

**Ein Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben
zum Zwecke der Anordnungsplanung**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thomas Rist
aus Stuttgart

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h.
Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. D. Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juni 2008

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Thomas Rist

Ein Verfahren
zur Modellierung von
Produktionsbetrieben zum
Zwecke der
Anordnungsplanung

Nr. 476

Dr.-Ing. Thomas Rist

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-34-0, ISBN (13) 978-3-939890-34-8
Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2008.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort des Autors

Der Fortgang der wissenschaftlichen Entwicklung ist
im Endeffekt eine ständige Flucht vor dem Staunen.
Albert Einstein

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Die Thematik und die Idee zum neuen Lösungsansatz entstanden innerhalb der zahlreichen in dieser Zeit von mir durchgeführten Fabrikplanungsprojekte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Westkämper für die fachliche Betreuung der Arbeit sowie die akademische Freiheit und die jederzeit spannende Diskussion neuer wissenschaftlicher Ansätze. Herrn Professor Spath danke ich für die wohlwollende Unterstützung und die Übernahme des Mitberichts.

Entscheidend zur erfolgreichen Durchführung der Arbeit beigetragen haben sicherlich auch die umfangreichen Diskussionen in der Initialisierungsphase des Themas. Hierfür mein spezieller Dank den Herren Dr. Bernd-Dietmar Becker und Uwe Koch, der auf besonders tragische Weise viel zu früh aus seinem Leben und der wissenschaftlichen Diskussion gerissen wurde. Dank gilt darüber hinaus Herrn Professor Delco Jovanoski, der mir zu Beginn der schriftlichen Ausarbeitung als wertvoller »Sparringspartner« zur Verfügung stand.

Meinen Weggefährten und Kollegen am Institut danke ich für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen sowie die immer wieder aufmunternden Worte zum richtigen Zeitpunkt. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Professor Wilfried Sihn, Dr. Jörg Pirron, Dr. Jürgen Bischoff, Dr. Ralf von Briel sowie Thomas Steegmayer, diesen stellvertretend für das gesamte mit der Prototypen-Implementierung befasste Team. Für die menschliche und fachliche Unterstützung sowie die tatkräftige Förderung der Fertigstellung der Arbeit danke ich vor allem Herrn Klaus-Peter Zeh.

Mein ganz besonderer Dank gilt Ulrike: Ihr Verzicht auf viele Wochenenden, Urlaubstage sowie gemeinsame Freizeit und gemütliche Abendstunden haben ganz wesentlich zur erfolgreichen Erstellung der Arbeit beigetragen. Ihr gelang es, meine mit der Arbeit verbundenen Launen geduldig zu ertragen und mir doch gleichzeitig immer wieder Motivation und Zuversicht mit auf den Weg zu geben. Neben ihr gilt mein Dank meinen Eltern, die mich in meiner Entwicklung stets unterstützt, meine Person entscheidend geprägt und somit auch den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben. Ihnen und Ulrike widme ich meine Arbeit.

Stuttgart, im Juli 2008

Thomas Rist

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis	12
Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten	16
1 Einleitung	18
1.1 Ausgangssituation	18
1.2 Handlungsbedarf hinsichtlich der Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	20
1.3 Aufbau der Arbeit	22
2 Wandlungstreiber für Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	24
2.1 Wandlungstreiber in den Märkten	25
2.2 Wandlungstreiber in den Produktionsbetrieben	26
2.2.1 Wandlungstreiber in den Wirksystemen	27
2.2.2 Wandlungstreiber in den Fabrikplanungsprozessen	29
3 Begriffe und Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	34
3.1 Begriffserläuterungen und Begriffsbestimmungen	34
3.1.1 Räumliche Anordnungen in Produktionsbetrieben	34
3.1.2 Planung räumlicher Anordnungen von Produktionsbetrieben	37
3.1.3 Skalierbarkeit im Rahmen der Planung räumlicher Anordnungen	41
3.1.4 Bewertung räumlicher Anordnungen von Produktionsbetrieben	43
3.2 Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	47
3.2.1 Allgemeine Anforderungen an Verfahren zur Modellierung	47
3.2.2 Anforderungen einer skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	50
3.2.3 Spezifische Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	53
3.2.4 Zusammenfassende Betrachtung der Anforderungen	56

4	Stand der Wissenschaft und Technik.....	57
4.1	Klassische Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen	57
4.2	Erweiterungen der klassischen Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen	62
4.2.1	Erweiterungen hinsichtlich der verwendeten Modellelemente	62
4.2.2	Erweiterungen hinsichtlich der verwendeten Zielfunktion	64
4.2.3	Erweiterungen hinsichtlich der zugrunde liegenden Auftragslast	65
4.2.4	Erweiterungen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Randbedingungen	66
4.2.5	Hybride Erweiterungen der klassischen Modellierungsverfahren	67
4.3	Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen aus dem Bereich »Digitale Fabrik«	68
4.4	Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen in kommerziellen Softwareprodukten.....	68
4.5	Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen in wissenschaftlich ausgerichteten Softwareprodukten	70
4.6	Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen für Spezialfälle	70
4.6.1	Verfahren für Spezialfälle bezüglich der Betrachtungsgegenstände	70
4.6.2	Verfahren für Spezialfälle bezüglich des Modellierungsansatzes	71
4.7	Zusammenfassende Bewertung der Modellierungsverfahren.....	71
5	Lösungsansatz zur Verbesserung der Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	74
6	Struktur des verbesserten Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	86
6.1	Abbildungslogik der flächenbehafteten Elemente	86
6.1.1	Grundcharakteristik zur Abbildung von Flächenelementen	86
6.1.2	Modellierung der Flächenelemente	88
6.2	Abbildungslogik der Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen.....	100
6.2.1	Grundcharakteristik zur Abbildung von Beziehungen zwischen Flächenelementen	101
6.2.2	Modellierung der Beziehungen zwischen Flächenelementen.....	105
7	Nutzung der strukturellen Verbesserungen des Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung.....	116
7.1	Logik zur Bewertung räumlicher Anordnungen	116
7.1.1	Grundlagen der verbesserten Bewertungslogik.....	118

7.1.2	Methoden zur Bewertung von Beziehungen zwischen Flächenelementen	122
7.1.3	Methoden zur Verknüpfung von Beziehungen.....	124
7.2	Logik des Anordnungsverhaltens.....	127
8	Ablauf des verbesserten Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung	133
8.1	Makroablauf und Vorbereitung der Nutzung des Verfahrens	133
8.2	Mikroablauf zur Nutzung des Verfahrens.....	135
9	Diskussion des verbesserten Verfahrens hinsichtlich der Erfahrungen seiner Anwendung in der industriellen Praxis	141
9.1	Erkenntnisse aus der Durchführung von Testszenarien	141
9.2	Erkenntnisse aus der Durchführung eines Anwendungsbeispiels	150
9.3	Kritische Würdigung des Verfahrens	161
10	Zusammenfassung und Ausblick	165
11	Summary.....	170
12	Literaturverzeichnis	176
13	ANHANG.....	206
13.1	Anforderungskriterien an die Modellierungsverfahren in Langfassung	206
13.2	Übersicht der für den Stand der Technik ausgewerteten Literatur.....	207
13.3	Ergebnisse Anforderungsabgleich implizit formulierte Beziehungen mit Ausprägungslogik »Zeichenfolge« am Beispiel	208
13.4	Ablauf zur Auswertung implizit formulierter Beziehungen	209
13.5	Mikroablauf der Anordnungsplanung mit Aufgabendetails.....	210
13.6	Beziehungsprofile der Testszenarien zum Mächtigkeitsnachweis für das verbesserte Verfahren im Rahmen des Praxistests	211
13.7	Quantifizierte Materialflüsse in Matrixform	212
13.8	Langbezeichnungen zu den in der Materialflussmatrix verwendeten organisatorischen Einheiten.....	213

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Produktionsbezogene Ziele in Produktionsbetrieben	19
Abb. 1-2:	Aufbau der Arbeit.....	23
Abb. 2-1:	Markt- und produktionsseitige Wandlungstreiber für veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen	24
Abb. 2-2:	Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der marktseitigen Wandlungstreiber	26
Abb. 2-3:	Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der produktionsseitigen Wandlungstreiber	27
Abb. 2-4:	Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der planungsseitigen Wandlungstreiber	29
Abb. 2-5:	Veränderter Aufgabenbezug der Fabrik- und Anordnungsplanung	30
Abb. 2-6:	Veränderter Objektbezug der Fabrik- und Anordnungsplanung entsprechend dem »Stuttgarter Unternehmensmodell«	32
Abb. 3-1:	Abbildung der Realität in einem Modell unter Verwendung eines Modellierungsverfahrens	35
Abb. 3-2:	Betrachtungsumfang zur Modellierung räumlicher Anordnungen.....	38
Abb. 3-3:	Geometrische Bestimmungsgrößen der Anordnungsplanung	39
Abb. 3-4:	Iterative Planung im durch die Skalen Detaillierungsgrad und Planungsteilaufgabe aufgespannten Planungsraum	40
Abb. 3-5:	Notwendige Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der zugrunde liegenden Planungsaufgabe	41
Abb. 3-6:	Skalen zur Beschreibung von Anordnungsplanungsteilaufgaben.....	42
Abb. 3-7:	Darstellung der Anordnungsaufgabe im Planungsnetz.....	43
Abb. 3-8:	Notwendige Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der Anforderungen der Skalierbarkeit.....	44
Abb. 3-9:	Mögliche Ausprägungen von Beziehungen mit zugehörigen Beispielen.....	45
Abb. 3-10:	Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der Bewertungsanforderungen.....	46
Abb. 3-11:	Systematische Ableitung der Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen	48
Abb. 3-12:	Bedeutung der GoM für die Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen.....	50

Abb. 3-13:	Einflussfaktoren für die Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen	51
Abb. 3-14:	Ableitung der Anforderungen an eine skalierbare Modellierung räumlicher Anordnungen	52
Abb. 3-15:	Spezifische Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Elemente für eine richtige und skalierbare Modellierung	53
Abb. 3-16:	Spezifische Anforderungen hinsichtlich der relevanten Beziehungen für eine umfassende und systematische Modellierung	54
Abb. 3-17:	Spezifische Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Beschreibungsumfangs für eine vergleichbare und skalierbare Bewertung	55
Abb. 3-18:	Spezifische Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Systematik für eine durchgängige und skalierbare Modellierung	55
Abb. 3-19:	Gesamtübersicht der Anforderungskriterien für ein Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen	56
Abb. 4-1:	Bezüglich der Anforderungskriterien homogene Verfahrensklassen ...	57
Abb. 4-2:	Zusammenhang Anordnung und repräsentierender binärer Baum	60
Abb. 4-3:	Darstellung von planarem und zugehörigem dualen Graphen	63
Abb. 4-4:	Arten der Entfernungsmessung bezüglich Metrik und Bezugspunkten.....	65
Abb. 4-5:	Einordnung kommerzieller Softwareprodukte zur Anordnungsplanung	69
Abb. 4-6:	Beurteilung Verfahrensklassen bzgl. der definierten Anforderungen.....	72
Abb. 5-1:	Effekte skalierbarer Modelle und zugehöriger Modellierungen.....	75
Abb. 5-2:	Durch das verbesserte Verfahren adressierte Teilaspekte.....	76
Abb. 5-3:	Beispiel zur Integration der beiden Teilmodelle Arbeitssystem und Montagezelle als Voraussetzung zur freien Variation des Planungspunktes	78
Abb. 5-4:	Beispielhafte Darstellung der 1:1- und 1:n- bzw. n:m-Logik anhand 2-dimensionaler Randbedingungen.....	80
Abb. 5-5:	Bewertung transportmittelabhängiger Kosten einer Austauschbeziehung	82
Abb. 5-6:	Bewertung anordnungsabhängiger Kosten einer Anforderung an den Fußboden (ESD) mittels 2-dimensionalem Ziel in 1:n-Logik.....	83
Abb. 5-7:	Differenziertes Anordnungsverhalten für unterschiedliche Planungsteilaufgaben mittels 2-dimensionaler Randbedingungen	84
Abb. 6-1:	Abbildungslogik flächenbehafteter Realobjekte im Modell.....	89
Abb. 6-2:	Abbildungslogik der Anknüpfungspunkte von Beziehungen	91

Abb. 6-3:	Beispielhafte Darstellung der zulässigen Ausprägungen eines Rechtecks bei Vorgabe zulässiger Wertebereiche	93
Abb. 6-4:	Anordnung entsprechend den Anforderungen der Zuordnungsstruktur Segmente zu Hallen	96
Abb. 6-5:	Logik zur Beschreibung freier Attribute von Flächenelementen	98
Abb. 6-6:	Zusammenfassung der Abbildungslogik für die Flächenelemente	100
Abb. 6-7:	Verfügbare Konstrukte zur Abbildung von Beziehungen	103
Abb. 6-8:	Verfügbare Logiken zur Abbildung von Beziehungen.....	104
Abb. 6-9:	Verfügbare Messmethoden für die Bestimmungsparameter 1-dimensionalen Beziehungen	107
Abb. 6-10:	Zulässige Formulierungen für den Abgleich von Bedarf und Angebot.....	110
Abb. 6-11:	Mögliche Formulierungen zum Abgleich von Bedarf und Angebot auf Basis der Attribute von Flächenelementen mit alternativen Logiken.....	111
Abb. 6-12:	Zulässigkeit der Anordnung abhängig von der unterschiedlichen Charakteristik hinsichtlich der Bedarfserfüllung.....	113
Abb. 6-13:	Zusammenfassung der Abbildungslogik für Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen.....	115
Abb. 7-1:	Bewertung mit Zugriffsmöglichkeit auf die Konstrukte der Modellierung.....	118
Abb. 7-2:	Verfügbare Bausteine der Methodensprache und deren Zusammenwirken zur Bewertung	120
Abb. 7-3:	Übergeordnete Logik der Anordnungsbewertung.....	124
Abb. 7-4:	Zusammenfassung der Bewertungslogik.....	126
Abb. 7-5:	Prägende Modellierungsaspekte der Logik des Anordnungsverhaltens.....	128
Abb. 7-6:	Beispiel zur Bildung alternativer organisatorischer Strukturen	130
Abb. 7-7:	Zusammenfassung der Logik des Anordnungsverhaltens und seiner prägenden Modellierungsaspekte.....	132
Abb. 8-1:	Makroablauf der Planung im Kontext des verbesserten Modellierungsverfahrens	134
Abb. 8-2:	Gegenüberstellung von herkömmlichen und verbessertem Verfahren hinsichtlich Grundstruktur der Modellierung.....	136
Abb. 8-3:	Gegenüberstellung von herkömmlichen und verbessertem Verfahren hinsichtlich Grundstruktur des Lösungsraums	137
Abb. 8-4:	Mikroablauf der Anordnungsplanung im Kontext des verbesserten Modellierungsverfahrens	138
Abb. 8-5:	Zyklus der experimentellen Optimierung bzw. Experimentdurchführung	140

Abb. 9-1:	Zusammenstellung anordnungsrelevanter Beziehungen.....	142
Abb. 9-2:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Produktionstechnischer Sichtweise« .	143
Abb. 9-3:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Logistischer Sichtweise«	144
Abb. 9-4:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Organisatorischer Sichtweise«	145
Abb. 9-5:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Arbeitsorganisatorischer Sichtweise«	146
Abb. 9-6:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Infrastrukturbezogener Sichtweise« ..	147
Abb. 9-7:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Sicherheitsbezogener Sichtweise« ...	148
Abb. 9-8:	Abbildungsmöglichkeiten bei »Ästhetikbezogener Sichtweise«	149
Abb. 9-9:	Produktbeispiel komplexe Anlage	151
Abb. 9-10:	Austauschbeziehungen Flusssystem »Material« (qualitativ)	153
Abb. 9-11:	Beispiel einer vorselektierten Struktur aus der Gebäudestrukturplanung	154
Abb. 9-12:	Abbildungsumfänge von Planungsaufgaben und Iterationen	155
Abb. 9-13:	Integration Teilaufgaben und Hierarchieebenen der Anordnungsplanung	157
Abb. 9-14:	Blick in die Fließlinie zur Maschinenmontage	160
Fig.: 11-1:	New modeling approach and layout planning process	170

Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

A_i	Flächeninhalt des Flächenelementes i
A_i^*	Flächeninhalt des umschließenden Rechtecks von Flächenelement i
A_{max}	maximal zulässiger Flächeninhalt eines Flächenelementes
A_{min}	minimal zulässiger Flächeninhalt eines Flächenelementes
a_{ik}	Schnittfläche der beiden Flächenelemente i und k
B_i	Breite des Flächenelementes i
B_i^*	Breite des umschließenden Rechtecks von Flächenelement i
B_{max}	maximal zulässige Breite eines Flächenelementes
B_{min}	minimal zulässige Breite eines Flächenelementes
BGM	Baugruppenmontage
BM	Betriebsmittel
c'_{jl}	Kosten aufgrund 1-dimensionaler Beziehungen zwischen den beiden am Standort j und am Standort l angeordneten Elementen i und k
c'^K_{jl}	Kosten aufgrund 1-dimensionaler Beziehungen zwischen den beiden bei Anordnungskonstellation K am Standort j und am Standort l angeordneten Elementen i und k
c_{ik}	Spezifischer Kostensatz zur Bewertung einer Beziehung zwischen den Elementen i und k
c_{ik}^*	Modifizierter spezifischer Kostensatz zur Bewertung einer Beziehung zwischen den Elementen i und k (z. B. aufgrund Verwendung eines anderen TM)
CM	»Cellular Manufacturing«
d'_{jl}	Entfernung zwischen Standort j und Standort l
d_{ik}	Entfernung zwischen Element i und Element k auf der Grundlage ihrer Anordnung am Standort j bzw. am Standort l
d_{grenz}	Entfernung zwischen zwei Elementen, bei der sich der zugehörige Kostensatz ändert (z. B. aufgrund Verwendung eines anderen TM)
EM	Endmontage
FE_i	Flächenelement i
f_{ik}	Intensität einer 1-dimensionalen Beziehung zwischen den Elementen i und k
g'_{ij}	Netto-Ertrag des Betriebs von Element i am Standort j
GFLP	Generalisiertes Anordnungsproblem (<u>G</u> eneral <u>F</u> acility <u>L</u> ayout <u>P</u> roblem)
GT	»Group Technology«
GoM	Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung

IuK-	Informations- und Kommunikations-
KP_{iq}	Konnektorpunkt q des Flächenelementes i
L_{max}	maximal zulässige Länge eines Flächenelementes
L_{min}	minimal zulässige Länge eines Flächenelementes
L_i	Länge des Flächenelementes i
L_i^*	Länge des umschließenden Rechtecks von Flächenelement i
MF	Materialfluss(-)
MIP	Gemischt ganzzahlige Programmierung (<u>M</u> ixed <u>I</u> nteger <u>P</u> rogramming)
MILP	Gemischt ganzzahlige lineare Programmierung (<u>M</u> ixed <u>I</u> nteger <u>L</u> inear <u>P</u> rogramming)
n	Gesamtanzahl Elemente (bzw. Anzahl potenzieller Standorte im Falle QAP, da hier Anzahl Elemente und Anzahl Standorte identisch sind)
OE	Organisatorische Einheit(en)
o. J.	Ohne Jahr(gang)
OR	Operations Research
q	Gesamtzahl der zu einem Flächenelement definierten Konnektorpunkte
QAP	Quadratisches Zuordnungsproblem (<u>Q</u> uadratic <u>A</u> ssignment <u>P</u> roblem)
QSCP	Quadratisches Set Covering Problem
s_{ik}	Intensität einer 2-dimensionalen Beziehung zwischen den Elementen i und k
SPM	Space Partitioning Modellierung
STM	Slicing Tree Modellierung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TM	Transportmittel
x_i	x-Koordinate eines definierten Punktes des Elementes i
Δx	Achsenabschnitt in Richtung der x-Achse
x'_{ij}	Binäre Variable $\begin{cases} 1 & \text{wenn Element } i \text{ am Standort } j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
x_{ik}	Binäre Variable $\begin{cases} 0 & \text{wenn Angebot Element } k \text{ Bedarf Element } i \text{ deckt} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$
y_i	y-Koordinate eines definierten Punktes des Elementes i
Δy	Achsenabschnitt in Richtung der y-Achse
WiP	Work-in-Progress, d. h. Umlauf- bzw. Werkstattbestand
ZSB	Zusammenbaugruppe laut Stückliste
ZW	Zielwert einer Anordnung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Produktionsbetriebe [nach Bea 1992, S. 22] sind Teilsysteme der Volkswirtschaft. Sie verfolgen betriebswirtschaftliche Ziele [Bea 1992, S. 44]¹. Die optimale Zielerreichung wird durch das Wirtschaftlichkeitsprinzip [nach Bea 1992, S. 43f, 49] beschrieben² (Abb. 1-1 [vgl. Wöhe 2008, S. 102-106; Bea 1992, S. 85]). Dieses besagt, dass Mitteleinsatz und entstehendes Ergebnis so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass der durch sie definierte Prozess optimiert wird [vgl. Müller-Merbach 1976]³.

Die Ausrichtung der Produktionsbetriebe auf die wirtschaftlichste Arbeitsweise erscheint selbstverständlich. Die betriebliche Realität offenbart jedoch häufig deutliche Defizite, wie beispielsweise eingeschränkte Transparenz der Produktionsprozesse mit der Folge langer Liegezeiten und hohen Logistikaufwands, lange Durchlaufzeiten und damit verbundene hohe Materialbestände sowie geringe Flexibilität⁴ bezüglich quantitativen und qualitativen Veränderungen des Produktionsprogramms [vgl. Benjaafar 2002; Matyas 1999; Moscoso 1999, S. 193; Dürrschmidt 1997; Bölte 1994; Domschke 1993, S. 3950]. Ein beträchtlicher Anteil der betrieblichen Defizite ist neben anderen Ursachen auch auf Mängel in Bezug auf die räumliche Anordnung⁵ im Produktionsbetrieb zurückzuführen [Benjaafar 2002, S. 1; Wiendahl 2001b; Sihn 2000; Sallaba 2000; Jünemann 1999, S. 16-9; Bölte 1994, S. 3, 9f]. Diese Mängel wirken sich direkt in der Verfehlung der Ziele des Wirtschaftlichkeitsprinzips aus.

¹ Neben wirtschaftlichen Zielen sind soziale, technische und ökologische bekannt. Letztere werden hier ausschließlich bezüglich ihres Beitrags zur Erreichung der wirtschaftlichen Ziele betrachtet.

² Unter dem Wirtschaftlichkeitsprinzip wird hier ein Ergiebigkeitsprinzip verstanden, das ausschließlich wirtschaftlichen Zielen zugeordnet ist.

³ Das Optimalitätskriterium ist problemindividuell zu definieren. Unter Prozess wird in diesem Zusammenhang speziell der Produktionsprozess verstanden.

⁴ Flexibilität bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel angepasst werden zu können [vgl. Westkämper 2000b].

⁵ Synonym sind auch die Begriffe »Layout« und »innerbetriebliche Standorte« gebräuchlich.

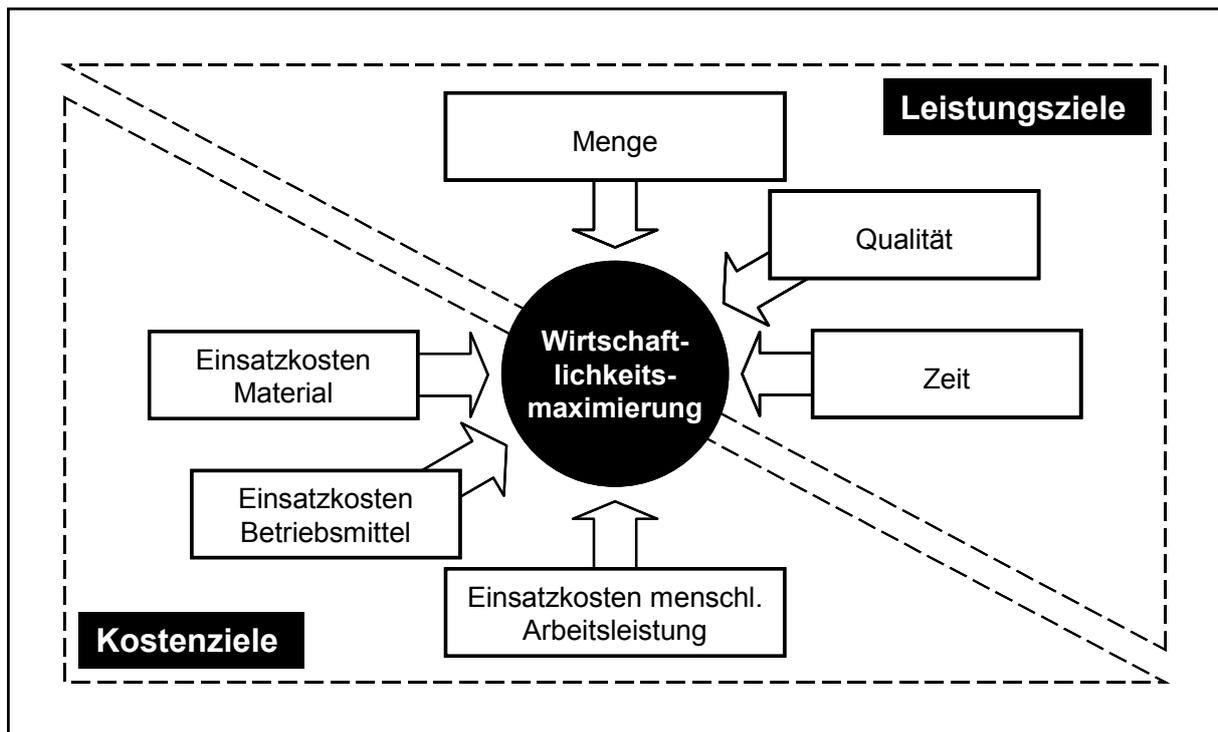


Abb. 1-1: Produktionsbezogene Ziele in Produktionsbetrieben

Gegenstand der räumlichen Anordnung sind Flächen⁶, mit denen im Allgemeinen drei unterschiedliche Aspekte in den Produktionsbetrieben abgebildet werden [vgl. Grundig 2000, S. 151ff, 227, 240; Aggteleky 1990a, S. 77-81, 575, 589f, 602-616; Kettner 1984, S. 237-240, 255-281; Dangelmaier 1986, S. 18]:

- Bauseitige Konstruktionselemente⁷
- Funktionale Nutzungen bzw. Wahrnehmung von Teilaufgaben und deren Zusammenfassungen⁸
- Flächenqualitäten⁹, die für diese Nutzungen bzw. die Wahrnehmung der Teilaufgaben erforderlich sind

⁶ 3-dimensionale Fragestellungen wie sie sich beispielsweise aus dem Einsatz von Industrierobotern ergeben [vgl. Woenckhaus 1994], werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

⁷ Derartige Flächen sind beispielsweise Räume, Hallen, Brandabschnitte, Stützenraster, Durchfahrten, Treppenhäuser, Aufzüge, Kranbahnen sowie sonstige fix installierte Fördertechniken.

