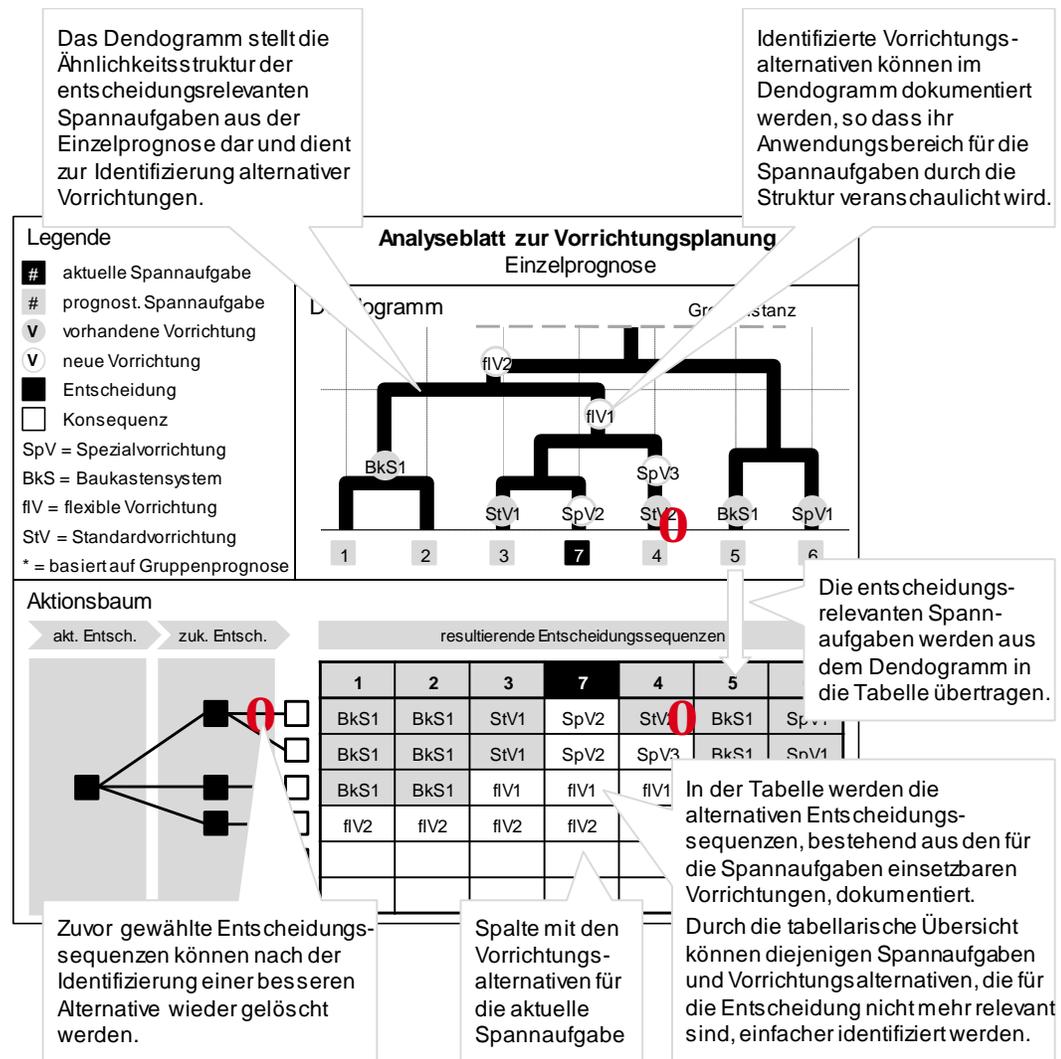


Abbildung 70: Erläuterungen zur Anwendung des Analyseblatts bei der Bestimmung der Vorrichtungsalternativen

## **9.8 Verzeichnis verwendeter Softwareprodukte**

*CATIA* ® *Version 5.20*

© Dassault Systèmes 1994-2009

*MATLAB* ® *R2012b*

© The MathWorks, Inc. 1984-2012

*Microsoft* ® *Office Excel* ® *2007*

© Microsoft Corporation