⁸ Derartige Flächen sind beispielsweise Arbeitsplätze, Betriebsmittel, Arbeitssysteme, Logistikflächen, Fertigungsstufen bzw. -linien, Abteilungen, Produktionsbereiche und Betriebseinheiten.

⁹ Derartige Flächenqualitäten sind beispielsweise Überkranungen, Boden- bzw. Deckentraglasten, Bereiche für die Versorgung mit bestimmten Medien oder mit speziellen Anforderungen bezüglich der Raumqualität wie z.B. Luft- oder Schwingungszustände.

1.2 Handlungsbedarf hinsichtlich der Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Die räumliche Anordnung definiert die absolute Lage der oben beschriebenen Flächen, im Folgenden zusammenfassend als flächenbehaftete Elemente bezeichnet [vgl. Bölte 1994, S. 20ff; Dangelmaier 1986, S. 18-20; Wäscher 1982, S. 17f, 83f], innerhalb des Produktionsbetriebs und stellt somit deren räumlichen Zusammenhang im Sinne ihrer relativen Lage her [vgl. Bölte 1994, S. 2; Aggteleky 1990a, S. 44f; Dangelmaier 1986, S. 18f]. Die Anordnung beeinflusst in wesentlicher Weise die Leistungserstellung in der Fabrik [vgl. Warnecke 1999, S. 9-81]. Sie wächst gleichzeitig zu einem der wesentlichsten Träger der als kritischer Erfolgsfaktor für das zukünftige Bestehen im Wettbewerb angesehenen Wandlungsfähigkeit¹⁰ heran [vgl. Westkämper 2001a, 2000b; Wiendahl 2002a, 2002b; Vollmer 2002, 2001].

Die Festlegung der räumlichen Anordnung der flächenbehafteten Elemente erfolgt im Rahmen der Anordnungsplanung¹¹. Aufgabe der Anordnungsplanung ist die Überführung der überwiegend abstrakten Ergebnisse vorgelagerter Planungsschritte in konkrete, grundrissmäßig definierte Form¹². Hierbei gilt es, verschiedenste Anforderungen gegenseitig abzustimmen und im Sinne des Wirtschaftlichkeitsprinzips so gut wie möglich zu erfüllen [vgl. Aggteleky 1990a, S. 586]. Dieser Abstimmungs- und Optimierungsprozess ist von großer Bedeutung, weist er doch erfahrungsgemäß erhebliche Verbesserungspotentiale in Bezug auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Produktionsbetriebe auf [vgl. Bölte 1994]¹³.

Die Anordnungsplanung gilt als variantenreichste Aufgabe der Fabrikplanung. Sie ist geprägt durch zahlreiche Einflussfaktoren und Bewertungskriterien sowie eine Vielzahl von Lösungsalternativen [vgl. Warnecke 1999, S. 9-81; Aggteleky 1990a, S. 586].

¹⁰ Wandlungsfähigkeit ist [nach Westkämper 2000b] die Fähigkeit eines Systems, aus sich selbst heraus neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen.

¹¹ Synonym gebräuchliche Begriffe sind »Layoutplanung« und »innerbetriebliche Standortplanung«.

¹² Planung soll hier als das Treffen von in die Zukunft gerichteten Entscheidungen auf Basis der Gegenüberstellung verschiedener Handlungsalternativen zur optimalen Erreichung eines vorgegebenen Zielsystems verstanden werden [vgl. Wöhe 2008, S. 134; Bea 1992, S. 49].

¹³ Dort wird das durch effektive Anordnungsplanung erreichbare Kostensenkungspotential auf bis zu 15% der Gesamtkosten, von anderen ebenda zitierten Autoren sogar auf bis zu 30% beziffert.

Aus der geforderten Zusammenführung verschiedenster Ergebnisse vorangegangener Planungsschritte resultiert ein stark integrativer und interdisziplinärer Charakter [vgl. Bischoff 2001, S. 231; Scharf 2001; Grundig 2000, S. 16]. Wie die Fabrikplanung insgesamt entwickelt sich auch die Anordnungsplanung zunehmend von einer einmaligen und projektorientierten hin zu einer zyklischen bis kontinuierlichen Aufgabe [vgl. Westkämper 2000a; Spath 2002; Schulte 2001, S. 12; Grundig 2000, S. 12, 18, 20]. Sie wandelt ihre bisherige Rolle als Bestandteil der strategischen Planung und wird zunehmend auch Inhalt des taktisch-operativen Planungshorizontes [vgl. Heragu 2001, S. 3].

Die überwiegende Anzahl der genannten Defizite¹⁴ in Bezug auf die räumliche Anordnung resultiert weniger aus Fehlern der Betriebsphase als vielmehr aus Mängeln und Fehlern bei der Anordnungsplanung im Vorfeld der Umsetzung [vgl. Westkämper 2003a, S. 191, 1999a; Spath 2002; Wiendahl 2002b, 1997; Dombrowski 2001]. Da der Anordnungsplanung ein modellbasiertes Verfahren¹⁵ zugrunde liegt, lassen sich die in der Praxis anzutreffenden Defizite in Bezug auf die räumliche Anordnung auf zwei mögliche Ursachen zurückführen. Die eine mögliche Ursache ist die mangelnde Einsatzhäufigkeit, die andere die zu geringe Leistungsfähigkeit der verwendeten modellbasierten Verfahren¹⁶. Trotz nachweisbar verstärkten Einsatzes modellbasierter Verfahren zur Planung räumlicher Anordnungen haben sich die beschriebenen Defizite nicht signifikant verbessert [vgl. Bölte 1994, S. 7]. Daher ist von einer zu geringen Leistungsfähigkeit derartiger Verfahren auszugehen.

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten [vgl. Benjaafar 2002; Meller 1996a] hat sich speziell mit Entwicklung und Weiterentwicklung der Verfahren zur Optimierung der räumlichen Anordnung flächenbehafteter Elemente beschäftigt. Da trotz nachgewiesener Verbesserungen dieser Optimierungsverfahren die genannten Defizite der Praxis nicht wesentlich verbessert werden konnten, liegt die Annahme nahe, dass

¹⁴ Siehe Seite 18.

¹⁵ Ein Modell ist ein abstrahiertes Abbild der Realität, das als Objekt der Anschauung und des Denkens dem realen Problem bezüglich der zur Problemlösung relevanten Eigenschaften vergleichbar ist. Es dient hier der Entscheidungsunterstützung [vgl. Bea 1992, S. 322; Wöhe 2008, S. 36f].

¹⁶ Im Rahmen der Arbeit soll zwischen Verfahren und Methode differenziert werden. Ein Verfahren setzt sich aus einer oder mehreren Methoden und dem zu ihrer Anwendung erforderlichen problemspezifischen Know-how zusammen [vgl. Dangelmaier 1986, S. 22; Becker 1991, S. 16].

nicht Mängel bezüglich der Optimierungsverfahren, sondern Mängel der Verfahren zur Modellierung¹⁷ räumlicher Anordnungen für die Defizite verantwortlich zu machen sind. So weisen auch bereits mehrere Autoren auf grundlegende Mängel im Bereich dieser Modellierungsverfahren hin [vgl. Gäse 2006, S. 316; Günther 2005, S. 34; Meller 1996a, S. 354, 361; Bölte 1994, S. 8-16; Dangelmaier 1986, S. 22; Kettner 1984, S. 237ff, 242ff; Wäscher 1982]. Außerdem wird diese These durch die signifikant steigende Anzahl an Arbeiten zur Erweiterung der gebräuchlichen Basismodellierungen gestützt [vgl. Meller 1996a, S. 354, 361]. Als Hauptmängel werden nicht hinreichend genaue Abbildungsmöglichkeiten der betrieblichen Realität bezüglich der spezifischen Aspekte der Anordnungsplanung, die fehlende Unterstützung einer durchgängigen und iterativen Planung sowie die mit diesen beiden Punkten in direktem Zusammenhang stehenden Möglichkeiten einer systematischen und multikriteriellen Bewertung räumlicher Anordnungen angesehen [vgl. Benjaafar 2002, S. 1f; Meller 1996a, S. 354f; Bölte 1994, S. 8-17; Wäscher 1982, S. 88]. Der akute Handlungsbedarf liegt in der Abstellung dieser verfahrensbezogenen Mängel und Defizite.

1.3 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit (Abb. 1-2) werden ausgehend von der Beschreibung relevanter Wandlungstreiber in Kapitel 2 zukünftige Anforderungen an die Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung abgeleitet (Kapitel 3). Auf dieser Basis werden durch Untersuchung des Standes der Technik und dessen zusammenfassender Bewertung in Kapitel 4 die Defizite herkömmlicher Verfahren aufgezeigt¹⁸. Anschließend wird in den Kapiteln 5 bis 8 ein verbessertes Verfahren entwickelt, das die Nachteile herkömmlicher Modellierungsverfahren überwindet und die Voraussetzungen für eine qualitativ höherwertige und realitätsnähere Bearbeitung der Anordnungsplanungsaufgabe schafft. Dieses Verfahren wird abschließend in Kapitel 9 hinsichtlich seiner Erfahrungen in der industriellen Anwendung diskutiert.

¹⁷ Unter Modellierung wird die aufgaben- und zielspezifische Abbildung der betrieblichen Realität in einem Entscheidungsmodell verstanden [vgl. Bea 1992, S. 322f].

¹⁸ Die Betrachtung wird im Rahmen der Arbeit auf Fragestellungen mit direktem Bezug zur Produktion eingeschränkt. Ein Großteil der Ausführungen zur räumlichen Anordnung flächenbehafteter Elemente gilt jedoch auch für andere Bereiche im Produktionsbetrieb wie z.B. Bürobereiche.

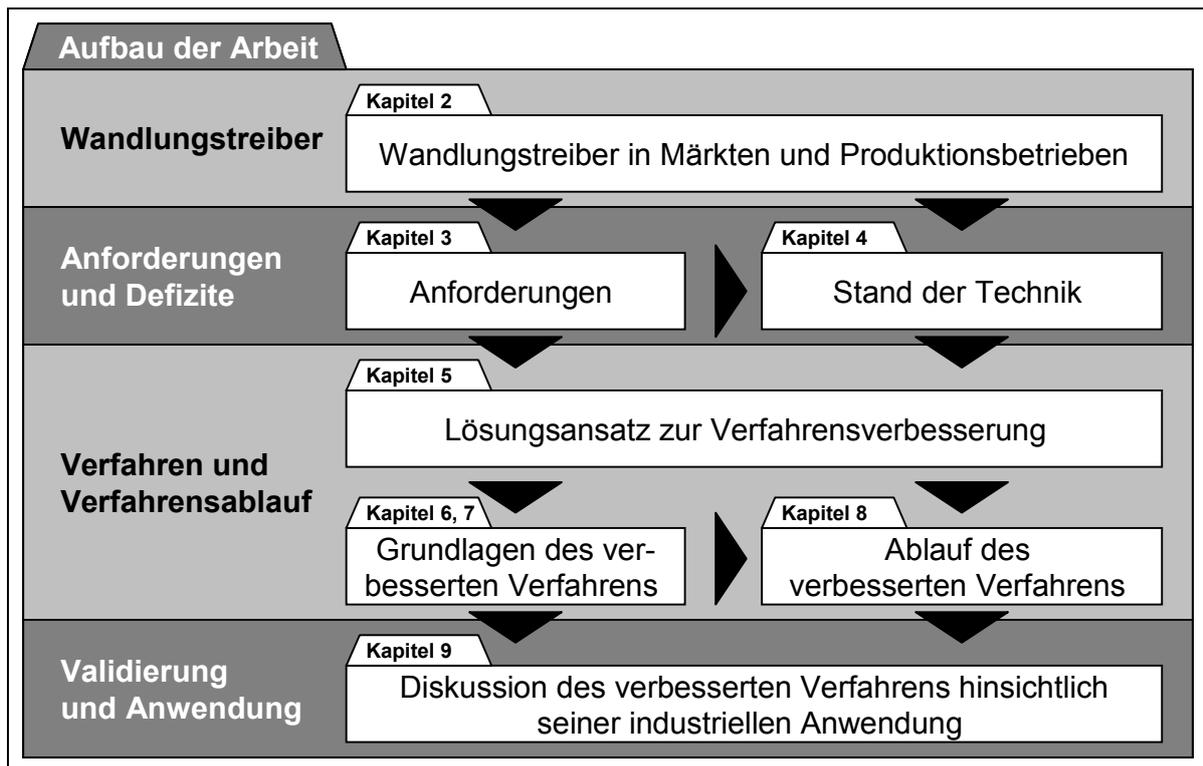


Abb. 1-2: Aufbau der Arbeit

2 Wandlungstreiber für Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Verschiedene markt- (Kapitel 2.1) und produktionsseitige Entwicklungen und Gegebenheiten (Kapitel 2.2) führen zu einem prinzipiellen Anpassungsdruck für Produktionsbetriebe. Diese induzieren gleichzeitig einen Wandlungsbedarf bezüglich der Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen (Abb. 2-1) und werden daher nachfolgend als Wandlungstreiber bezeichnet [vgl. Westkämper 2003a, S. 191; Briel 2002, S.19]. Aus ihnen resultieren veränderte Anforderungen wie auch neue Möglichkeiten für die Modellierungsverfahren. Die wesentlichen marktseitigen Wandlungstreiber sind eine grundsätzlich verstärkte Turbulenz, die fortschreitende Globalisierung und eine immer stärkere Vernetzung der Produktionsbetriebe. Die produktionsseitigen Wandlungstreiber beziehen sich auf die unterschiedlichen Wirksysteme der Produktionsbetriebe [nach Schulte 2001, S. 8f] (Kapitel 2.2.1) sowie die Prozesse der Fabrik- und Anordnungsplanung (Kapitel 2.2.2).

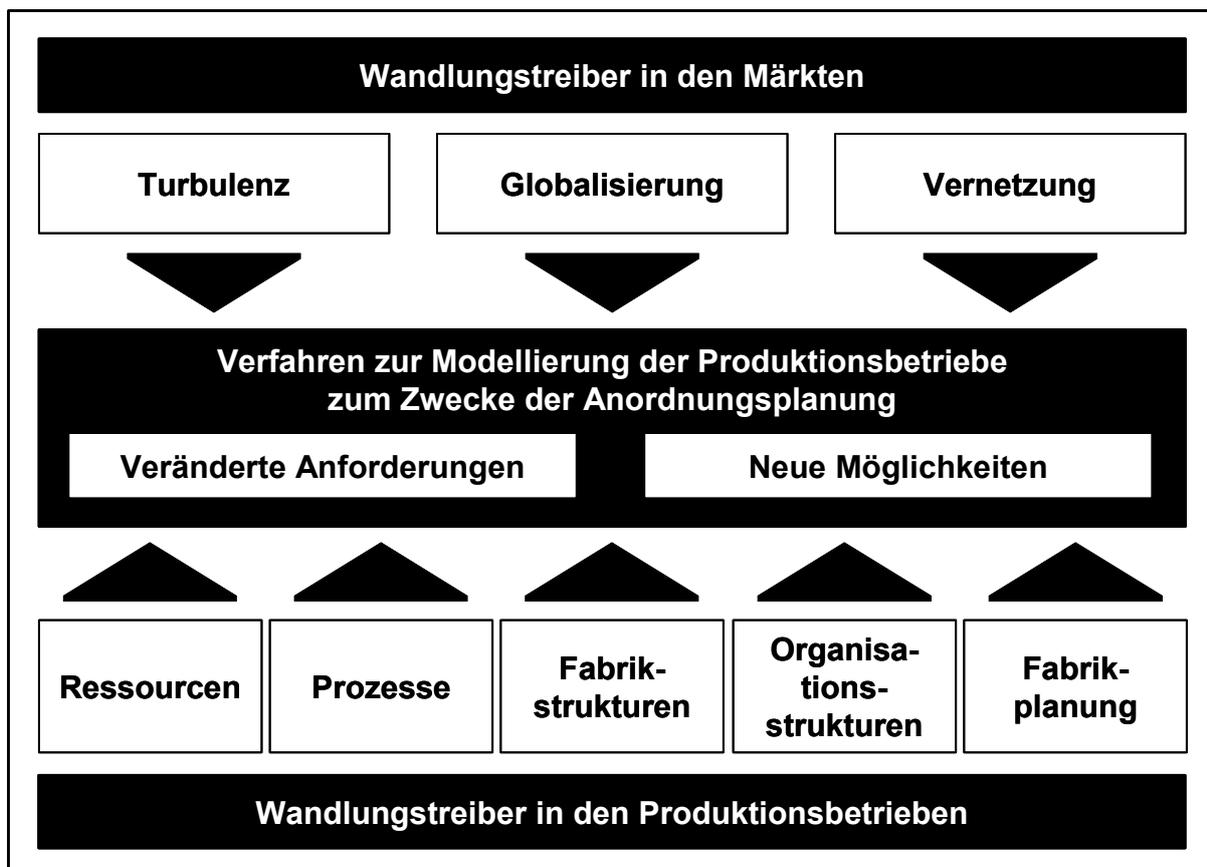


Abb. 2-1: Markt- und produktionsseitige Wandlungstreiber für veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen

2.1 Wandlungstreiber in den Märkten

Zahlreiche Autoren aus dem Bereich der Produktionstechnik weisen auf die signifikante Zunahme der **Turbulenz** hin [vgl. z. B. Westkämper 2002a, 2000a; Sihm 2002; Wiendahl 2002a; Dombrowski 2001; Eversheim 2001]. Immer schnellere Veränderungen der Märkte bedingen eine zunehmend schwierigere Prognostizierbarkeit [vgl. Ahlers 2002, S. 43]. Die Produktionsbetriebe sind als Reaktion auf diese Entwicklungen mehr denn je gefordert, ihre eigenen Strukturen und Prozesse proaktiv zu verändern und sich so kontinuierlich den Anforderungen der Märkte und der technologischen Entwicklungen anzupassen [vgl. Wiendahl 2002b; Sihm 2002; Wirth 2000a; Berg 1999]. Die Turbulenzindikatoren erreichen hierbei im Unterschied zur Vergangenheit mehr und mehr auch den Kurzfristbereich [vgl. Westkämper 2002a, 2000a; Wiendahl 2002b, Dombrowski 2001]. Die erforderlichen Anpassungen beinhalten die Ausgestaltung der physischen Aspekte in Form der räumlichen Anordnung.

Fortschreitende **Globalisierung** gepaart mit rasanter Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik führt zu erhöhter Markttransparenz. Gleichzeitig gewährleistet eine globale Logistik die weltweite Verfügbarkeit der angebotenen Produkte. Der somit vereinfachte Marktzugang induziert einen erheblich intensivierten, weltweiten Wettbewerb mit erhöhtem Marktdruck und zunehmender Veränderung der bisherigen marktbezogenen Erfolgsfaktoren [vgl. Wiendahl 2001c, 2000; Schulte 2001, S. 11; Schmidt 2000; Arthur D. Little 2000, S. 39; Wirth 2000a]. Die Produktionsbetriebe benötigen daher eine verbesserte Entscheidungsunterstützung. Diese Anforderung bezieht sich auch auf Entscheidungen hinsichtlich der räumlichen Anordnung.

Die Fähigkeit zu flexibler **Vernetzung** in unterschiedlichen temporären Kooperationen und Netzwerken erlangt für die Produktionsbetriebe zunehmend Bedeutung [vgl. Wiendahl 2001c; Bergholz 2002, S. 80, 89]. Zur Beherrschung einer ortsunabhängigen Planung und Wertschöpfung [vgl. Westkämper 2002b, S. 9; Bergholz 2002, S. 79f; Arthur D. Little 2000, S. 37] ist eine reibungsarme Integration eigener Planungs- und Wertschöpfungsprozesse in übergeordnete Netzwerkprozesse erforderlich. Operativ bedingt dies insbesondere die Digitalisierung der Prozesse und der zugehörigen Planungsmodelle. Die Modellansprüche steigen so drastisch. Für die Fabrik- und Anordnungsplanung beziehen sie sich auf das gesamte Netz der unter-

schiedlichen Planungsaufgaben [vgl. Westkämper 2004c, 2004b, 2003a, S. 194, 2002a] ¹⁹.

Zusammenfassend ist festzuhalten (Abb. 2-2), dass der Markt eine Zunahme von Struktur- und Prozessanpassungen erzwingt, welche die Anpassung der räumlichen Anordnung beinhaltet. Einen maßgeblichen Beitrag zur Sicherung und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Produktionsbetriebe in den Märkten können daher hinsichtlich Qualität und Leistungsfähigkeit verbesserte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen leisten.

2.2 Wandlungstreiber in den Produktionsbetrieben

Veränderungen in den Wirksystemen technische Ressourcen, Prozesse sowie Fabrik- und Organisationsstrukturen der Produktionsbetriebe induzieren signifikanten Wandlungsbedarf für Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen. Neben



Abb. 2-2: Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der marktseitigen Wandlungstreiber

¹⁹ Diese Anforderung steht auch beim Ansatz »Digitale Fabrik« im Mittelpunkt [vgl. Hnida 2001].

diesen wirksystembezogenen Aspekten führen auch grundlegende Änderungen der Prozesse der Fabrik- und Anordnungsplanung zu neuen Anforderungen an die Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen (Abb. 2-3).

2.2.1 Wandlungstreiber in den Wirksystemen

Im Bereich der Ressourcen, Prozesse und Fabrikstrukturen führt das Entfallen bisheriger Restriktionen zu einer höheren Wandlungsfähigkeit [vgl. Westkämper 2001b, 2000a; Bergholz 2002; Vollmer 2002; Wiendahl 2000, S. 2; Wirth 2000a] und einer verbesserten Adaptierbarkeit [vgl. Bergholz 2002; Westkämper 1999a, 1999b; Wirth 2000a; Eversheim 2001; Dombrowski 2001]²⁰ an veränderte Anforderungen. Die Wirtschaftlichkeitsschwelle für Veränderungen wird hierdurch signifikant abgesenkt [vgl. Westkämper 2003a, S. 193; Heragu 2001; Vollmer 2001].

Für technische **Ressourcen** wie Maschinen, Anlagen und sonstige Produktionseinrichtungen lässt sich eine erleichterte Adaptierbarkeit vor allem auf deren Rekonfigurierbarkeit und Mobilität zurückführen [vgl. Bergholz 2002, S. 90; Wiendahl 2001a,



Abb. 2-3: Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der produktionsseitigen Wandlungstreiber

²⁰ Genannt werden dort Plattform- bzw. Modul- sowie Plug & Play bzw. Plug & Produce Konzepte.

2002b; Wirth 2000a, 2001a]. Die Rekonfigurierbarkeit wird insbesondere durch Modularisierung der technischen Maschinenkonzepte bei standardisierten Schnittstellen erreicht [vgl. Briel 2002, S. 23; Bergholz 2002, S. 91; Koren 1999], die Mobilität durch technische Zusatzeinrichtungen oder den bauartbedingten Entfall von Maschinenfundamenten. Die kontinuierliche und kurzfristige Anpassung der kompletten Ressourcenwelt an die veränderlichen Anforderungen während ihres gesamten Lebenszyklus schließt die zielgerichtete Veränderung der räumlichen Anordnung mit ein. Ähnlich den Ressourcen sind auch die **Prozesse** aufgrund ihrer Rekonfigurierbarkeit verbessert adaptierbar. Der Einsatz von Prozessmodulen führt zur signifikanten Absenkung der Wirtschaftlichkeitsbarriere für Veränderungen und Optimierungen [vgl. Sihn 2002; Wiendahl 2002b, 2002c]. Dies induziert Anpassungen der räumlichen Anordnung und wirkt so als Wandlungstreiber für die Anordnungsplanung.

Hinsichtlich der **Fabrikstrukturen** stellt die verbesserte Nutzungsflexibilität durch Entfall einschränkender Restriktionen den wesentlichen Wandlungstreiber für die Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen dar. Operativ wird dies z. B. durch Baukastensysteme für Gebäude und TGA erreicht. Die Module entstehen durch konsequente Trennung der unterschiedlichen Gestaltungsfelder wie Tragwerk, Hülle, Medien und Ausbau sowie durch die Ausstattung der Module mit standardisierten Schnittstellen [vgl. Reichardt 2001; Westkämper 1999a, 1999b; Dombrowski 2001; Wirth 2000a]. Die bisherigen starren und wenig wandlungsfähigen Fabrikkonzepte werden dadurch überwunden.

Neue **organisatorische Strukturen**, aufbauend auf teilautonomen Leistungseinheiten, führen durch deren konsequente Ausrichtung auf eine Veränderungs- und Optimierungsverantwortung zu einer operativ motivierten, erhöhten Veränderungsdynamik für Prozesse und Strukturen [vgl. Spath 2002; Wiendahl 2002c; Vollmer 2002; Wirth 2000a; Westkämper 1995; Warnecke 1992] und stellen per se einen Wandlungstreiber dar. Dies betrifft insbesondere die räumliche Struktur in Form der Anordnung. Die zugehörige Planungsaufgabe eignet sich in herausragender Weise für eine partizipative Durchführung mit aktiver Mitarbeitereinbindung.

Für die Anpassung der räumlichen Anordnung kann zusammenfassend von einer erhöhten Planungshäufigkeit und verkürzten Planungszyklen ausgegangen werden, die

in eine quasi kontinuierliche Planung münden [vgl. Spath 2002; Schulte 2001; Westkämper 2000a, 1999a; Benjaafar 2002; Eversheim 2001; Reinhart 2002]. Dies stellt an die Leistungsfähigkeit der zugehörigen Planungsprozesse erhöhte Anforderungen in Bezug auf Effizienz und Qualität [vgl. Bergholz 2002, S. 82; Wiendahl 2002b; Westkämper 2000a; Dombrowski 2001].

2.2.2 Wandlungstreiber in den Fabrikplanungsprozessen

Neben den Wandlungstreibern in den Wirksystemen der Produktionsbetriebe sind für die Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen die Wandlungstreiber im Bereich der übergeordneten Fabrikplanungsprozesse relevant. Diese Wandlungstreiber lassen sich entsprechend ihres Bezuges zu den Fabrikplanungsprozessen in drei Gruppen unterteilen (Abb. 2-4):

- Wandlungstreiber durch veränderten Aufgabenbezug
- Wandlungstreiber durch veränderten Objektbezug
- Wandlungstreiber durch veränderten Zeitbezug

Hinsichtlich des **veränderten Aufgabenbezugs** der Fabrikplanung sind für Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen zwei Tendenzen relevant (Abb. 2-5):

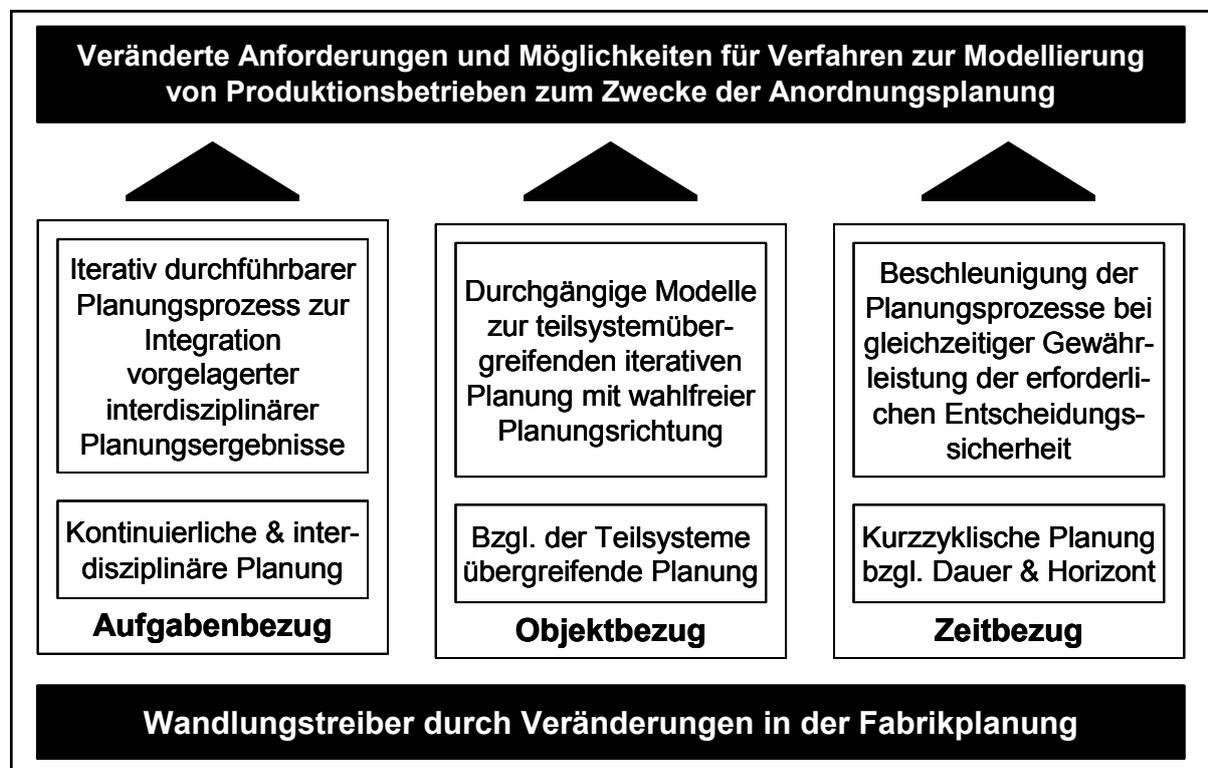


Abb. 2-4: Anforderungen an veränderte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen auf Basis der planungsseitigen Wandlungstreiber

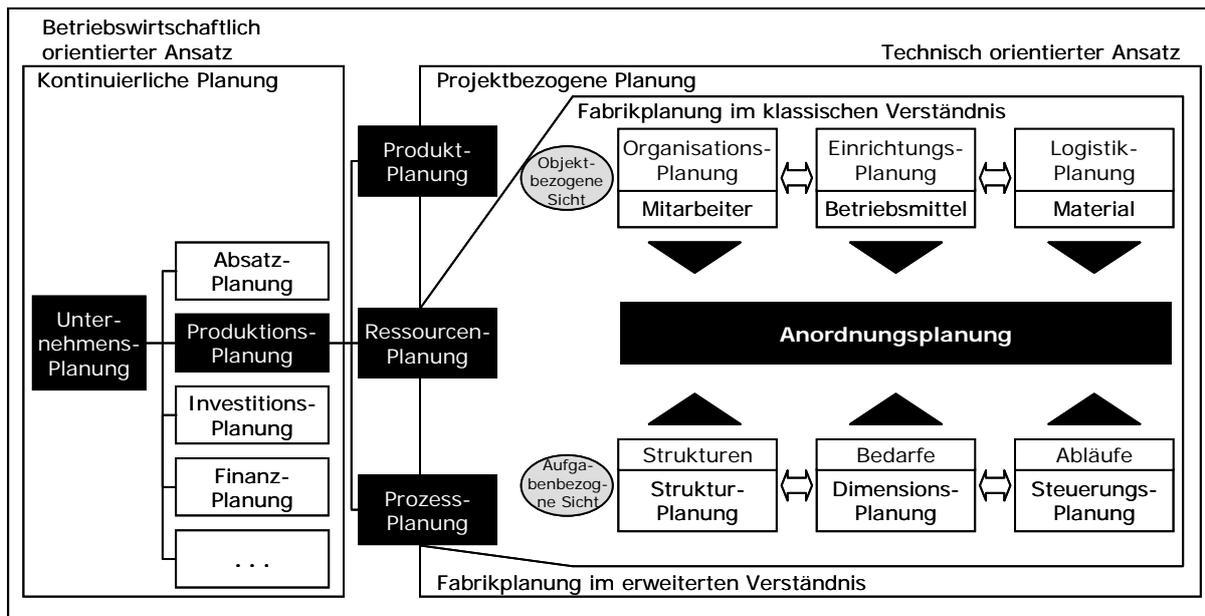


Abb. 2-5: Veränderter Aufgabenbezug der Fabrik- und Anordnungsplanung

- Zunehmende Einbeziehung der Produktplanung in die Fabrikplanung im Sinne einer integrierten Betrachtung von Produkt, Prozess und Ressource
- Zunehmende Integration betriebswirtschaftlich orientierter Ansätze in die originär technisch geprägte Fabrikplanung im Sinne interdisziplinärer Betrachtung

Die Verflechtung von **Produkt- und Produktionsplanung** treibt die Komplexität der gesamten Planung [vgl. Westkämper 2003a, S. 194; Bley 2001; Dowidat 2001; Linner 1999; Zuber 2001]. Handlungsalternativen werden so deutlich vielfältiger. Eine iterative Durchführung der Planungsschritte wird grundlegende Voraussetzung zur Sicherung einer hohen Qualität der Planungsergebnisse.

Die Integration **technischer und betriebswirtschaftlicher Betrachtungsweisen** bewirkt die Auflösung des projektbezogenen, einmaligen Charakters der traditionellen Fabrik- und Anordnungsplanung. Wie von den Aufgaben der Unternehmensplanung gewohnt, sind Planungsbereitschaft und -durchführung hiermit als kontinuierlich anzusehen [vgl. Gäse 2006; Westkämper 2003a, S. 194; Wöhe 2008, S. 350ff; Hoitsch 1993, S. 3450-3454]. Die planerischen Betrachtungen beziehen sich auf unterschiedlichste Produktionsfaktoren und sämtliche zugehörige Planungsaufgaben inklusive der peripheren Einrichtungen des sozio-technischen Gesamtsystems.

Der **veränderte Objektbezug** der Fabrikplanung wird unter anderem durch das »**Stuttgarter Unternehmensmodell**« repräsentiert [vgl. Westkämper 2006a, S. 51-61]. Es orientiert sich streng an den Gegebenheiten der Systemtheorie. Das Gesamtsystem wird dabei konsequent in Elemente und Relationen strukturiert. Als **Systemelemente** lassen sich sämtliche Ressourcen des sozio-technischen Systems »Fabrik« abbilden, auch periphere Einrichtungen. Als Systemelemente kommen in Frage:

- Technische Produktionseinrichtungen wie z. B. Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätze
- Periphere technische Einrichtungen wie z. B. System-, Ver- und Entsorgungssowie Gebäudetechnik
- Periphere nichttechnische Einrichtungen wie z. B. Pausen- und Sozialeinrichtungen sowie Einrichtungen der betreuenden Dienstleistungsfunktionen
- Organisatorische Zusammenfassungen der drei genannten Elementtypen

Im Rahmen der Anordnungsplanung werden speziell flächenbehaftete Elemente betrachtet. Elemente wirken durch **Relationen** aufeinander ein. Relationen sind beispielsweise Material, Information, Aufträge, Personal, Energie sowie weitere Wechselbeziehungen oder für den Fall der Anordnungsplanung speziell auch Lagebeziehungen. Mehrere Elemente und Relationen lassen sich durch Definition einer Systemgrenze zu einem System zusammenfassen. Die resultierenden Systeme der Fabrik weisen eine hierarchische Grundstruktur auf. Jedes System höherer Ordnung lässt sich demzufolge in mehrere Subsysteme untergliedern. Zur Untergliederung in Subsysteme kommen unterschiedliche Skalen zur Anwendung. Als vertikale Skala wird in der Fabrikplanung häufig eine Art »Detaillierungsgrad« verwendet [vgl. Westkämper 2006a, S. 55; 2003a, S. 194; Wiendahl 2000, S. 45; Warnecke 1999, S. 9-67]. Die Skalierbarkeit des Modells ermöglicht Betrachtungen des Systems entsprechend unterschiedlicher Werte dieser Skala, also letztlich mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Hinsichtlich der Relationen sind folgende Typen zu unterscheiden:

- Relationen zwischen System- bzw. Subsystemelementen
- Relationen zwischen Elementen unterschiedlicher (Sub-)Systeme
- Relationen zwischen System- und Umweltelementen

Die Skala »Detaillierungsgrad der Produktionsfunktion« führt auf den hierarchischen Systemebenen vom Produktionsnetzwerk über Produktionsstandort, Produktionssegment, Produktionssystem, Produktionszelle bis hin zu den Produktionseinrichtun-

gen bzw. Arbeitssystemen und deren Systemelementen (Abb. 2-6). Jeder dieser Ebenen entspricht eine Aufgabe der Fabrikplanung im Allgemeinen bzw. der Anordnungsplanung im Speziellen. So beschäftigt sich die Generalstrukturplanung mit der Anordnung von Produktionssegmenten, die Bereichsplanung mit der Anordnung von Produktionssystemen, die Abteilungsplanung mit der Anordnung von Produktionszellen sowie die Zellenplanung mit der Anordnung der Arbeitssysteme, bestehend aus Betriebsmitteln sowie Arbeitsplätzen. Vor dem Hintergrund einer kontinuierlichen und rollierenden Durchführung der Planung wird die Integration der Planungsaufgaben im Sinne von iterativen Planungsschritten zur wesentlichen Herausforderung für die Planungsmodelle. Diese bezieht sich auf die Teilsysteme der verschiedenen Systemebenen. Lediglich mit einem Höchstmaß an Durchgängigkeit und Systematik der Modelle über die Systemebenen hinweg werden die geforderte Stimmigkeit der gesamten Planung und die wahlfreie Anwendung von Top-down- und Bottom-up-Vorgehensschritten gewährleistet.

Hinsichtlich des **veränderten Zeitbezugs** der Fabrikplanung ist aufgrund externer Turbulenzen insbesondere mit einer drastischen Verkürzung der Wirkdauer der Ergebnisse der Planung zu rechnen. Dadurch erhöht sich zum einen die Planungshäu-

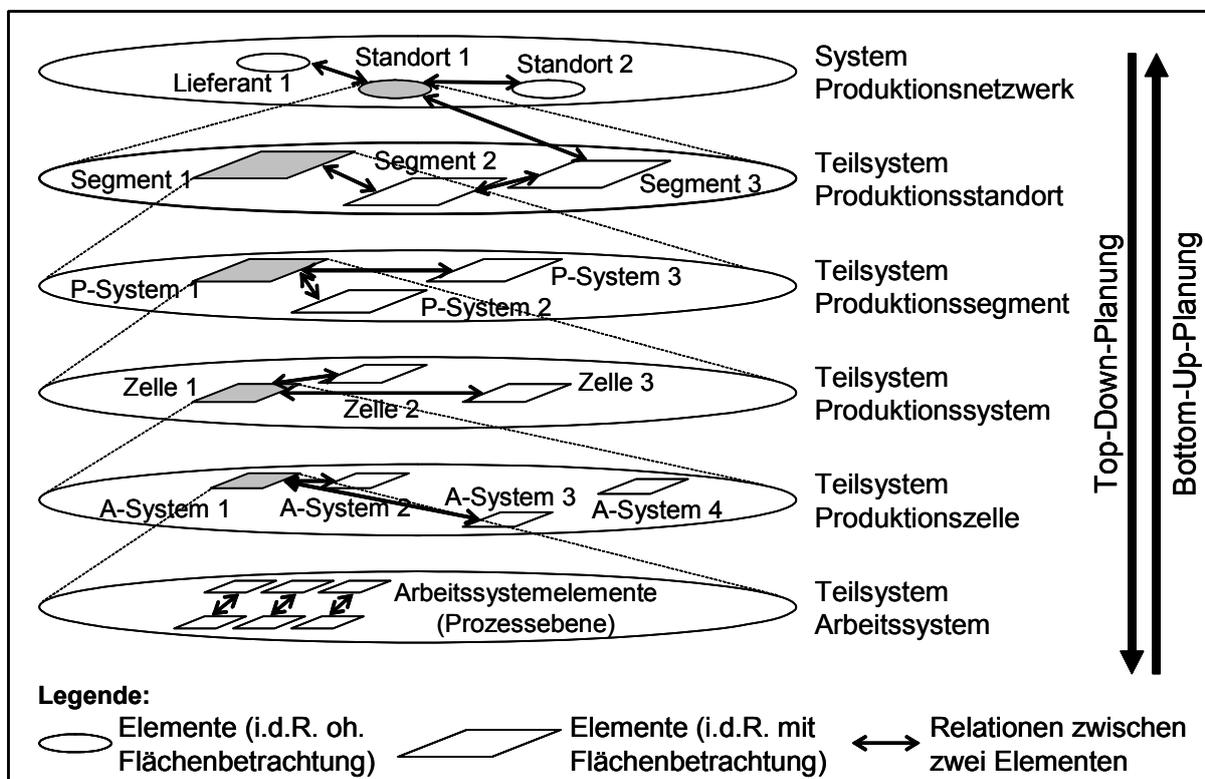


Abb. 2-6: Veränderter Objektbezug der Fabrik- und Anordnungsplanung entsprechend dem »Stuttgarter Unternehmensmodell«

figkeit [vgl. Gäse 2006; Westkämper 2001a; Vollmer 2001], zum anderen ist eine verkürzte Planungsdauer erforderlich. Das Vorhalten eines umfassenden und übergreifenden, durchgängigen und systematischen Planungsmodells unterstützt die kurzfristige Planungsbereitschaft. Es sichert die schnelle Planungsdurchführung und Umsetzung deren Ergebnisse [vgl. Gäse 2006; Wiendahl 2002b; Westkämper 1999a, 2000a, 2003a, 2004a, S. 194; Dombrowski 2001]. Die Anforderung bezieht sich auf alle Planungsphasen von der planungsfallspezifischen Beschreibung der Modellobjekte über die Variantenplanung und -bewertung bis hin zur Entscheidungsfindung. Gleichzeitig verändert sich der bisher vorwiegend strategisch-taktische Planungshorizont der Anordnungsplanung in Richtung eines taktisch-operativen Horizontes.

Zukünftige Anforderungen und Möglichkeiten der Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen werden durch die beschriebenen, externen und internen Wandlungstreiber massiv beeinflusst. Der Einfluss lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Kontinuierliche Anpassungsnotwendigkeit führt zu kürzeren Planungszyklen, größerer Planungshäufigkeit und schnellerer Planungsdurchführung:
 - Ständige Planungsbereitschaft bei erweiterten Abbildungsmöglichkeiten anordnungsplanungsspezifischer Details
 - Parallele Durchführung von Planungsteilaufgaben bei verbesserter Durchgängigkeit und Systematik der gesamten Planung
- Beherrschung der hohen Planungskomplexität erfordert die Integration interdisziplinärer Sichten:
 - Möglichkeit zur Abbildung interdisziplinärer Aspekte und zur ganzheitlichen Betrachtung
 - Sichere Entscheidungsfindung bei interdisziplinärer Sicht
- Zahlreiche Planungsanlässe in den unterschiedlichen Teilsystemen der Produktionsbetriebe erfordern die Integration der Planungsaufgaben auf den verschiedenen Planungsebenen:
 - Iterative Durchführung der Planungsteilaufgaben unterschiedlicher Planungsebenen bei jederzeit freier Wahl und Änderbarkeit der Planungsrichtung
 - Erhöhte Anzahl von Planungsvarianten und erhöhte Anforderungen an die vergleichende Bewertung derselben

3 Begriffe und Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Ausgehend vom allgemeinen produktionstechnischen Verständnis werden nun aufbauend auf einem spezifischen Begriffsverständnis die Anforderungen an Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen systematisch hergeleitet. Diese bilden die Grundlage für die nachfolgende Bewertung des Standes der Technik und legen gleichzeitig die Entwicklungsziele für das verbesserte Modellierungsverfahren fest.

3.1 Begriffserläuterungen und Begriffsbestimmungen

3.1.1 Räumliche Anordnungen in Produktionsbetrieben

Der Begriff »**räumliche Anordnung**« wird in der Literatur unterschiedlich definiert [vgl. Brockhaus 1999 »Anordnung«; Duden 2003a; Gabler 1993 »Layout«]. Gemeinsamkeit ist dabei die »Zusammenfügung räumlich getrennter, aber gleichzeitig wirkender materieller Teile zu einem festen Ganzen, das einem bestimmten Zweck dient. Hierbei ist die räumliche Lage der einzelnen Elemente festgelegt« [vgl. Brockhaus 1999; Bölte 1994, S. 1; Aggteleky 1990a, S. 587]. Für Produktionsbetriebe sind dies die innerbetrieblichen Elemente, also flächenbehaftete Potentialfaktoren und Arbeitssysteme [vgl. Wiendahl 2000, S. 69f; Gabler 1993, S. 2064; Aggteleky 1990a, S. 586f]. Eine räumliche Anordnung ist als günstig anzusehen, wenn sie den vorgegebenen Zweck optimal unterstützt. Die Qualität hängt hierbei insbesondere von den Beziehungen zwischen den Elementen ab [vgl. Westkämper 2003a, S. 197; Grundig 2000, S. 142; Wirth 2000b, S. 8; Warnecke 1999, S. 9-11; Aggteleky 1990a, S. 586f]. Die Anordnung ist danach optimal gestaltet, wenn die Elemente so angeordnet sind, dass ihre wechselseitigen Beziehungen die gegebenen Ziele bestmöglich unterstützen. Hierbei können von der absoluten oder relativen Anordnung der Elemente abhängige Beziehungen und operative Zielgrößen relevant sein [vgl. Westkämper 2003a, S. 197]. Eine optimierte räumliche Anordnung ist Voraussetzung für eine technisch und wirtschaftlich optimale Leistungserstellung [vgl. Warnecke 1999, S. 9-81; Kettner 1984, S. 227]. Der Begriff der räumlichen Anordnung wird sowohl für das Realsystem, also den Produktionsbetrieb selbst, als auch für dessen modellhaftes Abbild verwendet.

Ein derartiges modellhaftes Abbild des Produktionsbetriebs wird im Folgenden als **Modell** bezeichnet [nach Scheer 2003, S. 741; VDI 3633]. Es stellt ein abstrahiertes Abbild der Realität dar, bei dem die Realwelt auf den interessierenden Bereich, das so genannte Objektsystem, eingegrenzt wird [vgl. Scheer 2003, S. 740]. Dieses Modell unterscheidet sich in den untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild [vgl. VDI 3633, S. 3]. Am Modell gewonnene Erkenntnisse lassen sich daher auf das Realsystem übertragen [vgl. VDI 3633, S. 2; Wiendahl 2000, S. 78; Warnecke 1999, S. 9-8].

Die problemspezifische Überführung des realen Systems in das Modell, ausgehend vom Untersuchungsziel, wird als **Modellierung** bezeichnet [vgl. VDI 3633, S. 14; Rabe 2003, S. 5]. Sie erfolgt unter Verwendung des **Modellierungsverfahrens** [vgl. Scheer 2003, S. 740; Rabe 2003, S. 5; VDI 3633, S.15, 18]. Dieses stellt das Beschreibungssystem und das Vorgehen zur Beschreibung bereit (Abb. 3-1) [vgl. Rabe 2003, S. 5; Spur 1994, S. 115, 131]. Das Beschreibungssystem setzt sich aus Beschreibungsmitteln sowie den Regeln zur Auswahl und Kombination derselben zusammen. Diese Beschreibungsmittel enthalten ihrerseits den eigentlichen Satz der spezifischen Konstrukte, die flächenbehafteten Elemente, und die Regeln zu deren Verknüpfung [vgl. Rabe 2003, S. 5; Spur 1994, S. 124]. Grundlage der Verknüpfung sind die Beziehungen zwischen den flächenbehafteten Elementen.

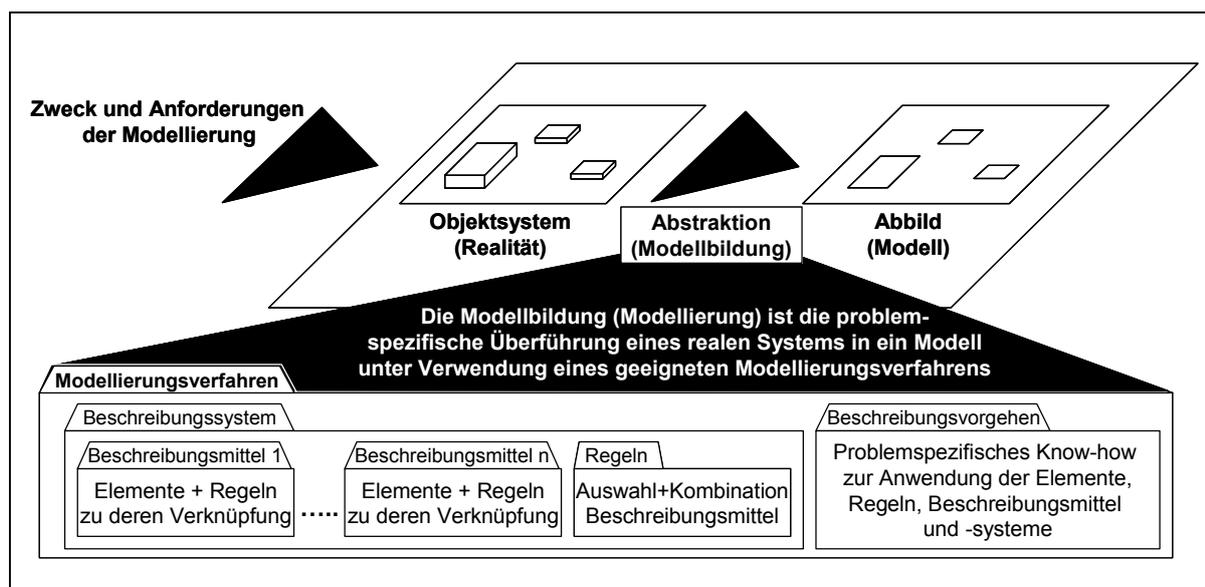


Abb. 3-1: Abbildung der Realität in einem Modell unter Verwendung eines Modellierungsverfahrens

Eine skalierbare Modellierung setzt eine konsequente Orientierung an systemtechnischen Grundsätzen voraus [vgl. Warnecke 1999, S. 9-7]. Daher wird nachfolgend unter »**System**« eine abgegrenzte Menge an Elementen verstanden, die miteinander in Beziehung stehen. Die Elemente wirken über Relationen aufeinander ein. Die statische Systemausprägung definiert sich durch vier Aspekte [vgl. Westkämper 2006a, S. 51-61; Scheer 2003, S. 740; VDI 3633; Warnecke 1999, S. 9-7]:

- Grenze zur Umwelt mit resultierenden Eingangs- und Ausgangsgrößen
- Struktur aus Elementen und deren wechselseitigen Beziehungen
- Zustand der untersuchungsrelevanten Attribute aller Systembestandteile, d. h. der Elemente und der Beziehungen
- Hierarchie aus selbstähnlichen Subsystemen unterschiedlicher Ordnung

Für die räumliche Anordnung bildet der fabrikplanerische Untersuchungsbereich die Systemgrenze. Die flächenbehafteten Elemente und deren Beziehungen untereinander geben die Struktur vor. Der Systemzustand resultiert aus den anordnungsrelevanten Attributen. Die Hierarchie definiert die planerische Rangreihe der Elemente bzw. planerisch gleichwertige Elemente [vgl. Westkämper 2003a, S. 197; Gäse 2006; Günther 2005, S. 7]. Objektorientierte Methoden ermöglichen den Zugriff auf die Attribute von Elementen und Beziehungen [vgl. Scheer 2003, S. 751].

Betrachtete **Elemente** sind v. a. folgende Teilsysteme des Produktionsbetriebs: Produktionstechnik (z. B. Maschinen, Anlagen, Arbeitsplätze), Logistik (z. B. Systeme, Funktionen und Transportwege), organisatorische Einheiten (z. B. Abteilungen, Meister- und Teambereiche sowie Kostenstellen), Nebennutzungen (z. B. periphere Funktionen des sozio-technischen Gesamtsystems), Infrastruktur (z. B. Ver- und Entsorgungseinrichtungen, Leitungstrassen sowie TGA), Bautechnik (z. B. Geschosse, Wände, Räume, Brandabschnitte, Stützen, Fundamente, Kranbahnen, Treppen, Aufzüge, Türen, Tore, Rampen, Durchfahrten, Fenster sowie Boden- bzw. Deckentragfähigkeiten) und Grundstück (z. B. Baugrundqualität, Gebäude, Erschließungs- und Erweiterungszonen sowie Verkehrsanschlüsse und -flächen). Die definierte Planungsaufgabe erfordert sowohl die Abbildung der physischen als auch der logischen Aspekte der Elemente. Die physischen Aspekte betreffen die Modellierung der Elementfläche im engeren Sinne, die der logischen Aspekte sämtliche die Anordnung beeinflussenden Attribute und Beziehungen.

Die relevanten **Beziehungen** zwischen den flächenbehafteten Elementen lassen sich in drei grundsätzlich unterschiedliche Klassen unterteilen:

- Austauschbeziehungen zur Beschreibung der diversen Flusssysteme [vgl. Grundig 2000, S. 13, 151; Kettner 1984, S. 226; Wirth 2000b, S. 20]
- Anforderungsbeziehungen zur Beschreibung der Bedarfe hinsichtlich diverser Faktoren [nach Gabler 1993, S. 2064; Bea 1994, S. 82]
- Zuordnungsbeziehungen zur Beschreibung diverser Zusammenfassungen [vgl. Wiendahl 2000, S. 49-53; Wildemann 1999, S. 15-61f]

Anordnungsbeeinflussend können Beziehungen zwischen Elementen immer dann sein, wenn sie sich auf geometrische Größen wie Drehlage bzw. Orientierung (0-dimensional), Entfernung bzw. Abstand (1-dimensional) oder aus Zuordnungen²¹ bzw. Schnitten²² resultierende Flächen (2-dimensional) zurückführen lassen. Die Abbildung der Realsystemelemente und deren Beziehungen untereinander erfordert die in Abb. 3-2 dargestellten Betrachtungsumfänge. Aus der Abbildung sind die wesentlichen Quellen für die anordnungsrelevanten Beziehungen erkennbar.

3.1.2 Planung räumlicher Anordnungen von Produktionsbetrieben

Unter »**Planung**« wird nachfolgend ein geordneter, Information verarbeitender Prozess zur Erstellung eines Entwurfs verstanden, der Größen für das Erreichen von Zielen vorausschauend festlegt. Oberster Zweck der Planung ist, ein wirkungsvolles Instrument zur Erreichung von Zielen zu sein, d. h. die Mittel, Alternativen sowie Chancen und Risiken der Zielerreichung rechtzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen auszuwählen [vgl. Bea 1993, S. 21f]. Ergebnis der Planung ist ein Plan.

Hauptaufgabe der **Anordnungsplanung** ist es, die überwiegend abstrakten Ergebnisse der vorgelagerten Planungsschritte in konkrete, grundrissmäßig und räumlich definierte Form zu überführen. Dabei sind unterschiedliche Anforderungen und verschiedenste Aspekte, z. B. betriebliche und bauliche, so gegenseitig abzustimmen bzw. zu harmonisieren, dass das ökonomische Prinzip möglichst optimal erfüllt wird.

²¹ Eine »Zuordnung« zweier flächenbehafteter Elemente liegt dann vor, wenn das größere Element das kleinere komplett umschließt.

²² Ein »Schnitt« zweier flächenbehafteter Elemente liegt vor, wenn beide gemeinsame Punkte haben, aber keine Zuordnung vorliegt (d. h. größeres Element umschließt kleineres **nicht** komplett).

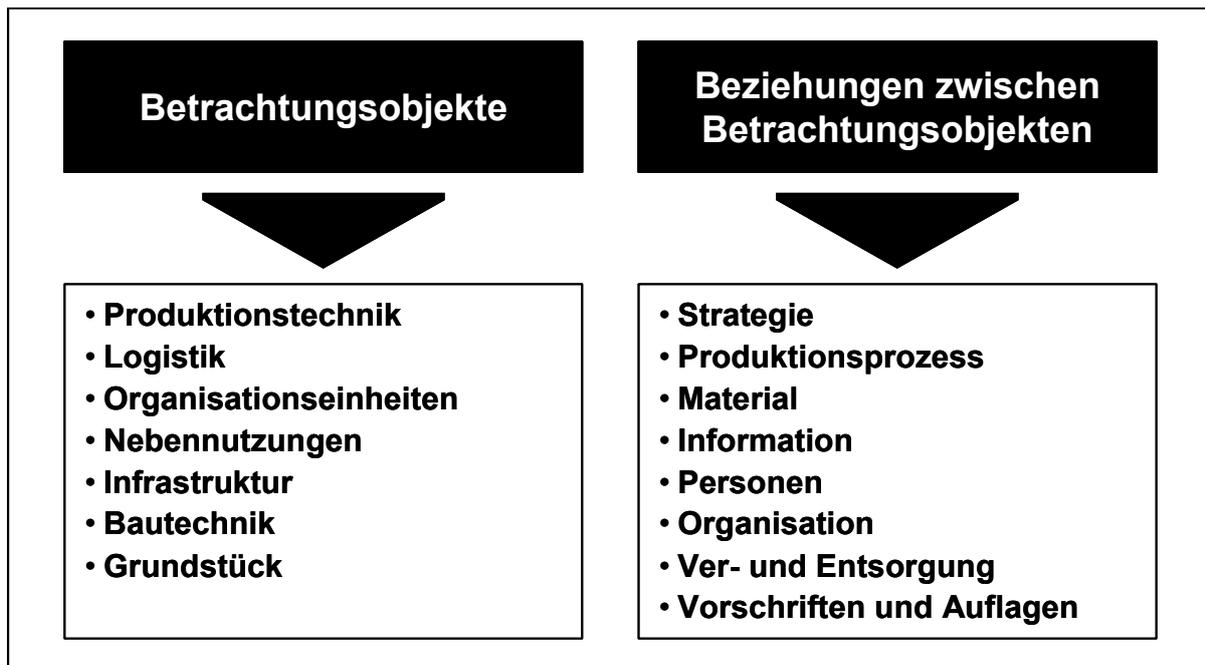


Abb. 3-2: Betrachtungsumfang zur Modellierung räumlicher Anordnungen

Die Anordnungsplanung lässt sich zusammenfassend als technisch-organisatorische Optimierungsaufgabe auffassen, bei der in einem spezifischen, durch die übergeordnete Aufgabenstellung und die damit verbundenen Zielsetzungen vorgegebenen, konkreten Kontext, die geometrischen Bestimmungsgrößen der relevanten Elemente des Produktionsbetriebs festgelegt werden. Die Optimierung verfolgt dabei unterschiedlichste, spezifische Ziele, die unter Berücksichtigung gegebener Restriktionen bzw. Randbedingungen bestmöglich zu erfüllen sind. Die Optimierung fokussiert dabei vor allem auf die Beziehungen der Elemente untereinander. Anordnungsbeeinflussende Beziehungen können analog zur relativen Ausprägungsform der geometrischen Bestimmungsgrößen 0-, 1- oder 2-dimensionalen Charakter haben (Abb. 3-3).

Die Einbindung der Anordnungsplanung mit ihrem interdisziplinären Charakter und ihren Wechselbeziehungen in den übergeordneten Planungsprozess lässt sich anhand eines 2-dimensionalen, durch Detaillierungsgrad und Planungsteilaufgabe aufgespannten **Planungsraums** veranschaulichen. Zur Beherrschung der komplexen Zusammenhänge und der verschiedenen Zeithorizonte finden sich zahlreiche Ausführungen zur Notwendigkeit einer iterativen Planung [vgl. Grundig 2000, S. 22, 147; Jünemann 1999, S. 16-7; Warnecke 1999, S. 9-5; Aggteleky 1990a; S. 586; Kettner 1984, S. 4, 226]. Diese Art der Planung bezeichnet ein Vorgehen, das den Detaillierungsgrad der Betrachtung mehrstufig variiert und die Ergebnisse jedes Planungs-

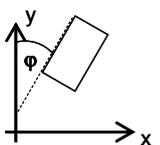
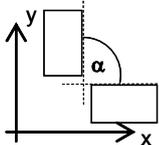
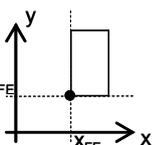
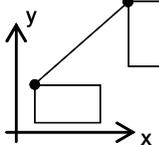
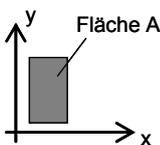
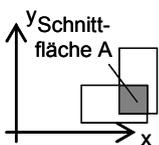
Bestimmungsgrößen Anordnung	Charakter der Bestimmungsgrößen		Optimierung (Ziele)	Restriktionen (Randbedingungen)
	absolut	relativ		
Drehlage (0-dimensional)			Optimierte Drehlage	Zulässige Drehlage
Position bzw. Entfernung (1-dimensional)			Optimierte Position bzw. Entfernung	Zulässige Position bzw. Entfernung
Fläche, Schnitt, Zuordnung (2-dimensional)			Optimierte(r) Fläche, Schnitt, Zuordnung	Zulässige(r) Fläche, Schnitt, Zuordnung

Abb. 3-3: Geometrische Bestimmungsgrößen der Anordnungsplanung

schrittes in den Kontext der vor- bzw. nachgelagerten stellt. Zielsetzung ist die schrittweise Reduktion der Lösungsvarianten bei zeitgleicher Überprüfung der Stimmigkeit der jeweiligen Planungsergebnisse (Abb. 3-4) [vgl. Jünemann 1999, S. 16-7; Aggteleky 1990a, S. 586]. Die Variation der Bestimmungsparameter der Planung kann in analytischen **Top-down-** (vgl. Abb. 3-4) oder synthetischen **Bottom-up-Vorgehensschritten** erfolgen [vgl. Grundig 2000, S. 20; Warnecke 1999, S. 9-10; Bischoff 2001, S. 212; Kettner 1984, S. 10]. Im Spannungsfeld hoher Komplexität, kontinuierlicher Planungsdurchführung und operativer Planungshorizonte kann lediglich eine jederzeit wahlfreie Variation der Planungsrichtung in Form einer beliebigen Abfolge von Top-down- und Bottom-up-Schritten zu einer vollwertigen Iterationsfähigkeit und somit zu einer hinreichenden Qualität der Planungsergebnisse führen [vgl. Bischoff 2001, S. 212; Grundig 2000, S. 20; Warnecke 1999, S. 9-10, 9-57].

Konkrete Planungsteilaufgaben mit Anordnungsbezug sind z. B. General-, Gebäude-, Bereichs- und Betriebsmittelstrukturplanung [vgl. Bischoff 2001, S. 211; Warnecke 1999, S. 9-60, 9-67; Wiendahl 2000, S. 45; Wirth 2000b, S.13; Kettner 1984, S. 10]. Bei Ausplanung nach dem Top-down-Ansatz erfolgt die nächst detailliertere Planungsaufgabe jeweils innerhalb des aus dem vorherigen Planungsschritt resultieren-

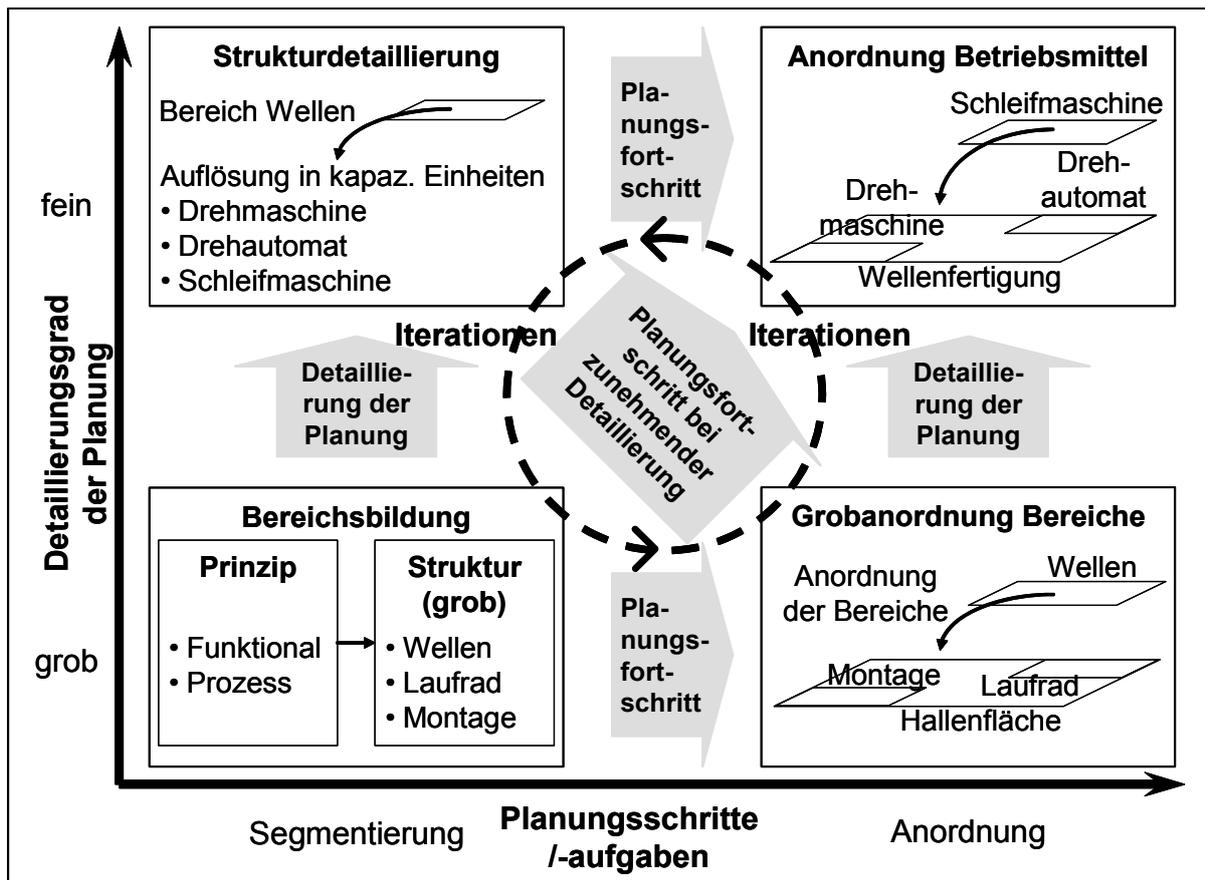


Abb. 3-4: Iterative Planung im durch die Skalen Detaillierungsgrad und Planungsaufgabe aufgespannten Planungsraum

den Bereiches. Die Generalstrukturplanung ordnet z. B. Betriebsgebäude und Nutzflächenkomplexe dem Betriebsgelände räumlich zu, die Gebäudestrukturplanung Betriebsbereiche den Gebäuden und Nutzflächenkomplexen, die Bereichsstrukturplanung Produktionseinheiten den Betriebsbereichen und die Betriebsmittelstrukturplanung schließlich Arbeitsplätze und technische Systeme den Produktionseinheiten [vgl. Bischoff 2001, S. 211; Wirth 2000b, S. 13f; Warnecke 1999, S. 9-67]. Das Modellierungsverfahren hat hierzu eine **Anordnungshierarchie** bereitzustellen [vgl. Gäse 2006]. Die Zuordnungsstruktur lässt sich durch Ausprägung spezifischer Beziehungen zwischen den Elementen der jeweiligen Elementklassen definieren.

Die Abbildung der Objekte des Realsystems und deren Beziehungen macht die in Abb. 3-5 dargestellten Eigenschaften notwendig. Eine iterative und durchgängige Planung wird lediglich mit einer einheitlichen Beschreibung aller Elemente und Beziehungen in Form eines jeweils einheitlichen Attributsatzes gewährleistet.

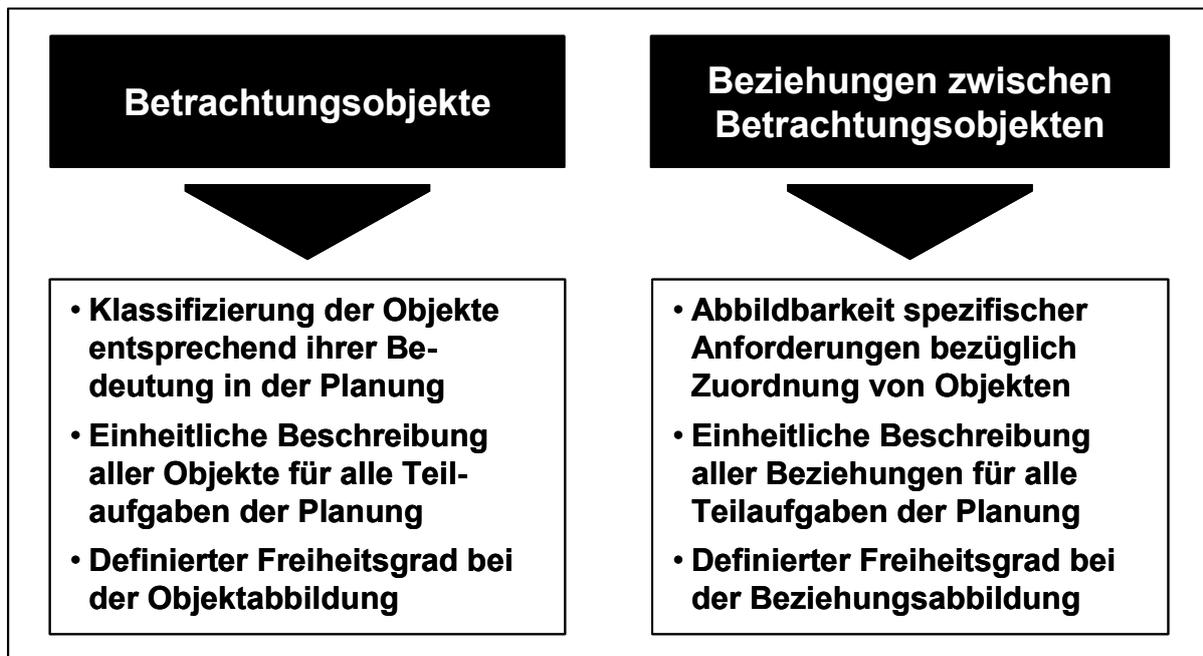


Abb. 3-5: Notwendige Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der zugrunde liegenden Planungsaufgabe

3.1.3 Skalierbarkeit im Rahmen der Planung räumlicher Anordnungen

Unter einer Skala wird entsprechend dem deutschen Wörterbuch eine Maßeinteilung verstanden [vgl. Duden 2003b]. Skalierbarkeit liegt bei einem Modellierungsverfahren daher genau dann vor, wenn die resultierenden Modelle fähig sind, verschiedene Punkte von Maßeinteilungen bzw. Skalen durchgängig und konsistent abzudecken [vgl. Wikipedia 2007; BMBF 2006]. Die **Skalierbarkeit** bezeichnet im Folgenden die Fähigkeit eines Systems, sich spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Planungspunkte auf einer oder mehreren planungsrelevanten Skalen flexibel anpassen zu können und dabei über die Variation der Betrachtungspunkte hinweg eine konsistente, d. h. eine jederzeit durchgängige und widerspruchsfreie Abbildung des Real-systems zu gewährleisten.

Relevante Skalen zur Modellierung räumlicher Anordnungen in Produktionsbetrieben (Abb. 3-6) sind vor allem Strukturebene, Detaillierungsgrad, Planungshorizont und Wirkungszeit der Planungsergebnisse [vgl. Westkämper 2001b, S. 305; Briel 2002, S. 39 2f; Westkämper 2004c, S. 48, 50; Westkämper 2004b, S. 15f]. Die genannten Skalen sind nicht komplett unabhängig bzw. entkoppelt, sondern teilweise korreliert. Die Anordnungsplanung erscheint im Kontext der beschriebenen Skalen nicht mehr

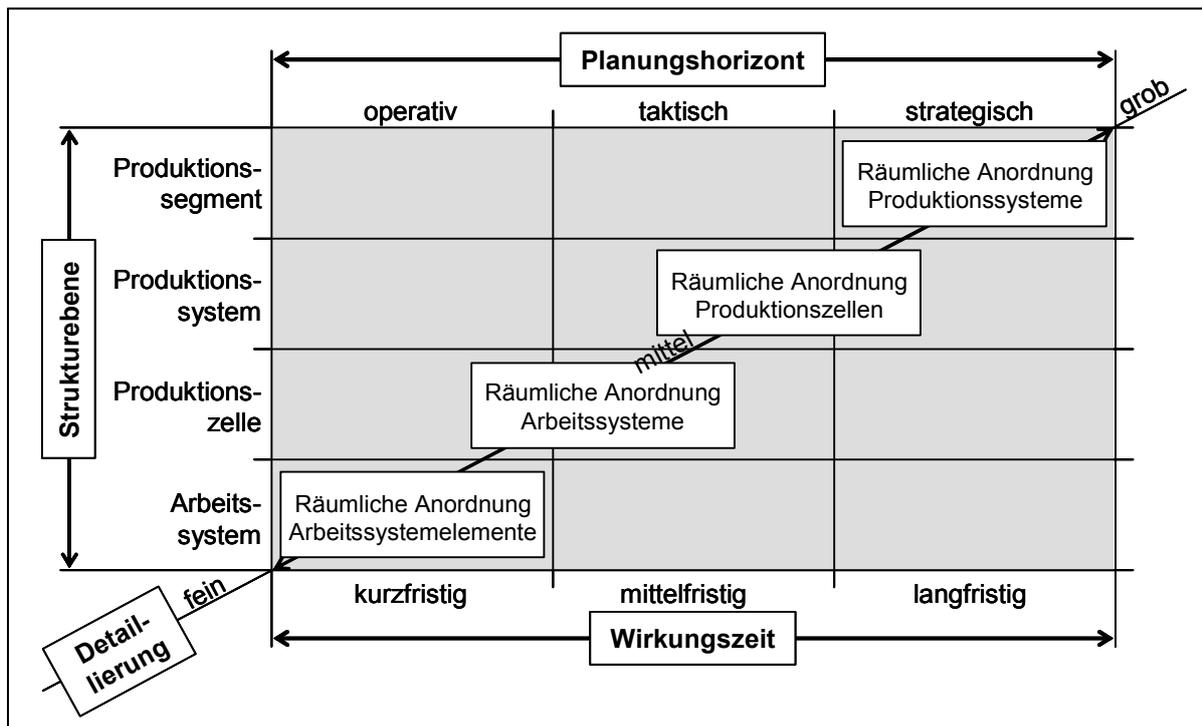


Abb. 3-6: Skalen zur Beschreibung von Anordnungsplanungsteilaufgaben

als singuläre Planungsaufgabe, sondern als Bestandteil eines »Planungsnetzes«, das sich aus unterschiedlichen Teilaufgaben im Rahmen des gesamten Planungsablaufs, aus unterschiedlichen Detaillierungsgraden bei der Betrachtung der Strukturen sowie aus unterschiedlichen zu betrachtenden Planungshorizonten ergibt (Abb. 3-7).

Eine skalierbare Modellierung integriert sämtliche Teilaufgaben der Planung. Im Rahmen der Anordnungsplanung ist skalienübergreifend die Anordnung von Arbeitssystemelementen, Arbeitssystemen und Produktionszellen sowie Produktionssystemen und Betriebsbereichen zu unterstützen. Operative Anforderung an das Modellierungsverfahren ist die Bereitstellung von Konstrukten, die in der Lage sind, die Ergebnisse der vorgelagerten Planungsaufgaben im Rahmen der Anordnungsplanung abbilden zu können. Derartige vorgelagerte Planungsergebnisse sind beispielsweise Vorgaben hinsichtlich der

- Ziele und Randbedingungen (Strategische Planung)
- Prozessabläufe (Prozessplanung), technischen Systeme (Ressourcenplanung)
- Strukturen und Zusammenfassungen (Segmentierung)
- Auftragslasten, Lasten Infrastruktur (Lastdimensionierung, Leistungsplanung)
- Flächenbedarfe (Ressourcen- und Flächendimensionierung)

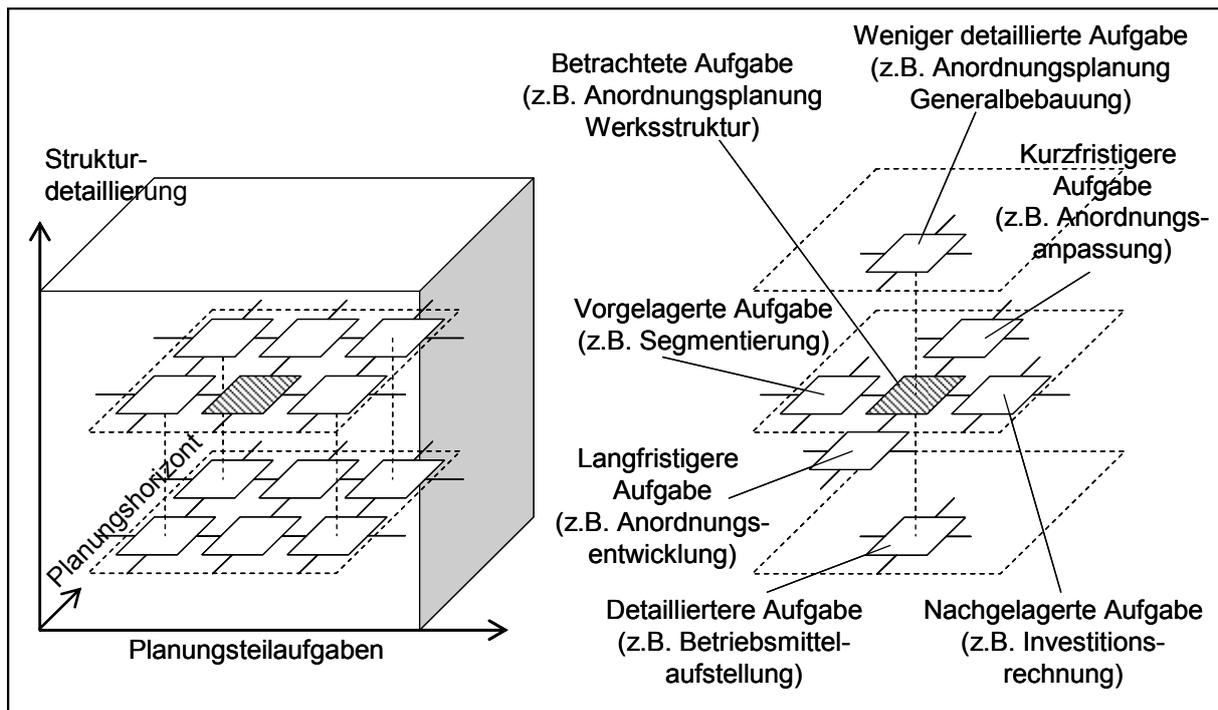


Abb. 3-7: Darstellung der Anordnungsaufgabe im Planungsnetz

Die konsistente Integration über alle planungsrelevanten Skalen hinweg bietet aufgrund der Ganzheitlichkeit der Betrachtung sowie der Vermeidung von Schnittstellen und daraus resultierenden Informationsverlusten erhebliche Vorteile hinsichtlich Qualität und Akzeptanz der Planungsergebnisse. Die skalierbare Modellierung wirkt außerdem Aufwand reduzierend und beschleunigt die Planungsprozesse so, dass sich sowohl die Planungsdauer wie auch der Planungsaufwand reduzieren lassen. Die Skalierbarkeit macht hinsichtlich der Abbildung der Realsystemelemente und deren Beziehungen untereinander die in Abb. 3-8 dargestellten Eigenschaften notwendig.

3.1.4 Bewertung räumlicher Anordnungen von Produktionsbetrieben

Die eingangs beschriebenen Wandlungstreiber sowie die große Komplexität und Bedeutung der Anordnungsplanung erfordert eine höchst leistungsfähige Bewertung mit **multikriterieller Logik** und umfangreichen Gestaltungsmöglichkeiten durch den Planer [vgl. Benjaafar 2002, S. 1f; Meller 1996a, S. 354f; Bölte 1994, S. 8-17; Wäscher 1982, S. 88]. Eine relative Bewertung hat im Regelfall Vorrang vor einer absoluten Bewertung. Die Einschränkung auf Materialfluss und Transport, wie in der Vergangenheit, ist der Anordnungsaufgabe in keinster Weise mehr angemessen. Daher soll hier unabhängig von der durchgängig algorithmischen Optimierbarkeit herkömmlicher

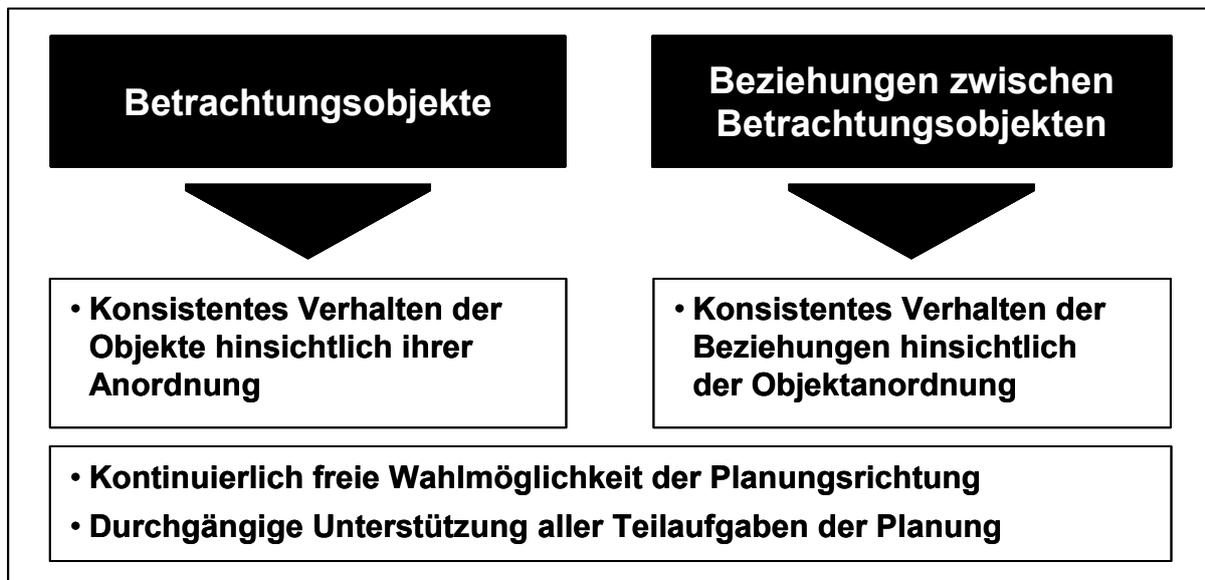


Abb. 3-8: Notwendige Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der Anforderungen der Skalierbarkeit

Verfahren stets von einer integrierten Anordnungsbewertung unter Betrachtung folgender **Zielkomplexe** ausgegangen werden:

- Ziele des Ausführungssystems der Produktion [vgl. Hoitsch 1993, S. 3450f]²³
- Ziele des Führungssystems der Produktion [vgl. Hoitsch 1993, S. 3450f] mit den Teilfunktionen operative Planung, Steuerung bzw. Führung und Kontrolle
- Ziele der Strukturplanung auf den unterschiedlichen hierarchischen Ebenen
- Resultierende Ziele aus den verschiedenen Teilsystemen des Produktionsbetriebes (z. B. Produktion, Logistik, Organisation, Infrastruktur, Bautechnik)
- Resultierende Ziele aus interdisziplinären Betrachtungen (z. B. technisch, organisatorisch, arbeitsrechtlich, baulich bzw. architektonisch, ergonomisch)

Bewertungsrelevant sind Ziele per definitionem dann, wenn sie sich auf die beschriebenen 0-, 1- oder 2-dimensionalen Bestimmungsgrößen zurückführen lassen, die in der Anordnungsplanung bzw. mit der eigentlichen Anordnung definiert werden. Andere Größen sind bezüglich der Anordnungsplanung invariant. Bezüge zwischen invarianten Größen und Bestimmungsgrößen sind allerdings möglich. Als Bestandteil des Modellierungsverfahrens sind daher möglichst frei gestaltbare und leistungsfähige **Bewertungsmethoden** in Form mathematischer Verknüpfungen und entsprechende Anwendungsregeln gefragt. Der Bewertung müssen monetär wie auch nicht-monetär

²³ Das Ausführungssystem bezieht sich dabei auf die Produktion im engeren Sinne.

bewertbare Faktoren zur Beschreibung von Aufwands- und Nutzenkriterien zugänglich gemacht werden. Die Bewertungsergebnisse beziehen sich auf Einzelbeziehungen wie auch auf deren Aggregation zum Gesamtzielwert²⁴ [vgl. Grundig 2000, S. 174 2f; Wirth 2000b, S. 37; Warnecke 1999, S. 9-27f; Aggteleky 1990a, S. 322-331].

Essenziell ist darüber hinaus, dass sich Beziehungen sowohl als Ziele wie auch als Randbedingungen ausprägen lassen. Als **Ziele** ausgeprägte Beziehungen beeinflussen direkt Einzelzielwerte bzw. den Gesamtzielwert einer Anordnung. Sie sind somit unmittelbar Gegenstand der Optimierung. **Randbedingungen** dagegen werden jeweils separat auf ihre Erfüllung überprüft. Nichterfüllung bedingt unmittelbar die Unzulässigkeit der Gesamtanordnung. Diese Beziehungen sind ebenfalls Gegenstand der Optimierung, gehen jedoch nicht in die Zielwerte der jeweiligen Anordnung ein.

Abb. 3-9 zeigt unterschiedliche Ausprägungen von Beziehungen, spezifiziert ihre Wirkung und veranschaulicht diese mittels Beispielen aus dem Produktionsbetrieb. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Ausprägung als Ziel oder Randbedingung, zu-

Be- stim- mungsgrößen	Art der Ausprägung der Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen			
	Beziehungen als Ziele		Beziehungen als Randbedingungen	
	Wirkung	Beispiel	Wirkung	Beispiel
Drehlage (0-dimensional)	Positive Bewertung	Möglichst identisch orientierte Maschinen (z.B. Mehrmaschinen-Bedienung)	Unzulässigkeit	Ausschluss nicht identisch orientierter Maschinen (z.B. schlechte Bedienbarkeit)
	Negative Bewertung	Möglichst keine unterschiedlich orientierten Arbeitsplätze (z.B. wg. Materialandienung)	Unzulässigkeit	Ausschluss identisch orientierter Arbeitsplätzen (z.B. ungünstige Wege)
Abstand bzw. Entfernung (1-dimensional)	Zentralisierend	Möglichst kurze Wege für Materialfluss (z.B. wegen geringem Transportaufwand)	Unzulässigkeit (zentralisierend)	Abstandsbeschränkung für zusammengehörige Elemente (z.B. Maschinen einer Meisterei)
	Dezentralisierend	Möglichst großer Abstand unverträglicher Einrichtungen (z.B. Presse und Messraum wegen Erschütterungen)	Unzulässigkeit (dezentralisierend)	Einhaltung gesetzlich vorgeschriebener Mindestabstand
Fläche, Schnitt, Zuordnung (2-dimensional)	Zentralisierend	Möglichst gute Ausnutzung vorhandener Flächenqualitäten (z.B. klimatisierte Bereiche)	Unzulässigkeit (zentralisierend)	Sicherstellung erforderlicher Flächenqualitäten (z.B. Boden-Traglasten für Maschinen)
	Dezentralisierend	Möglichst Separierung von Elementen unterschiedlicher Organisationsbereiche (z.B. verschiedene Meistereien)	Unzulässigkeit (dezentralisierend)	Ausschluss unerwünschter Flächenqualitäten (z.B. Maschinen nicht im Einstrahlungsbereich der Sonne)

Abb. 3-9: Mögliche Ausprägungen von Beziehungen mit zugehörigen Beispielen

²⁴ Entspricht der Logik der Nutzwertanalyse.

grunde liegender Bestimmungsgröße sowie Wirk- bzw. Optimierungsrichtung [vgl. Wirth 2000b, S. 41f; Aggteleky 1990a, S. 626f; Aggteleky 1990b, S. 473; Kettner 1984, S. 239]. Randbedingungen lassen sich auch hinsichtlich bestimmter Einzelattribute von Elementen definieren (z. B. geforderte Flächengröße oder -form bzw. fixierte Anordnungscoordinate für nicht frei anzuordnendes Element, z. B. einen Aufzug).

Die Abbildung der Bewertungsanforderungen für Anordnungen macht die in Abb. 3-10 dargestellten Eigenschaften notwendig. Im Rahmen der Bewertung ist die Nutzbarkeit der Attribute sämtlicher Betrachtungselemente und deren Beziehungen untereinander gefordert. Unter Verwendung dieser Attribute ist dem Planer die Formulierung spezifischer Ziele und Randbedingungen zu ermöglichen. Diese müssen sich wahlfrei auf Basis der 0-, 1- oder 2-dimensionalen Bestimmungsgrößen der räumlichen Anordnung definieren lassen. Auf Seiten der Modellierung sind durch den Benutzer definierbare **Methoden zur Bewertung** der Beziehungen bereitzustellen. Zur Ausprägung dieser Konstrukte sind freie Zugriffsmöglichkeiten auf die Attribute sämtlicher Elemente und deren Beziehungen erforderlich. Die Methoden bedürfen möglichst freier mathematischer Gestaltungsoptionen sowohl auf Ebene der Einzelbeziehungen als auch bezüglich der Verknüpfung der Einzelzielwerte zum Zielwert der Gesamtanordnung. Die Konstrukte und Methoden sind durch die ihre Anwendung beschreibenden Regeln zu vervollständigen.

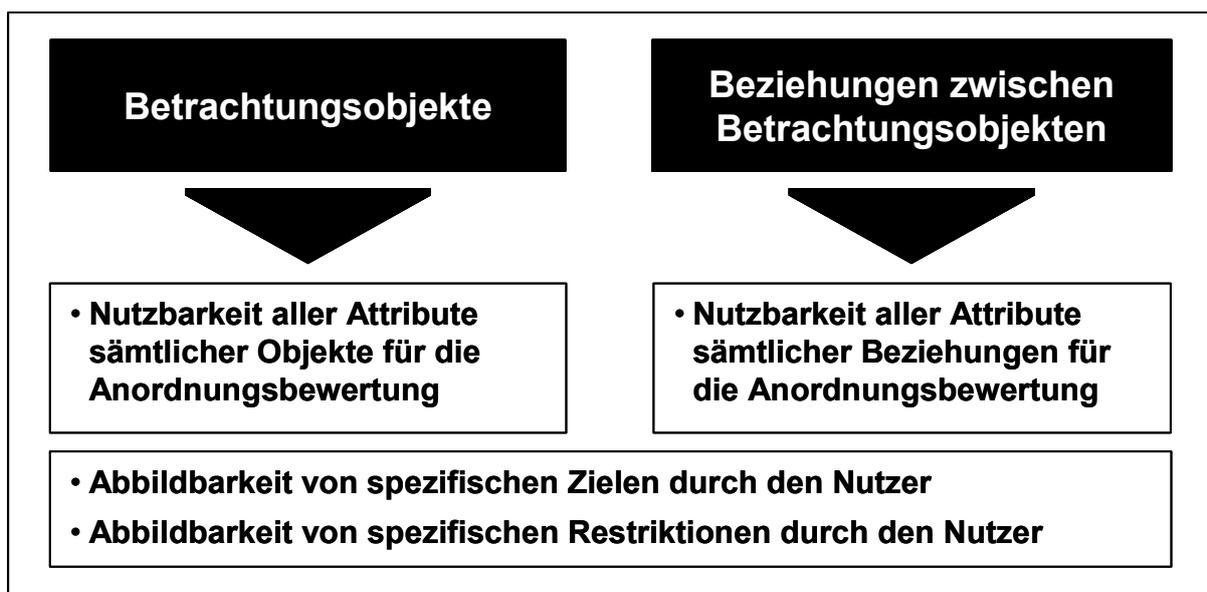


Abb. 3-10: Eigenschaften der Bausteine zur Modellierung räumlicher Anordnungen aufgrund der Bewertungsanforderungen

3.2 Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Modelle unterliegen wie die Planungsprozesse, zu deren Unterstützung sie dienen, den Anforderungen des ökonomischen Prinzips [vgl. Briel 2002, S. 38; Becker 2000, S. 15; Becker 1991, S. 20]. Die Wirtschaftlichkeit eines Modells ist demnach dann gegeben, wenn sein Anwendungsnutzen die Summe der Aufwände zur Erstellung und Anwendung übersteigt. Die Wirtschaftlichkeit wird im Wesentlichen durch das Modellierungsverfahren bestimmt. Die Anforderungen des ökonomischen Prinzips sind daher direkt auf dieses Verfahren übertragbar.

Ein Forschungsprojekt hat auf Basis des ökonomischen Prinzips **Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM)** definiert [vgl. Becker 2000, 1998; Schütte 1998]. Kapitel 3.2.1 erläutert diese und bewertet sie aus Anordnungssicht. Kapitel 3.2.2 ergänzt Anforderungen der Skalierbarkeit. Kapitel 3.2.3 widmet sich der Ableitung aufgabenspezifischer Anforderungen für Modellierungsverfahren räumlicher Anordnungen (Abb. 3-11). Die im vorigen Kapitel 3.1 erläuterten **Verfahrensziele**

- systemtechnischer Aufbau,
- interdisziplinäre, ganzheitliche Planung,
- kontinuierliche Planung mit iterativem Vorgehen,
- freie Variation des Planungspunktes,
- leistungsfähige Bewertungsmöglichkeiten

werden dazu mit den selektierten Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung zusammenggeführt. Die Ergebnisse stellen die grundlegenden Anforderungen für die anschließende Bewertung des Standes der Technik dar.

3.2.1 Allgemeine Anforderungen an Verfahren zur Modellierung

Im Rahmen der GoM sind **allgemeine Grundsätze** formuliert, die einen generischen Ziel- und Gestaltungsrahmen definieren. Gegenstand derselben sind abstrakte Ziele und Modellierungsempfehlungen zu sechs unterschiedlichen Zielfeldern. Die Intention der einzelnen Grundsätze wird im Folgenden kurz skizziert [vgl. Becker 2000, S. 13-17; Scheer 2003, S. 743f]. Sie werden außerdem hinsichtlich ihrer jeweiligen Bedeutung für die Aufgabe der Anordnungsplanung bewertet.

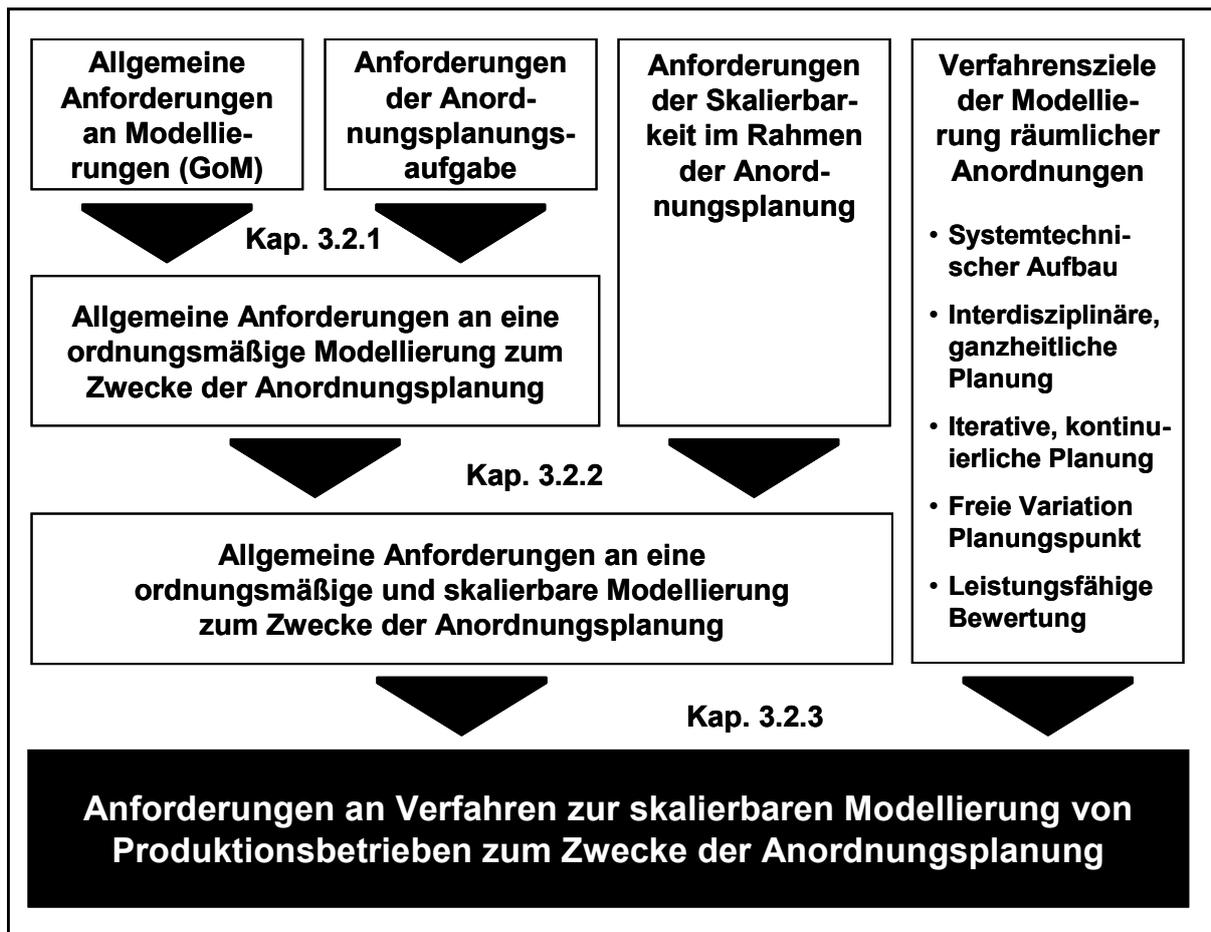


Abb. 3-11: Systematische Ableitung der Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen

Grundsatz der Richtigkeit

Dieser Grundsatz besitzt syntaktische und semantische Ausprägungen. **Syntaktische Richtigkeit** bezeichnet die formale Korrektheit und Stimmigkeit unabhängig vom Realsystem, **semantische Richtigkeit** dagegen die Beziehung zwischen Modell und Objektsystem. Sie beschreibt, in wieweit das Modell die Realität vollständig und einheitlich repräsentiert. Die syntaktische Richtigkeit ist aufgrund der einfachen und einheitlichen Struktur des zugrunde liegenden Metamodells für die Anordnungsplanung von untergeordneter Bedeutung. Die semantische Richtigkeit mit ihren Teilaspekten Vollständigkeit und Einheitlichkeit ist dagegen für eine adäquate Repräsentation der Realität im Rahmen der Anordnungsplanung von wesentlicher Bedeutung.

Grundsatz der Relevanz

Dieser Grundsatz bezieht sich sowohl auf die vollständige Abbildung aller relevanten Realobjekte als auch auf die Relevanz sämtlicher Modellobjekte. Diese ist gegeben,

wenn der Nutzen der Modellanwendung bei geringerem Informationsgehalt sinken würde. Da für die Anordnungsplanung hinsichtlich der **Relevanz der Realobjekte** weitgehend Klarheit und Einigkeit besteht, lässt sich dieser Grundsatz auf die **Relevanz der Modellobjekte** und hier insbesondere die relevanten Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen fokussieren.

Grundsatz der Wirtschaftlichkeit

Mit diesem Grundsatz wird die Modellerstellung und -nutzung dem ökonomischen Prinzip unterworfen. Der Grundsatz wirkt als Restriktion für alle anderen Grundsätze, die den Nutzen der Modellanwendung adressieren. Aufgrund der strukturellen Einfachheit und der großen Bedeutung der Anordnungsplanung für die Leistungsfähigkeit der Produktionsbetriebe sowie der durchgängigen Verfügbarkeit einer gegenständlichen Repräsentation im Modell werden sowohl die **Aufwände zur Modellerstellung** wie auch die zur **Modellnutzung** eindeutig vom **Nutzen der Anwendung** des Modellierungsverfahrens, repräsentiert durch die anderen fünf Grundsätze, dominiert. Der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit wird implizit in diesen berücksichtigt.

Grundsatz der Klarheit

Diesem Grundsatz tragen Kriterien wie Strukturiertheit, Übersichtlichkeit und Lesbarkeit Rechnung. Die **Strukturiertheit** zielt auf die klare Gliederung des der Modellierung zugrunde liegenden Repräsentationsmechanismus ab, die **Übersichtlichkeit** auf dessen Begrenzung hinsichtlich der Anzahl verschiedener Objekte und die **Lesbarkeit** auf die intuitive Eingängigkeit der Repräsentation. Da dieser Grundsatz letztlich auf die Wahrnehmung des Planers bezogene Formen der Anforderungen anderer Grundsätze darstellt, soll er hier vernachlässigt werden.

Grundsatz der Vergleichbarkeit

Dieser Grundsatz beschreibt explizit die Möglichkeit, anhand der Modelle aus der vergleichenden Betrachtung und Bewertung gewonnene **Erkenntnisse** auf die Realität **übertragen** zu können sowie implizit die **Reproduzierbarkeit** der Betrachtungen und insbesondere der Bewertungsergebnisse. Er spiegelt die wesentlichsten Herausforderungen der Anordnungsplanung wider und ist daher für die zugehörigen Modellierungsverfahren von elementarer Bedeutung.

Grundsatz des systematischen Aufbaus

Dieser Grundsatz bezieht sich auf die zwingend erforderliche Betrachtungsweise der Modelle in unterschiedlichen Sichten. Die Sichten übergreifende Modellierung erfordert eine **Konsistenz** und **Integration** des Gesamtmodells. Vor dem Hintergrund der Anforderungen hinsichtlich einer skalierbaren Planung und Modellierung kommt diesem Grundsatz für die Anordnungsplanung eine herausragende Bedeutung zu.

Die Aussagen der GoM bezüglich der Anordnungsplanung sind in Abb. 3-12 zusammenfassend dargestellt.

3.2.2 Anforderungen einer skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Eine kontinuierliche und iterative Planung mit wechselnden Planungspunkten setzt eine skalierbare Modellierung zwingend voraus. Lediglich derartige Modellierungs-

Allgemeine Anforderungen der GoM			Beschreibung	Bedeutg.
Richtigkeit	Bezug Modell	Syntaktische Richtigkeit	Innere Stimmigkeit & formale Korrektheit der Modellierung bzgl. des Metamodells (inkl. Vollständigkeit & Konsistenz).	○
	Bezug Modell zu Realität	Semantische Richtigkeit	Vollständigkeit & Einheitlichkeit der Abbildung, adäquate Realitätsrepräsentation.	●
Relevanz	Bezug Realität	Relevanz Realobjekte	Umfang des Ausschnitts aus der Realwelt bzw. der Realität.	◐
	Bezug Modell	Relevanz Modellelemente	Fehlen von Bestandteilen würde Sinken des Nutzwerts der Modellanwendung bedingen.	●
Wirtschaftlichkeit	Bezug Modell	Wirtschaftlichkeit Modellerstellung	Verhältnis Aufwand Modellerstellung und Nutzen Modellanwendung.	◐
		Wirtschaftlichkeit Modellnutzung	Verhältnis Aufwand und Nutzen der Modellanwendung.	◐
Klarheit	Bezug Modell	Strukturiertheit	Gliederung der Modellierung aufgrund des verwendeten Repräsentationsmechanismus.	◐
		Übersichtlichkeit	Begrenzung Objektanzahl durch verwendeten Repräsentationsmechanismus.	○
		Lesbarkeit	Intuitive Eingängigkeit der verwendeten Repräsentation.	◐
Vergleichbarkeit	Bezug Modell zu Realität	Vergleichbarkeit	Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Realität & Möglichkeit für Rückschlüsse.	●
Systematischer Aufbau	Bezug Modell	Konsistenz der Sichten	Widerspruchsfreiheit von Einzelsichten und Subsystemen.	●
		Integration einzelner Sichten	Systematische Einordnung unterschiedlicher Sichten und Subsysteme.	●
Legende: Bedeutung für die Anordnungsplanung ○ gering ◐ mittel ● hoch				

Abb. 3-12: Bedeutung der GoM für die Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen

verfahren sind fähig, die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Teilaufgaben und des ständigen Wechsels zwischen diesen abzudecken sowie in einem gemeinsamen Modell zu integrieren. Diese Anforderungen beziehen sich auf die **statische Struktur** der Elemente wie auch auf deren **dynamisches Verhalten** (Anordnungsverhalten). Hinsichtlich der Skalierbarkeit ist ein interner und ein externer Aspekt zu unterscheiden. Die **interne Skalierbarkeit** bezeichnet die Stimmigkeit der Modellierung innerhalb einer einzelnen Teilaufgabe, die externe Skalierbarkeit diejenige über Planungsteilaufgaben bzw. zugehörige Planungspunkte hinweg [vgl. Briel 2002, S. 41]. Die externe Skalierbarkeit kann sich auf die Variation ausschließlich einer oder auch mehrerer verschiedener Skalen beziehen. Der Gesamtzusammenhang ist in Abb. 3-13 dargestellt. Resultierende operative Anforderungen sind:

- Durchgängigkeit und Konsistenz der Logik und Struktur der Modellobjekte sowie des resultierenden Anordnungsverhaltens
- Adaptierbarkeit der Logik und Struktur der Modellobjekte sowie des resultierenden Anordnungsverhaltens

Ein derartiges **differenziertes Anordnungsverhalten** ist z. B. bezüglich der Stützen von Fabrikhallen gefordert. In der Generalstrukturplanung sollen die Elemente ohne Einschränkung durch die Stützen angeordnet werden, also restriktionsfrei. Es wird davon ausgegangen, dass potenzielle Konflikte im nächst detaillierteren Planungs-

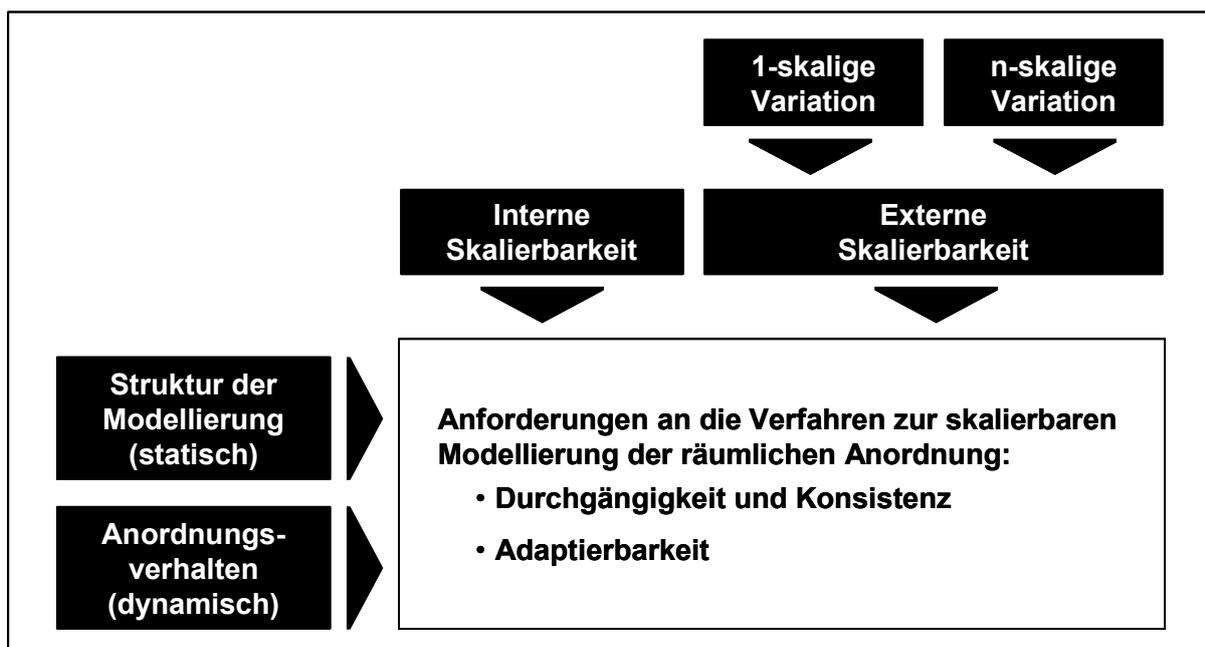


Abb. 3-13: Einflussfaktoren für die Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen

schritt, der Betriebsmittelaufstellungsplanung, gelöst werden. Bei Anordnung der Maschinen und Anlagen für diese auf den vorherigen Ergebnissen aufbauende Teilaufgabe sollen dann die Stützen sehr wohl berücksichtigt werden. Die Planung erfolgt diesbezüglich nicht mehr restriktionsfrei. Für beide Fälle ist so jeweils ein spezifisches, unterschiedliches Anordnungsverhalten der Elemente erforderlich. Die angestrebte **Integration** der einzelnen Teilaufgaben der Anordnungsplanung bezieht sich im Wesentlichen auf folgende Aspekte bzw. deren zugehörige Skalen:

- Planungssichten (z. B. Disziplinen)
- Subsysteme der Planung (z. B. Strukturen, Detaillierungsgrade)
- Planungshorizonte (z. B. Wirkzeit der Ergebnisse)

Die geforderte Integration führt entsprechend Abb. 3-14 zu vier **Anforderungsfeldern**, je zwei zur Konsistenz der Modellierung und zwei zu den Adaptionenmöglichkeiten des Modells. Die Konsistenz verlangt bezüglich der Modellierungsstruktur einheitliche Attributsätze und eine durchgängige Anordnungshierarchie sowie bezüglich des Anordnungsverhaltens eine durchgängige Logik. Die Adaptierbarkeit erfordert bezüglich der Modellierungsstruktur variierbare Element- und Beziehungsattribute sowie hinsichtlich des Anordnungsverhaltens eine Variierbarkeit durch den Planer. Modell-anpassungen liegen in dessen Verantwortung und sind von diesem zu initiieren.

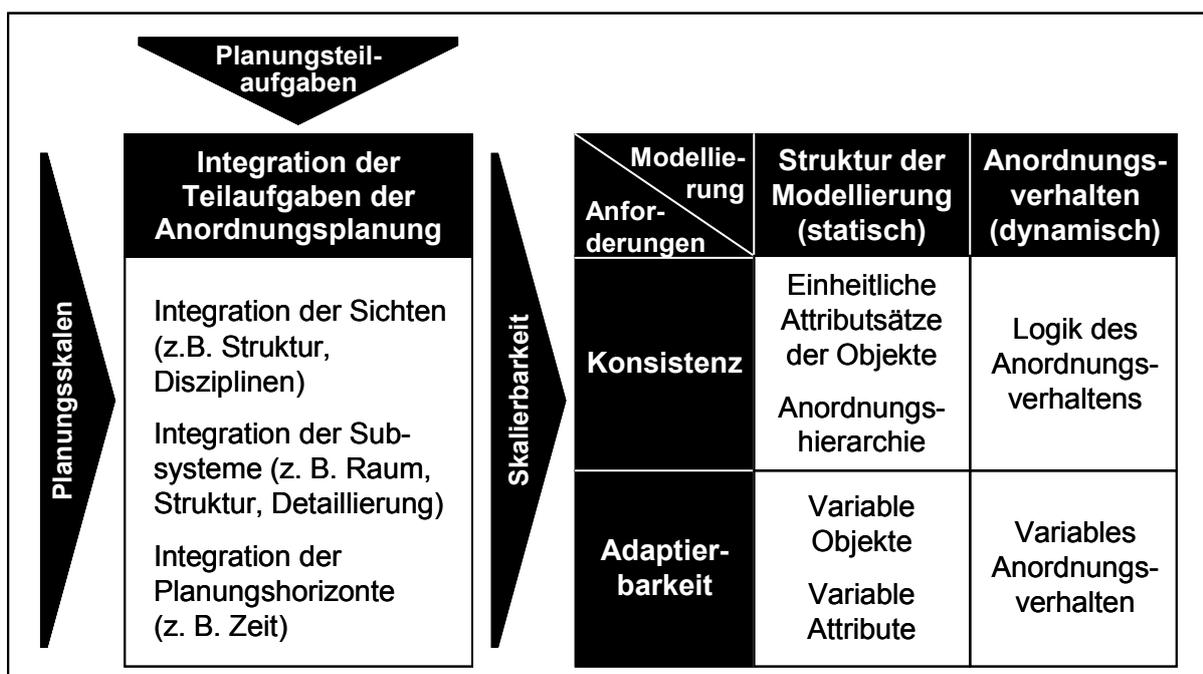


Abb. 3-14: Ableitung der Anforderungen an eine skalierbare Modellierung räumlicher Anordnungen

3.2.3 Spezifische Anforderungen an Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Diese Anforderungen leiten sich aus den beschriebenen allgemeinen Anforderungen, den Anforderungen durch eine skalierbare Modellierung sowie aus den bei den Begriffsbestimmungen erläuterten Modell- bzw. Verfahrenszielen ab.

3.2.3.1 Erforderliche Modellelemente für eine richtige und skalierbare Abbildung der Anordnungsaufgabe

Ein Modellierungsverfahren zur Anordnungsplanung benötigt, um richtig und skalierbar zu sein, Modellelemente, mit denen sich sämtliche flächenbehaftete Objekte des Produktionsbetriebs adäquat zur Aufgabenstellung abbilden lassen (Abb. 3-15). Dies umfasst sowohl flächenbezogene Attribute wie z. B. **Flächenbedarf** und **Flächengeometrie** als auch alle sonstigen **anordnungsrelevanten** bzw. **anordnungsbeeinflussenden Attribute**. Dabei ist insbesondere die Abbildungsmöglichkeit des hierarchisch strukturierten Aufbaus der verschiedenen Teilsysteme und der unterschiedlichen Teilaufgaben der Planung vorzusehen [vgl. Gäse 2006]. Die Gegebenheiten der Abbildung sind an den interdisziplinären Planungsanforderungen zu spiegeln. Darüber hinaus ist eine Logik bereitzustellen, mittels derer sich Anforderungen bzw. Bedarfe einerseits und Fähigkeiten bzw. Angebote andererseits abgleichen und harmonisieren lassen (z. B. Anordnung bestimmter Maschinen in einem Kranbereich).

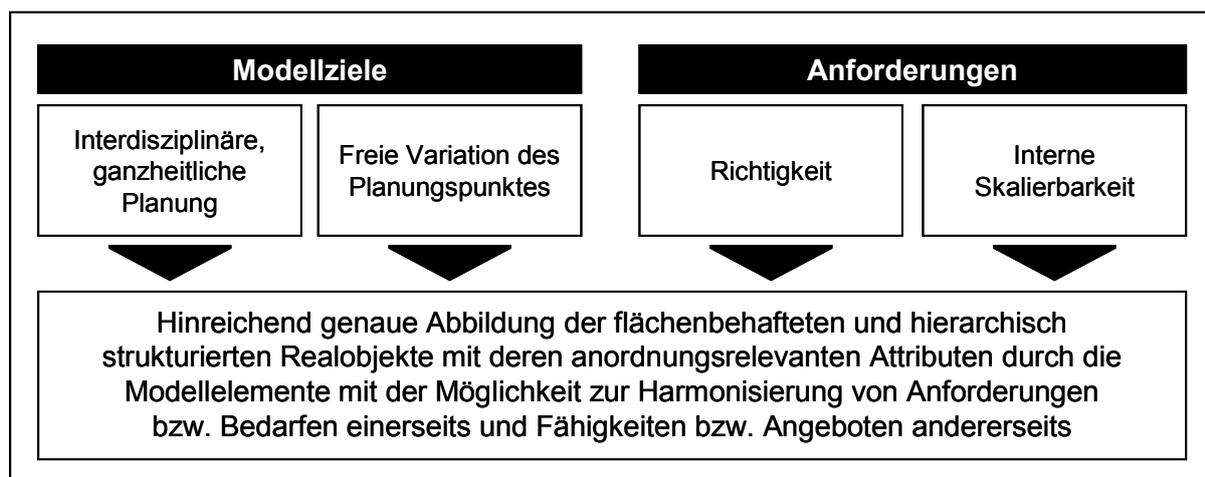


Abb. 3-15: Spezifische Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Elemente für eine richtige und skalierbare Modellierung

3.2.3.2 Relevante Beziehungen zwischen den Modellelementen für eine umfassende und systematische Abbildung der Anordnungsaufgabe

Ein Modellierungsverfahren für die Anordnungsplanung benötigt, um umfassend und systematisch zu sein, Beziehungskonstrukte, mit denen sich verschiedenste Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei konkreten (**1:1-Logik**) oder alternativ mehreren beliebigen (**n:m-Logik**) flächenbehafteten Elementen, also Austausch-, Anforderungs- und Zuordnungsbeziehungen, adäquat zur Aufgabenstellung abbilden lassen (Abb. 3-16). Dies umfasst, basierend auf den interdisziplinären Planungsanforderungen, sowohl die Möglichkeit zur Beeinflussung der 0-, der 1- als auch der 2-dimensionalen **Bestimmungsgrößen** der Anordnung. Die Art der Beeinflussung lässt sich alternativ als **Ziel** oder **Randbedingung** ausprägen, die Richtung der Beeinflussung alternativ als **zentralisierend** oder **dezentralisierend**.

3.2.3.3 Erforderlicher Beschreibungsumfang für eine vergleichbare und skalierbare Bewertung von alternativen Anordnungen

Ein Modellierungsverfahren zur Anordnungsplanung benötigt zur vergleich- und skalierbaren Bewertung Konstrukte, die sämtliche Wechselwirkungen der Elementen aufgabenspezifisch hinreichend genau und zuverlässig abbilden (Abb. 3-17). Dies setzt **Messmethoden** zur Ermittlung der 0-, 1- und 2-dimensionalen Bestimmungsgrößen der Anordnung sowie flexible und leistungsfähige **Bewertungsmethoden** für Einzelbeziehungen wie auch für deren Verknüpfung zu einem Gesamtzielwert voraus.

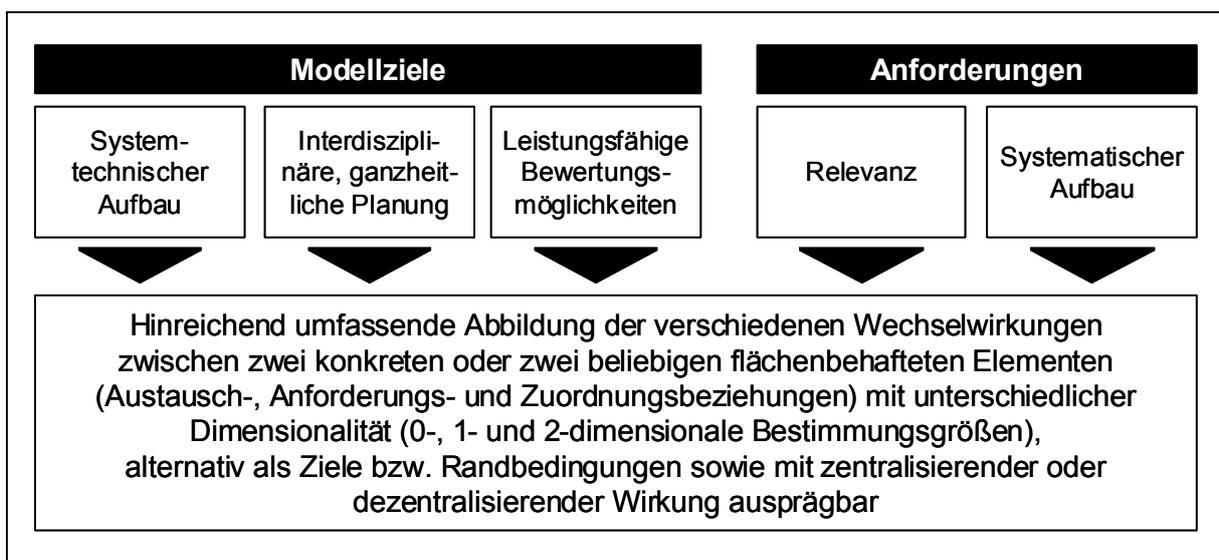


Abb. 3-16: Spezifische Anforderungen hinsichtlich der relevanten Beziehungen für eine umfassende und systematische Modellierung

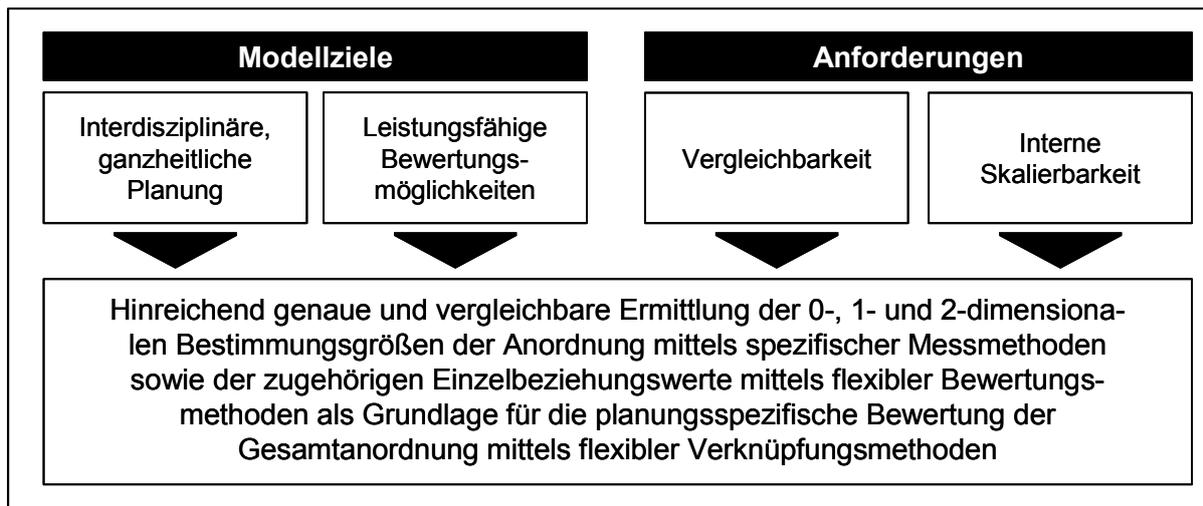


Abb. 3-17: Spezifische Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Beschreibungsumfangs für eine vergleichbare und skalierbare Bewertung

3.2.3.4 Erforderliche Systematik für eine durchgängige und skalierbare Abbildung der Anordnungsaufgabe

Ein Modellierungsverfahren für die Anordnungsplanung benötigt zur Gewährleistung einer durchgängigen und skalierbaren Abbildung der Anordnungsaufgabe einerseits eine Systematik, mit der sich flächenbehaftete Elemente hinsichtlich ihrer Bedeutung und **hierarchischen Stellung in der Planung** [vgl. z. B. Gäse 2006, Günther 2005, S. 7] hinreichend beschreiben lassen (Abb. 3-18). Andererseits erfordert die Möglichkeit zur mehrskaligen **Variation des Planungspunktes** bei gleichzeitig freier Wahl der Planungsrichtung ein hohes Maß an Systematik hinsichtlich der Abbildung von

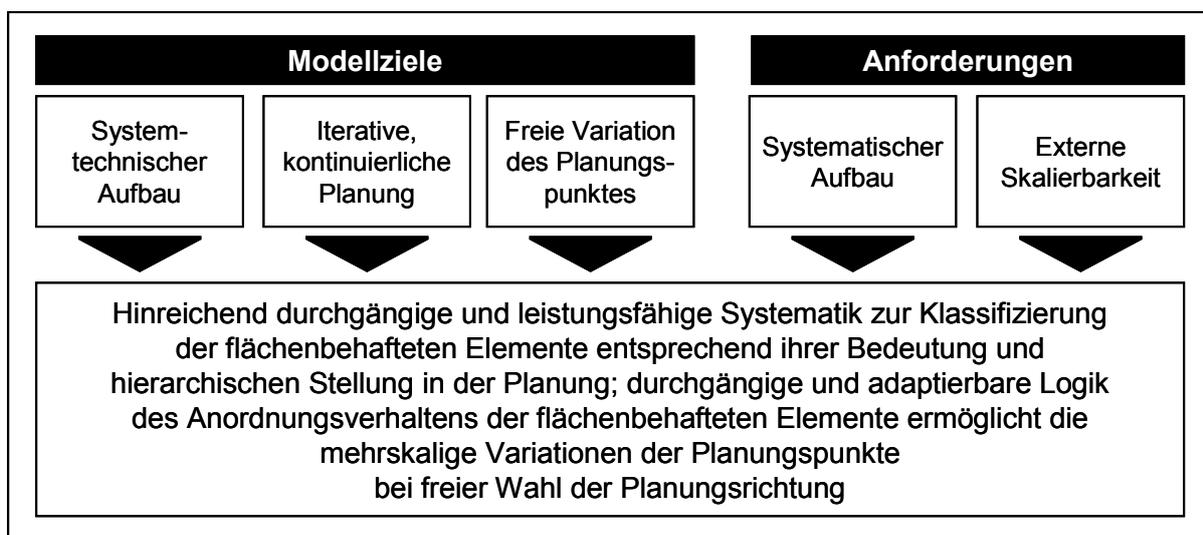


Abb. 3-18: Spezifische Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Systematik für eine durchgängige und skalierbare Modellierung

sowohl flächenbehafteten Elementen als auch deren Beziehungen untereinander. Darüber hinaus unterliegt die Logik des **Anordnungsverhaltens** hinsichtlich ihrer Durchgängigkeit, Systematik und Adaptierbarkeit besonderen und herausragenden Anforderungen. Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang den Attributsätzen sowohl der flächenbehafteten Elemente als auch der Beziehungen bzw. deren beider Identität und Durchgängigkeit zu.

3.2.4 Zusammenfassende Betrachtung der Anforderungen

Ein Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung hat somit sämtliche erläuterte Kriterien zu erfüllen. Diese sind in Abb. 3-19 nochmals in einem verdichteten Überblick zusammengestellt. Der unverdichtete Überblick mit stärker ausdifferenzierten Anforderungskriterien findet sich in Anhang 13.1.

Allgemeine Anforderungen				Spez. Anforderungen durch Modellierungsziele		
Richtigkeit	Bezug Modell zu Realität	Semantische Richtigkeit	Vollständigkeit	Flächenbehaftete Elemente	Anforderungsgerechte Abbildung	
			Einheitlichkeit		Flächenbehaftete Elemente	Parametrisierbarkeit
Relevanz	Bezug Modell	Relevanz der Beziehungen zwischen Modellelementen	Beziehungen	Beziehungen	Anforderungsgerechte Abbildung	
					Beziehungen (Zielbedingungen)	Parametrisierbarkeit
			Abbildung 0-dim Zielbedingungen			
			Abbildung 1-dim Zielbedingungen			
			Abbildung 2-dim Zielbedingungen			
			Beziehungen (Randbedingungen)	Abbildung 0-dim Randbedingungen		
Abbildung 1-dim Randbedingungen						
Vergleichbarkeit	Bezug Modell zu Realität	Vergleichbarkeit von Modell und Realität	Bewertung	Bewertung	Alternative Messmethoden	
					Parametrisierbare Beziehungsbewertung	
					Parametrisierbare Beziehungsverknüpfung	
Systematischer Aufbau	Bezug Modell	Konsistenz über Sichten hinweg	Flächenbehaftete Elemente	Flächenbehaftete Elemente	Klassifizierbarkeit	
					Beziehungen	Identische Attributsätze
			Integration unterschiedlicher Sichten	Anordnungsverhalten		Anordnungsverhalten
					Variationsmöglichkeit Planungspunkt	
		Flächenbehaftete Elemente		Abbildung spezifischer Hierarchien		
			Beziehungen	Adaptierbarkeit der Attribute		
		Anordnungsverhalten	Adaptierbarkeit der Attribute			
Adaptierbarkeit durch Parametrisierung						
Adaptierbarkeit mittels Objektattributen						

Abb. 3-19: Gesamtübersicht der Anforderungskriterien für ein Verfahren zur skalierbaren Modellierung räumlicher Anordnungen

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird untersucht, inwiefern die in Kapitel 3 abgeleiteten Anforderungen durch bisher bekannte und in der betrieblichen Praxis genutzte Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen abgedeckt werden. Dazu werden die Verfahren in hinreichend homogene Klassen zusammengefasst (Abb. 4-1). Die Klassen werden anschließend insbesondere hinsichtlich ihrer jeweiligen Defizite kurz beschrieben und auf dieser Grundlage abschließend bewertet.

Die bisherigen Verfahrensentwicklungen wurden relativ stark aus dem Bereich des Operations Research (OR) heraus betrieben. Kernanforderung ist daher hauptsächlich eine algorithmische Beherrschbarkeit und Lösbarkeit der verwendeten Modelle und Problemformulierungen. Im Gegensatz hierzu fokussiert diese Arbeit vor allem das erläuterte, wesentlich breitere Anforderungsspektrum der betrieblichen Praxis. Die OR-nahen Aspekte stehen demgegenüber ganz bewusst im Hintergrund. Die Arbeit liefert so einen sich von der Masse der Arbeiten gänzlich unterscheidenden Zugang zum Thema.

4.1 Klassische Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen

Quadratische Zuordnungsprobleme QAP (Quadratic Assignment Problem)

Diese Formulierung geht von einer vordefinierten Anzahl an Elementen aus, die auf verschiedenen potenziellen Standorten anzuordnen bzw. diesen zuzuordnen sind

Klassen der Modellierungsverfahren			Klassen der Modellierungsverfahren		
Klassische Modellierungen	Quadratisches Zuordnungs-Problem	QAP	Erweiterungen der klassischen Modellierungen	Erweiterte Logik bzgl. Modellelementen	
	Quadratisches Set Covering Problem	QSCP		Erweiterte Logik bzgl. Zielfunktion	
	Generalisiertes Facility Layout Problem	GFLP		Erweiterte Logik bzgl. Auftragslast	
	Space Partitioning bzw. Slicing Tree Modellierungen	SPM bzw. STM		Erweiterte Logik bzgl. Randbedingungen	
	(Gemischt) ganzzahlige (lineare) Programmierung	MIP bzw. MILP		Hybride Erweiterungen der Modellierungslogik	
	Graphentheoretische Modellierungen	GTM		Modellierungen in Digitaler Fabrik	
				Modellierungen in Software-Produkten	Kommerzielle Software
		Modellierungen für Spezialfälle	Wissenschaftliche Software		
			bzgl. Betrachtungsgegenstand		
			bzgl. Modellierungsansatz		

Abb. 4-1: Bezüglich der Anforderungskriterien homogene Verfahrensklassen

[vgl. z. B. Drira 2006; Singh 2006; Liggett 2000; Bogatzki 1998; Meller 1996a; Welgama 1995]. Dabei gelten meist Randbedingungen, die den Anforderungen der betrieblichen Praxis zuwider laufen. So ist bei der klassischen Form dieser Modellierung die Anzahl der anzuordnenden Elemente und der Standorte identisch. Dies wird in der Regel durch Rasterung der Planungsgrundfläche mit diskreten Punkten erreicht, meist als Dreieck- oder Viereckraster [vgl. Grundig 2000, S. 147f; Kettner 1984, S. 232, sowie weitere dort zitierte Literatur]²⁵. Diese Abbildungsform wird auch als nicht kontinuierliche bzw. diskrete Standortrepräsentation bezeichnet. Weiteres Defizit dieser Modellierung ist die sowohl Größe wie auch spezifische Geometrie vernachlässigende Abbildung des Flächenaspektes. Darüber hinaus verhindert die bei QAP-Modellierung übliche fixe Zuordnung eines jeden Elementes zu einer der beiden disjunkten Teilmengen der anzuordnenden Elemente respektive der potenziellen Standorte, d. h. des so genannten Standortträgers, die durchgängige Bearbeitung der Teilaufgaben unterschiedlicher Planungsebenen im Sinne einer skalierbaren Modellierung. Die QAP-Modellierungen selbst und alle auf diese zurückgehenden Modellierungen sind somit **grundsätzlich nicht skalierbar**. Flächenbehaftete Elemente, die im Rahmen einer Teilaufgabe der Anordnungsplanung anzuordnen sind, können im Rahmen der nächsten nicht mehr als Standortträger fungieren. Für eine durchgängige Planung über mehrere Planungsebenen hinweg sind bei QAP-basierter Modellierung somit zwingend auch mehrere getrennte Modelle erforderlich.

Neben den Defiziten der Elementmodellierung weist die QAP-Modellierung auch hinsichtlich der abbildbaren Beziehungen erhebliche Einschränkungen auf. So ist lediglich eine 1-dimensionale Beziehungslogik zur Abbildung einfacher und sehr spezifischer Austauschbeziehungen bzw. Interaktionen zwischen einzelnen Elementen vorgesehen. Dies wird durch die Namen gebende quadratische Zielfunktion dokumentiert, die hier in ihrer allgemeinen Form dargestellt ist [vgl. Welgama 1995].

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g'_{ij} x'_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} c'_{jl} x'_{ij} x'_{kl} \quad \text{(F 4-1)}$$

unter den folgenden Randbedingungen:

²⁵ Hier werden die Verfahren von Bloch und Schmigalla genannt.

²⁶ Mit Hochkomma versehen sind hier und im Folgenden alle Formelzeichen, die sich auf einen oder mehrere potenzielle Standorte beziehen. Formelzeichen ohne Hochkomma beziehen sich ausschließlich auf anzuordnende bzw. bereits angeordnete Flächen.

$$\sum_{j=1}^n x'_{ij} = 1; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{F 4-2})$$

$$\sum_{i=1}^n x'_{ij} = 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{F 4-3})$$

$$x'_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{F 4-4})$$

Aus F 4-1 leiten sich vier Spezialfälle ab:

- Entfall des ersten Terms, d. h. $g'_{ij} = 0$: Minimierung der Kosten des zweiten Terms [vgl. z. B. Domschke 1993, 1997; Meller 1996a]
- Erster Term bezeichnet durch Anordnung von Element i am Standort j entstehende Kosten [vgl. Kusiak 1987]: Kostenminimierung über beide Terme
- Kosten c'_{ji} durch entfernungsproportionalen Aufwand bzgl. der Standorte j und i ersetzt ($f_{ik}c'_{ji} = f_{ik}d'_{ji}$)²⁷ [vgl. Singh 2006] bzw. monetäre Bewertung durch Einführung des entfernungsproportionalen Kostensatzes $c'_{ji} = c_{ik}$ ergibt die häufig verwendete Form mit Minimierung der entfernungsproportionalen Kosten:

$$\text{Min} \sum_i^n \sum_k^n f_{ik} d_{ik} c_{ik} \quad (\text{F 4-5})$$

Diese Zielfunktion ist standortunabhängig in dem Sinne, dass lediglich noch die Entfernungen jeweils zweier bereits angeordneter Elemente eingehen.

- Verwendung eines Closeness-Rating-Faktors, anstelle der Intensität f_{ik} zu jeder 1-dimensionalen Beziehung ($f_{ik}c'_{ji} = r_{ik}$), wobei hohe Werte für r_{ik} eine wünschenswerte räumliche Nähe zwischen Element i und Element k darstellen.

Quadratische Set Covering Probleme QSCP (Quadratic Set Covering Problem)

Diese Formulierung berücksichtigt zusätzlich zu QAP den spezifischen Flächenbedarf der anzuordnenden Elemente. Dazu werden sowohl Planungsgrundfläche wie auch anzuordnende Elemente gerastert und die einzelnen **Rastereinheiten** dann separat angeordnet. Für zusammengehörige Einheiten werden hohe Beziehungintensitäten vorgetäuscht, die deren zusammenhängende Anordnung gewährleisten [vgl. Bölte 1994, S. 46, Kettner 1984, S. 232, sowie dort zitierte Literatur²⁸]. Darüber hinaus weisen QSCP-Modellierungen alle sonstigen QAP-Defizite auf.

²⁷ Zur Messung der Entfernung d_{ji} bzw. d_{ik} existieren verschiedene Metriken. Diese werden im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter behandelt.

²⁸ Hier werden die Verfahren CORELAP und MODULAP genannt.

Generalisierte Anordnungsprobleme GFLP (General Facility Layout Problem)

Diese ebenfalls auf QAP zurückgehende Modellierung berücksichtigt, dass Entfernungen zwischen den potenziellen Standorten gegebenenfalls nicht a priori bekannt sind, sondern von der Anordnungsreihenfolge aller anzuordnenden Elemente abhängen. Dies ist z. B. der Fall, wenn die Planungsgrundfläche kontinuierlich modelliert ist und die anzuordnenden Elemente mit ihrem jeweils spezifischen Flächenbedarf abgebildet werden. Die Zielfunktion aus (F 4-1) mutiert dann zu [vgl. Kusiak 1987]:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} c_{jl}^K x'_{ij} x'_{kl} \quad (\text{F 4-6})$$

Die Kosten der Beziehungen sind hier von der spezifischen **Anordnungskonstellation** K abhängig. Die Zielfunktion nimmt anstelle ihres quadratischen Charakters polynomiale Form an. Gleiche Wirkung hat die Einführung einer Abhängigkeit der Beziehungsintensität f_{ik} von der Anordnungskonstellation K [vgl. Benjaafar 2000a].

Space Partitioning bzw. Slicing Tree Modellierungen SPM/STM

Diese Modellierung basiert ebenfalls auf QAP, stellt im Gegensatz hierzu jedoch eine kontinuierliche Flächenrepräsentation dar. Die Planungsgrundfläche wird dabei mit mehreren **Trennschnitten** sukzessive so zerlegt, dass eine möglichst günstige Anordnung entsteht. Diese Anordnung ist durch einen so genannten Schachtelungs- oder binären Baum darstellbar (Abb. 4-2). Die spezifischen Flächenbedarfe der Elemente werden dabei berücksichtigt. Der faktische Entfall der Trennung zwischen anzuordnenden Elementen und Standortträger bietet prinzipiell die Möglichkeiten für eine skalierbare, die Hierarchie der Planungsebenen übergreifende Modellierung.

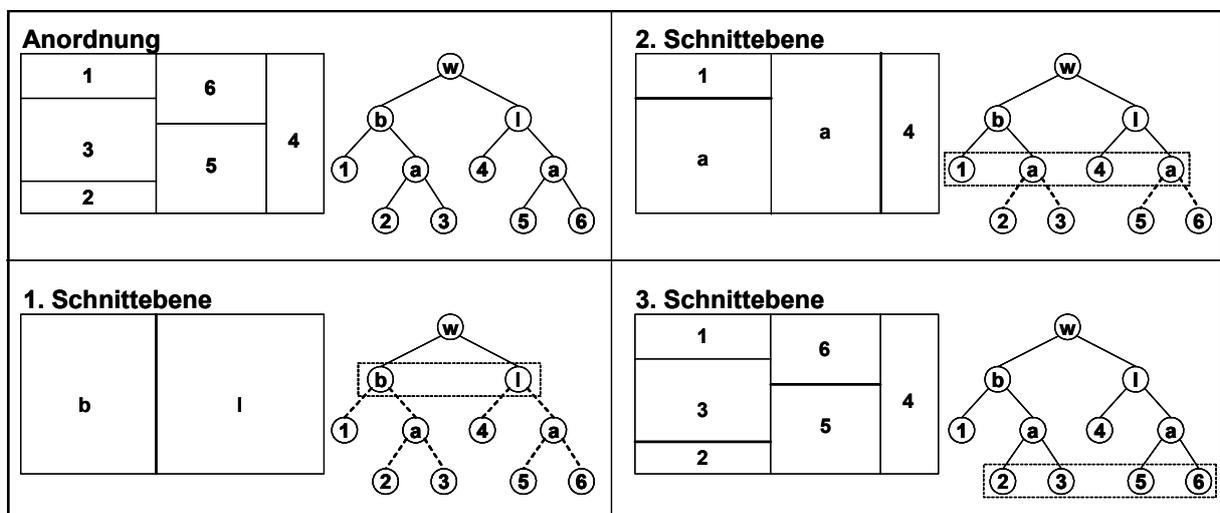


Abb. 4-2: Zusammenhang Anordnung und repräsentierender binärer Baum

Gemischt ganzzahlige (lineare) Programmierung MIP/MILP (Mixed Integer (Linear) Programming)

Diese Modellierung stellt einen grundsätzlich andersartigen Ansatz dar. Je nach verwendeten Koeffizienten erfolgt die Abbildung linear oder nicht. Realprobleme, die in der Regel nicht linear sind, erfordern eine Linearisierung. Flächen werden meist in kontinuierlicher Form, mit rechteckiger Grundfläche und spezifischem Flächenbedarf abgebildet. MIP/MILP überwindet so diverse Einschränkungen des QAP. Insbesondere die Formulierung verschiedenster realer Randbedingungen ist dabei möglich. Die zugrunde liegenden Zielfunktionen sind jedoch ähnlich denen bei QAP und ermöglichen so lediglich 1-dimensionale, entfernungsbasierte Beziehungen. Die Beziehungen sind meist über spezielle, innerhalb oder auf dem Rand der Elemente gelegene Input- und Output-Punkte angebunden. Im Folgenden sind einige **Randbedingungen** aufgeführt, die bei MIP/MILP üblicherweise Berücksichtigung finden können:

- Rechtwinklige Planungsgrundfläche mit für die Anordnung gesperrten Bereichen [vgl. Barbosa-Póvoa 2001; Tavares 2002a] sowie zwingende Anordnung von Elementen in entsprechenden Bereichen [vgl. z. B. Kim 2005]
- Minimal zulässige Elementfläche [vgl. z. B. Tavares 2002a; Kim 2005]
- Zulässiger Wertebereich für Länge-/Breite-Verhältnis der Elemente [vgl. z. B. Tavares 2002a; Kim 2005]
- Zulässige Elementorientierung [vgl. Barbosa-Póvoa 2001; Tavares 2002a]
- Input- und Output-Punkte zur Anbindung 1-dimensionaler Beziehungen [vgl. z. B. Kim 2005, 2000; Barbosa-Póvoa 2001]
- Minimal oder maximal zulässige Entfernungen zwischen jeweils zwei Elementen bzw. ausgewiesenen Punkten derselben [vgl. z. B. Barbosa-Póvoa 2001]
- Erforderliche Nachbarschaften für Elementpaare [vgl. z. B. Tavares 2002a]
- Fixe bzw. verbotene Anordnungspositionen [vgl. z. B. Tavares 2002a]
- Relative Anordnungspositionen für Elementpaare [vgl. z. B. Tavares 2002a]
- Überlappungsfreiheit der Elemente [vgl. z. B. Kim 2005, 2000; Barbosa-Póvoa 2001; Tavares 2002a]

Trotz zahlreicher modellierbarer Randbedingungen verbleiben bei MIP/MILP wesentliche Defizite. Die strikte Trennung zwischen anzuordnenden Elementen und Standortträger besteht weiterhin. Eine Skalierbarkeit wird so nicht erreicht. Es existiert keine durchgängige Logik zur Abbildung 2-dimensionaler Randbedingungen und Ziele.

Graphentheoretische Modellierungen GTM

Hier werden Anordnungen als Graphen abgebildet. Flächenbehaftete Elemente werden durch **Knoten**, die sie verbindenden Beziehungen durch **Kanten** modelliert. Diese Beziehungen definieren Anforderungen hinsichtlich benachbarter Anordnung von Elementpaaren. Die Anordnungsqualität ist umso besser, je mehr Nutzen durch die jeweils benachbarte Anordnung der Elementpaare generiert wird²⁹. Somit lässt sich bezüglich der Zielfunktion bei QAP lediglich der fixe, nicht der entfernungsabhängige Beziehungsanteil abbilden. Die Nachbarschaftsanforderungen und deren relative Gewichtung müssen a priori bekannt sein. Außerdem entfallen für die Bewertung Beziehungen zwischen nicht benachbarten Elementen. Die bewertbaren Beziehungen sind somit auf $3n-6$ limitiert. Wesentliche Teile der Planung erfolgen ohne Berücksichtigung von Flächeninhalt und Geometrie der Elemente. Das technische Ziel der maximalen Erfüllung der Nachbarschaftsbeziehungen abstrahiert das eigentliche, reale Optimierungsziel in erheblicher Art und Weise. Die realitätsnahe Repräsentation der Anordnung erhält man durch den auf dem maximal planaren Graphen aufbauenden **dualen Graphen** (Abb. 4-3). Dieser stellt die Elemente nicht mehr als Knoten sondern als Regionen innerhalb des Graphen dar. Auch diese Darstellung ist noch eine erhebliche Abstraktion der realen Anordnung. Die resultierenden Elementgeometrien sind bei diesem Ansatz schwierig steuerbar [vgl. Drira 2006; Singh 2006; Hassan 2000; Meller 1996a; Welgama 1995].

4.2 Erweiterungen der klassischen Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen

Die Anforderungen der betrieblichen Praxis haben zu verschiedenen Erweiterungen der klassischen Verfahren geführt. Deren Grundcharakteristik bleibt trotz Überwindung einzelner Defizite jedoch im Wesentlichen erhalten. Die Erweiterungen sind nachfolgend möglichst unabhängig vom zugrunde liegenden Verfahren beschreiben.

4.2.1 Erweiterungen hinsichtlich der verwendeten Modellelemente

Folgende Erweiterungen zielen auf eine **realitätsnähere Flächenrepräsentation** ab:

²⁹ Diese Zielsetzung entspricht der auf Seite 59 erläuterten Closeness-Rating-Logik.

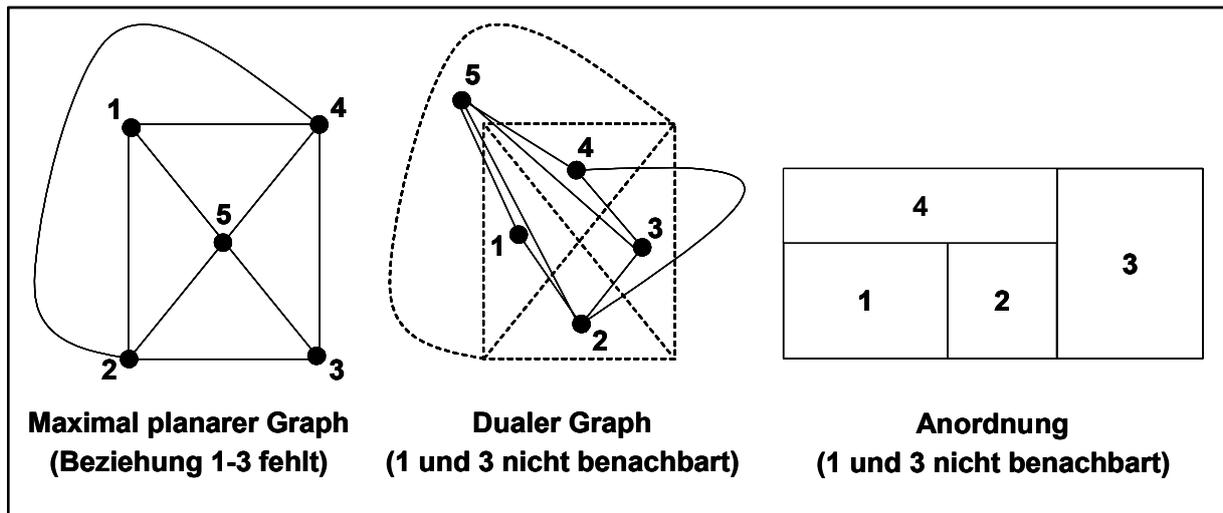


Abb. 4-3: Darstellung von planarem und zugehörigem dualen Graphen³⁰

- Kontinuierliche statt diskrete Repräsentation der Planungsgrundfläche [vgl. z. B. Drira 2006; Chae 2006; Deb 2005, 2003; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Chiang 2001; Bazargan-Lari 2000; Liggett 2000; Meller 1996a].
- Elementabbildung mit spezifischem Flächenbedarf [vgl. z. B. Drira 2006; Hicks 2006; Chae 2006; Liggett 2000; Meller 1996a].
- Elementabbildung mit spezifischer, rechtwinkliger Geometrie [vgl. Drira 2006; Deb 2003; Wu 2002a; Liggett 2000; Ho 2000; Kim 2000; Bazargan-Lari 2000; McKendall 1999; Meller 1996a; Bölte 1994, S. 21f, 44-47; Domschke 1993].
- Elementabbildung mit spezifischer, nicht rechtwinkliger Geometrie [vgl. Paul 2006; Bukchin 2006; Drira 2006; Hu 2004; Tavares 2002a; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Liggett 2000; Hamamoto 1999; Mak 1998; Bogatzki 1998, S. 30f].
- Spezifische Anknüpfungspunkte für 1-dimensionale Beziehungen [vgl. z. B. Drira 2006; Bukchin 2006; Chae 2006; Paul 2006; Sarkar 2005; Kim 2005, 2000; Deb 2005, 2003; Ferrari 2003; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Wu 2002a, 2002b; Aiello 2002; Ho 2000; Meller 1996a; Bölte 1994, S. 22].
- Planung mit mehrgeschossiger Planungsgrundfläche [vgl. Barbosa-Póvoa 2002; Abdinnour-Helm 2000; Liggett 2000; Meller 1997b, 1996a].

Folgende Erweiterungen ermöglichen die Abbildung spezifischer **Planungsbelange** bzw. Aspekte weiterer relevanter Aufgaben des Planungsnetzes:

³⁰ Die dargestellte Anordnung ist angeraten, wenn zwischen den Flächen 1 und 3 keine oder gegenüber den anderen nur sehr gering priorisierte Anforderungen bzgl. Nachbarschaft bestehen.

- Abbildbarkeit von Verkehrswegen [vgl. z. B. Kim 2005; Sarkar 2005; Wu 2002b; 2002a; Aiello 2002; Ho 2000; Bogatzki 1998, S. 33; Bölte 1994, S. 30]
- Hierarchische Elementstruktur, zumindest in Ansätzen [vgl. Hicks 2006; Chae 2006; Solimanpur 2004; Castillo 2002c; Bazargan-Lari 2000; McKendall 1999]
- Abbildbarkeit von Produkt- bzw. Prozessinformationen [vgl. z. B. Solimanpur 2004; Baykasoglu 2003; Tavares 2002a; Benjaafar 2002; Hamamoto 1999; Balakrishnan 1998]
- Integrierte Bearbeitbarkeit verbundener Planungsaufgaben [vgl. z. B. Sarkar 2005; Ferrari 2003; Aiello 2002; Lee, G. H. 2001; Mak 1998; Meller 1996a; Bölte 1994, S. 41,48]

4.2.2 Erweiterungen hinsichtlich der verwendeten Zielfunktion

Gegenüber den gängigen, stark eingeschränkten Zielfunktionen (F 4-1 und F 4-5) bestehen hier erweiterte Bewertungsmöglichkeiten. Zielrichtung ist einerseits die **differenziertere Modellierbarkeit** von im Zusammenhang mit Materialfluss und Materialhandling stehenden entfernungsproportionalen Aufwands- bzw. Kostenfunktionen:

- Aufwands- bzw. Kostenfunktion berücksichtigt zum variablen auch einen fixen Anteil (z. B. Investitionen) [vgl. z. B. Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Huang 2003]
- Berücksichtigung der verwendeten Transport- bzw. Fördermittel [vgl. z. B. Al-Araidah 2006; Bartolomei-Suárez 2000, Bölte 1994]
- Extrakosten beim Transport durch bzw. beim Handling innerhalb definierter Bereiche (Penalty-Funktion) [vgl. z. B. Sarkar 2005]
- Differenziertere und realitätsnähere Arten der Entfernungsmessung (Abb. 4-4) [vgl. z. B. Kim 2005, 2000; Özdemir 2003; Wu 2002a, Islier 1998; Bölte 1994]

Zweite Zielrichtung hinsichtlich erweiterter Zielfunktionen ist die Berücksichtigung **zusätzliche Aspekte** der Planung und Optimierung in der Zielfunktion, wie z. B.:

- Nachbarschaftsanforderungen mit Closeness-Rating Logik [vgl. z. B. Chen, C.-W. 2005; Ferrari 2003; Sha 2001; Meller 1996b; Hassan 1987]
- Flächennutzung, Kompaktheit bzw. Raumkosten der entstehenden Anordnung [vgl. z. B. Ahmad 2006; Drira 2006; Hu 2004, Islier 1998; Bölte 1994]
- Erfüllungsgrade vordefinierter Elementflächenbedarfe [vgl. z. B. Islier 1998]
- (Un-)günstige Längen-/Breitenverhältnisse der verwendeten Elemente [vgl. Drira 2006; Logendran 2006; Shayan 2004; Hu 2004]

Metrik \ Bezugspunkte	Art der Entfernungsmessung			
	Rechtwinklig $p=1$	Euklidisch direkt $p=2$	Chebyshev $p=\infty$	Verkehrswege
Mittelpunkt eines flächenbehafteten Elementes				
Konnektorpunkt eines flächenbehafteten Elementes				
Minkowski-Metrik gültig für \mathcal{R}^2 : $d_{ik}(p) = (x_i - x_k ^p + y_i - y_k ^p)^{1/p}$	$d_{ik}(p=1) = x_i - x_k + y_i - y_k $	$d_{ik}(p=2) = \sqrt{ x_i - x_k ^2 + y_i - y_k ^2}$	$d_{ik}(p=\infty) = \max(x, y)$	

Abb. 4-4: Arten der Entfernungsmessung bezüglich Metrik und Bezugspunkten

- Umzugsaufwände/-kosten bei Anordnungsveränderungen («dynamische Anordnung» siehe auch Kapitel 4.2.3) [vgl. z. B. Drira 2006; Lahmar 2005; Jaramillo 2004; Dunker 2003; Heragu 2001; Bölte 1994; Domschke 1993]
- Ästhetik der Anordnung als subjektives Kriterium [vgl. z. B. Ahmad 2006]
- Auftragsreihenfolgeabhängige Aufwände bzw. Kosten [vgl. z. B. Mak 1998]
- Performance der Anordnung, Durchlaufzeit, Umlauf- / Werkstattbestand (WiP) [vgl. z. B. Meng 2004; Benjaafar 2000b; Domschke 1993]
- Lagerhaltungskosten [vgl. z. B. Bölte 1994; Domschke 1993]
- Nutzen bzw. Aufwand alternativer Anordnungen untergeordneter Struktureinheiten, z. B. für einzelne Zellen (Bottom-Up-Planung) [vgl. z. B. Meller 2004]
- Multikriterielle Ansätze mit Bewertung mehrerer spezifisch gewichteter Kriterien ähnlich Nutzwertanalyse [vgl. Chen, C.-W. 2005; Deb 2003; Islier 1998]
- Bewertung dynamischer bzw. zeitlicher Aspekte unter Verwendung der Simulation [vgl. Azadivar 2000; Hamamoto 1999]

4.2.3 Erweiterungen hinsichtlich der zugrunde liegenden Auftragslast

Hier lassen sich die zeitlichen **Entwicklung der Nachfrage bzw. des Produktionsprogramms** berücksichtigen. Dazu wird die Auftragslast über mehrere Planungspe-

rioden hinweg abgebildet, entweder deterministisch und a priori bekannt oder stochastisch streuend. Eine derartige Situation ermöglicht zwei Handlungsstrategien:

- »Robuste Anordnung«: Bestgeeignete Anordnung über alle Lastsituationen und Planungshorizonte hinweg³¹ [vgl. Braglia 2005; Kulturel-Konak 2004; Baykasoglu 2003; Aiello 2001; Benjaafar 2000a]
- »Flexible Anordnung«: Bestanpassbare Anordnung an die jeweilige Auftragslast³², d. h. ermittelt durch Gegenüberstellung von erreichbaren Verbesserungen bzw. Einsparungen und den dazu gegenläufigen Umzugskosten [vgl. Jaramillo 2004; Meng 2004; Heragu 2001; Balakrishnan 2000; Kochhar 1999]

4.2.4 Erweiterungen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Randbedingungen

Bezüglich der abbildbaren Randbedingungen stellt die MIP-/MILP-Modellierung das Referenzmaß dar. Die dort **modellierbaren Randbedingungen** werden jedoch zunehmend auch für die anderen Modellierungsverfahren zugänglich:

- Randbedingungen bezüglich **Abbildung** flächenbehäfteter Elemente
 - Flächenbedarf [vgl. Paul 2006; Kim 2005; Bukchin 2006; Islier 1998, Lacksonen 1997] und zulässige Geometrie [vgl. Bukchin 2006; Chae 2006; Barbosa-Póvoa 2002, 2001]
 - Zulässige Orientierungen [vgl. Chae 2006; Dunker 2003; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Tavares 2002a, 2002b; Chiang 2001]
 - Zulässige Längen-/Breitenverhältnisse [Anjos 2006; Logendran 2006; Paul 2006; Kim 2005; Wu 2002a, 2002b; Chiang 2001; Islier 1998]
 - Bezugspunkte zur Anbindung 1-dimensionaler Beziehungen [Chae 2006; Kim 2005; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Islier 1998]
- Randbedingungen bezüglich der **Anordnung** flächenbehäfteter Elemente
 - Fixe Anordnungsposition [vgl. Dunker 2003; Tavares 2002a, 2002b; Chiang 2001; McKendall 1999; Foulds 1998; Islier 1998; Mak 1998]
 - Relative Anordnung für Elementpaare [vgl. Tavares 2002a, 2002b; McKendall 1999]
 - Nachbarschaft für Elementpaare [Tavares 2002a, 2002b; Chiang 2001]

³¹ Zum Beispiel »Verteilte Anordnungen«, d. h. mehrere gleichartige Maschinen sind mehr oder weniger gleichmäßig über die Planungsgrundfläche verteilt [vgl. Baykasoglu 2003; Benjaafar 2000a]

³² Zum Beispiel durch »Modulare Anordnungen«, bei denen Module bei Bedarf hinzugefügt oder eliminiert werden, oder »Rekonfigurierbare Anordnungen« mit mobilen Ressourcen.

- Minimal bzw. maximal zulässiger Abstand für Elementpaare [Bukchin 2006; Tavares 2002a, 2002b; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Bazargan-Lari 2000, 1997]
- Wände und Durchgänge [vgl. Paul 2006]
- Minimal erforderliche Flächennutzung [vgl. Wu 2002a, 2002b]
- Restriktionen zur Erreichung von Sonderformen wie Fließlinien, geschlossenen Verkettungen bzw. Loops [vgl. Chae 2006; Bukchin 2006]
- Abstände von Elementen mit definierten Fähigkeiten oder Eigenschaften [vgl. Baykasoglu 2003]
- Hierarchiebezogene Randbedingungen wie z. B. feste Zuordnungen von Elementen zu übergeordneten Struktureinheiten [vgl. Hicks 2006]

Besonders relevant für die Skalierbarkeit der Verfahren sind Randbedingungen hinsichtlich 2-dimensionaler Beziehungen (Überschneidungen und Schnittsituationen):

- Überlappungen zwischen anzuordnenden Elementen sind grundsätzlich nicht zulässig, d. h. die 2-dimensionale Beziehungslogik steht nicht zur Verfügung.
- Alle Elemente sind grundsätzlich innerhalb der Planungsgrundfläche anzuordnen, d. h. eine Variation des Anordnungsverhaltens in Abhängigkeit von der entsprechenden Teilaufgabe steht nicht zur Verfügung

Die bei einigen Verfahren mögliche Definition optionaler Randbedingungen zur Sperrung bestimmte Bereiche der Planungsgrundfläche für die Anordnung [vgl. Dunker 2003; Tavares 2002a, 2002b; McKendall 1999] sind diesbezüglich nicht ausreichend.

4.2.5 Hybride Erweiterungen der klassischen Modellierungsverfahren

Diese Verfahren umfassen Erweiterungen bezüglich drei [vgl. Wu 2002a, 2002b; Foulds 1997]³³ oder sogar vier der beschriebenen Erweiterungskategorien [vgl. Castillo 2003, 2002a; Mak 1998]. Auch mit diesen integrierten Erweiterungen werden die grundsätzlichen Defizite der Verfahren hinsichtlich der in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen einer skalierbaren Modellierung nicht überwunden.

³³ Bei diesen Verfahren bestehen keine Möglichkeiten zur erweiterten Abbildung der Auftragslast.

4.3 Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen aus dem Bereich »Digitale Fabrik«

Der Bereich »Digitale Fabrik« ist softwareseitig nahezu ausschließlich von den beiden Anbietern SIEMENS/Tecnomatix und Dassault/Delmia dominiert. Die Produkte »**Layout Planner**«, »**PPR Hub**« und »**Process Engineer**« von Dassault/Delmia sowie »**FactoryFlow**«, »**FactoryCAD**«, »**FactoryPLAN**« und »**FactoryOPT**« von SIEMENS/Tecnomatix sind ursprünglich disjunkt entstanden. Daher herrschen noch immer gewachsene Strukturen vor. Die für die Anordnungsplanung erforderliche funktionale Tiefe und die aufgabenspezifischen Modellstrukturen werden bei den Dassault-Werkzeugen nicht bereitgestellt [vgl. Delmia 2006]. Die SIEMENS/Tecnomatix Werkzeugwelt ist besser auf die Anforderungen der Anordnungsplanung zugeschnitten. Die Modellierung ähnelt stark den beschriebenen klassischen Modellierungsverfahren, eine 2-dimensionale Beziehungslogik ist jedoch auch hier nicht verfügbar. Von einer skalierbaren Modellierung kann nicht ausgegangen werden [vgl. Tecnomatix 2008a; 2008c; Meyr 2002, S. 126-129, 153-155, 163-165; Scharf 2001, S. 30f, 51f].

4.4 Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen in kommerziellen Softwareprodukten

Kommerzielle Softwareprodukte zur Planung räumlicher Anordnungen sind sehr unterschiedlich positioniert. Sie unterscheiden sich zum einen hinsichtlich des angestrebten **Abdeckungsgrades** bezogen auf die verschiedenen Aufgaben des gesamten Planungsnetzes. Zum anderen variiert der Anspruch hinsichtlich der unterstützten **Planungstiefe** im Rahmen der Anordnungsplanung selbst in erheblichem Maße (Abb. 4-5).

Die **graphischen Werkzeuge** und »**Viewer**« vermitteln lediglich einen räumlichen Eindruck der in Planung befindlichen Anordnung. Sie stellen darüber hinaus wenig bis keine spezifischen Funktionen zur Unterstützung der Anordnungsplanung bereit. Diese Modellierungsverfahren haben somit ihre Stärken naturgemäß in der Repräsentation von Physis und Geometrie der flächenbehafteten Elemente. Logische Aspekte wie aufgabenspezifische Attribute und Beziehungslogiken sind nicht angelegt [vgl. Tecnomatix 2008a; 2008c; Meyr 2002, S. 74-82, 93-107].

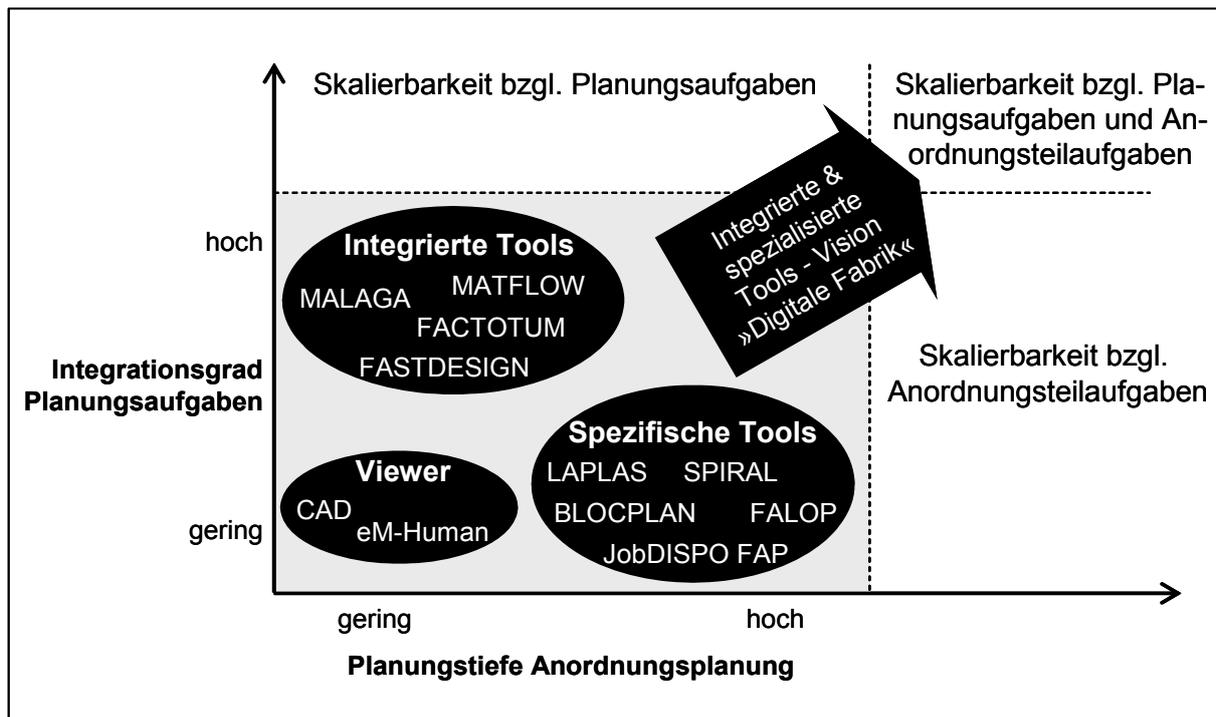


Abb. 4-5: Einordnung kommerzieller Softwareprodukte zur Anordnungsplanung

Die Modellierungen der **integrierten Tools** ähneln denen der beschriebenen klassischen Verfahren mit Erweiterungen. Die Erweiterungen beziehen sich vor allem auf Produktionsprogramm, Produktstruktur, Artikelstammdaten und Arbeitspläne sowie Aspekte der Behälter- und Transportplanung. Der Erfüllungsgrad der Anforderungen bzw. die Defizite dieser Verfahren orientieren sich ebenfalls an dieser Verfahrensklasse. So werden flächenbehaftete Elemente meist durch Rechtecke repräsentiert. Ziele sind meist lediglich in 1-dimensionaler Beziehungslogik zu definieren, 2-dimensionalen Beziehungskonstrukte sind nicht vorgesehen. Die Modellierungen sind somit definitiv nicht skalierbar [vgl. Sudhoff 2006; Meyr 2002, S. 119-142; Scharf 2001, S. 27-42; IAF 2008; Projecteam 2000].

Die spezifischen Tools für die Anordnungsplanung bieten meist eine breitere und qualitativ hochwertigere Unterstützung der entsprechenden Planungsaufgabe. Trotz eines höheren Systematisierungsgrades bezüglich Zielen und Randbedingungslogik können die grundsätzlichen Probleme und Verfehlungen der beschriebenen, wesentlichen Anforderungen nicht überwunden werden. Von einer durchgängig skalierbaren Modellierung kann auch hier in keinem der Fälle ausgegangen werden [vgl. Meyr 2002, S. 68-82; Scharf 2001, S. 44-46; IBAB 2006; Fauser 2006; Liggett 2000].

4.5 Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen in wissenschaftlich ausgerichteten Softwareprodukten

Jüngere anordnungsrelevante und eher wissenschaftlich ausgerichtete Softwareprodukte weisen schwerpunktmäßig folgende Entwicklungsrichtungen auf:

- Partizipative und interaktive Planung [vgl. Westkämper 2003b, S. 792f; 2001a; 2000a, Sihm 2000; Wirth 2001b; Förster 2001; Müller 2003]
- Verteilte und vernetzte Planung [vgl. Gäse 2005; Müller 2003]
- Skalierbare Modelle [vgl. Westkämper 2006b; TFB 059 2006; Kapp 2003]
- Fähigkeits- bzw. eigenschaftsbezogene Harmonisierungen und Abgleiche [vgl. SFB 467 2006; Beumelburg 2005]

Keiner der genannten Ansätze, auch nicht der bezüglich skalierbarer Planungsmodelle, hat im Bereich der Anordnungsplanung zu einer den Anforderungen genügenden Integration mit skalierbarer Modellierung geführt [vgl. Westkämper 2004c, S. 49f]. Auch der fähigkeits- oder eigenschaftsbezogene Ansatz bietet zurzeit erst rudimentäre Ansätze dieser Logik [vgl. SFB 467 2006; Beumelburg 2005]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass selbst den wissenschaftlich ausgerichteten Modellierungsverfahren die beschriebenen, nennenswerten Defizite zu attestieren sind.

4.6 Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen für Spezialfälle

Abschließend sollen noch einige Verfahren zur Modellierungen räumlicher Anordnungen für spezifische Sonderfälle betrachtet werden.

4.6.1 Verfahren für Spezialfälle bezüglich der Betrachtungsgegenstände

Diese Verfahren sollen die Entstehung **spezieller geometrischer Formen** der Anordnungen, wie z. B. linienförmige, in sich geschlossene sowie kreis- bzw. rechteckförmige Geometrien für automatisierte oder verkettete Anlagen, gewährleisten. Hierzu werden die klassischen Modellierungen verwendet, ergänzt um zusätzliche Randbedingungen, die das Anordnungsergebnis in die vorgegebene Form zwingen. Auch bei diesen Verfahren ist daher von den bereits mehrfach beschriebenen Defiziten auszugehen [vgl. Bukchin 2006; Brusco 2004; Chen, D.-S. 2001; Djellab 2001; Ponambalam 2001; Braglia 1997; Chae 2006; Lee, S.-D. 2001; Asef-Vaziri 2000].

Einen zumindest rudimentär **hierarchischen Aufbau** weisen die dem »Cellular Manufacturing« (CM) bzw. »Group Technology« (GT) zugeordneten Modellierungsverfahren auf. Diese basieren auf der Bildung von Teilefamilien bzw. Ablaufgruppen, der Bildung von Betriebsmittel- bzw. Maschinengruppen als Zellen, sowie zum Abschluss deren Anordnung. Letztgenannte Aufgabe weist zwei hierarchische Teilaspekte auf. In der detaillierteren sind innerhalb jeder einzelnen Zelle die dort zusammengefassten Betriebsmittel bzw. Maschinen anzuordnen, in der nächst höheren, also weniger detaillierten, sind die verschiedenen Zellen in ihrer Gesamtheit relativ zueinander anzuordnen [vgl. Dimopoulos 2000]. Selbst diese seit langem bekannte hierarchische Problematik hat bis heute zu keiner Modellierung geführt, die beide Teilaufgaben vollwertig bzw. durchgängig integriert und somit als skalierbar bezeichnet werden könnte [vgl. Chan 2004; Saad 2004; Solimanpur 2004; Baykasoglu 2003; Castillo 2003; Ho 2000; Salum 2000; Urban 2000; Bazargan-Lari 2000; Braglia 1997].

4.6.2 Verfahren für Spezialfälle bezüglich des Modellierungsansatzes

Weiterhin existieren an den klassischen Verfahren und deren Erweiterungen orientierte Spezialfälle mit hierarchischer Grundstruktur. Dies sind einerseits sogenannte Bay-orientierten Verfahren [vgl. Logendran 2006; Montreuil 2004a; Özdemir 2003; Castillo 2002c; Meller 1997a], mit einer CM ähnlichen Logik, andererseits auch Verfahren mit ineinander schachtelbaren Elementen [vgl. McKendall 1999]. Beide weisen gegenüber der ihnen zugrunde liegenden Klasse lediglich eine geringfügig bessere Durchgängigkeit im Sinne der Skalierbarkeit auf. Gänzlich neue Ansätze zur Abbildung des Anordnungsproblems, bei denen Beziehungen zwischen Elementen als Potenzialfelder mit anziehender bzw. abstoßender Wirkung [vgl. Kobayashi 2001], als Federkräfte [vgl. Castillo 2002b] oder als so genannte Sequenzpaare [vgl. Meller 2006] mit dem Ziel der Reduzierung der Lösungsvariablen beschrieben werden, überwinden die zuvor beschriebenen wesentlichen Verfahrensdefizite nicht.

4.7 Zusammenfassende Bewertung der Modellierungsverfahren

Ein Abgleich der vorgestellten Verfahrensklassen mit den in Kapitel 3 hergeleiteten Anforderungskriterien zeigt, dass keine der beschriebenen Modellierungen (vgl. Anhang 13.2) in der Lage ist, diese komplett und umfassend abzudecken (Abb. 4-6).

Bezüglich der Richtigkeit der Modellierungen, dies beschreibt die Repräsentation der flächenbehafteten Elemente, konnten wesentliche Defizite der klassischen Verfahren durch deren Erweiterungen kompensiert werden, nicht jedoch solche hinsichtlich Möglichkeiten zum Abgleich von Angeboten und Bedarfen der Elemente bezüglich Fähigkeiten, Eigenschaften und Flächenqualitäten sowie hinsichtlich der Parametrisierung der Elemente hierarchischer Systeme.

Auch bezüglich der Abbildbarkeit relevanter Beziehungen bleiben wesentliche Anforderungen unerfüllt. Kein Verfahren ermöglicht die durchgängige Modellierung 0-, 1- und 2-dimensionaler Beziehungen in Form von Zielen und Randbedingungen. Während 1-dimensionale Ziele meist noch hinreichend gut abgebildet werden, bestehen für die anderen Beziehungen wesentlich schlechtere Möglichkeiten. Geringere Abstriche sind für 0- und 1-dimensionale Randbedingungen, große Abstriche für die anderen Beziehungen, insbesondere für die 2-dimensionalen Konstrukte, die Ziele und Randbedingungen, zu machen.

Weitere Schwachstellen zeigen sich bezüglich der Vergleichbarkeit der Anordnungen und Anordnungsvarianten. Ursache sind Defizite der Bewertungslogik v. a. für Beziehungen. Definierbare Bezugspunkte und verwendbare Metriken zur Entfernungsmessung bieten oft noch einige Freiheitsgrade. Die spezifische Bewertung von Einzelbeziehungen und deren individuelle Verknüpfung zu einem die Anordnungsqualität beschreibenden Gesamtwert sind dagegen auf das deutlichste eingeschränkt.

Weiterer klarer Schwachpunkt der Verfahren ist der zur Erreichung der Skalierbarkeit besonders relevante systematische Aufbau. Nahezu alle Klassen lassen sowohl die zur Veränderung des Planungspunktes erforderliche Durchgängigkeit der Elemente und deren Beziehungen untereinander, als auch die erforderlichen Möglichkeiten zur Adaptionen von Elementen, Beziehungen und Anordnungsverhalten, vermissen.

Da keines der untersuchten Verfahren zur Modellierung räumlicher Anordnungen die vorgegebenen Praxisanforderungen hinreichend abdeckt, muss ein neues Verfahren entwickelt werden. Im Folgenden soll diese skalierbare Modellierung zunächst im Gesamtzusammenhang erläutert werden (Kapitel 5), um dann in den Kapiteln 6 bis 9 detaillierter mit Bestandteilen und Anwendungsaspekten beschrieben zu werden.

5 Lösungsansatz zur Verbesserung der Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Veränderte Anforderungen in globalisierten Märkten lassen eine in Produktionsbetrieben häufig anzutreffende suboptimale Arbeitsweise als zunehmend kritisch oder sogar Existenz gefährdend erscheinen. Ursachen solcher Arbeitsweisen sind unter anderem Defizite hinsichtlich der räumlichen Anordnung. Diese lassen sich vorwiegend auf Mängel der Verfahren zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der zugehörigen Anordnungsplanung zurückführen (vgl. Kapitel 1.2).

Wandlungstreiber in den Märkten zwingen die Produktionsbetriebe zu einem kontinuierlichen Wandel. Die Fabrikplanung spielt bei dessen Gestaltung eine bedeutende Rolle. Die Aufgaben der Fabrikplanung stehen hierbei in wesentlich verändertem Kontext. Eine kontinuierliche Planungsdurchführung und -bereitschaft führt zu neuen Anforderungen und Möglichkeiten für die Fabrikplanung im Allgemeinen und die Anordnungsplanung im Speziellen:

- Hoher Integrationsgrad der relevanten Disziplinen erfordert kontinuierliche und interdisziplinäre Planung im Team sowie partizipative Planungsdurchführung.
- Durchgängige Planung erfordert Konsistenz über die Hierarchie der unterschiedlichen Teilsysteme des Produktionsbetriebs und der zugehörigen Teilaufgaben der Planung hinweg [vgl. Gäse 2006].
- Iterative Planung mit maximalen Freiheitsgraden zur Navigation im Planungsnetz erfordert eine variable Planungs- bzw. Vorgehensrichtung (Top-down und Bottom-up) sowie die jederzeit wahlfreie Definition des Planungspunktes.
- Verkürzte Planungsdauer sowie verbesserte Planungsqualität und Planungssicherheit erfordern Modellierungen mit realitätsnäheren Abbildungsmöglichkeiten und skalierbaren Planungsmodellen (Leistungsfähigkeit, Systematik und Durchgängigkeit).

Existierende **traditionelle Modellierungen** werden diese Anforderungen eben so wenig gerecht, wie diejenigen mit **integrativem Anspruch** (siehe Kap. 1). Defizite hinsichtlich Richtigkeit, Abbildungsumfang, Vergleichbarkeit und systematischem Aufbau führen zur Verfehlung der neuen und zukünftigen Anforderungen. Dies betrifft die geforderte Qualität ebenso wie den zulässigen Aufwand (Abb. 5-1). Diese Model-

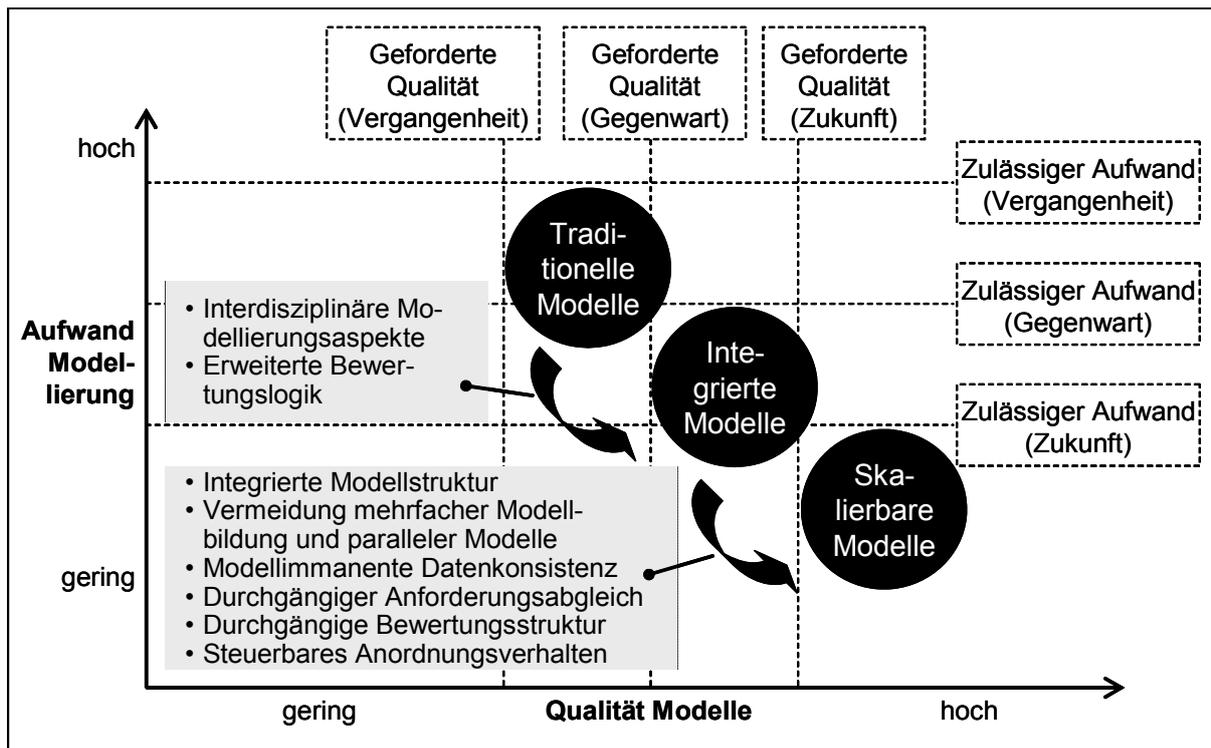


Abb. 5-1: Effekte skalierbarer Modelle und zugehöriger Modellierungen

Modellierungen sind für die geforderte kontinuierliche Planung im gesamten hierarchischen Kontext des Produktionsbetriebs nur äußerst bedingt geeignet. Herkömmliche Modellierungen und durch ihre Anwendung entstehende Modelle sind so weder in der Lage eine sichere Entscheidungsgrundlage bezüglich der Planungsvarianten, noch eine sichere Indikation für den Bedarf einer Anordnungsänderung zu liefern. Die aktuell verfügbare modellbasierte Planung birgt so stets die immanente Gefahr einer Fehleinschätzung von realem Aufwand und Nutzen einer Anordnung, also deren Wirtschaftlichkeit insgesamt. Hieraus kann ein Glaubwürdigkeitsverlust der Bewertung resultieren, der anordnungsbezogene Entscheidungen verstärkt subjektiven Einflüssen aussetzt. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Qualität und zur Reduzierung des Aufwandes in der Planung stellen **skalierbare Modellierungen** dar. Verbesserte Planungsmodelle lassen sich dann erstellen, wenn die Modellierung hinsichtlich möglichst aller für die Planung relevanter Skalen skalierbar ist.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung wird diesen erhöhten Anforderungen gerecht und ermöglicht so eine objektive und nachvollziehbare Grundlage für sämtliche im Zusammenhang mit Anordnungsaspekten stehende Ent-

scheidungen. Die Entscheidungsqualität wird durch die kontinuierliche und durchgängige Planung über alle Planungs- und Lebenslaufphasen des Systems Produktionsbetrieb bzw. seiner relevanten Teilsysteme hinweg gewährleistet und unterstützt so die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der Produktionsbetriebe.

Die **Weiterentwicklung des Verfahrens** im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich auf folgende Einzel- bzw. Teilaspekte (Abb. 5-2):

- Verbesserte Repräsentation der flächenbehafteten Elemente
- Erweiterte Abbildungsmöglichkeiten für Beziehungen zwischen den flächenbehafteten Elementen
- Erweiterte und verbesserte Bewertungslogik
- Steuerbares Anordnungsverhalten in Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen der Planungsteilauflage

Wesentlicher Grundgedanke hinsichtlich der **verbesserten Repräsentation der flächenbehafteten Elemente** ist die strenge Orientierung der gesamten Abbildungslogik an den Anforderungen der Systemtechnik und auf dieser Grundlage eine hierarchieübergreifende Modellierung. Durch einheitliche Gestaltung von Attributsätzen und Anordnungsverhalten der flächenbehafteten Elemente wird eine die Skalierung grundsätzlich verhindernde Differenzierung zwischen Elementen mit Standortträger-

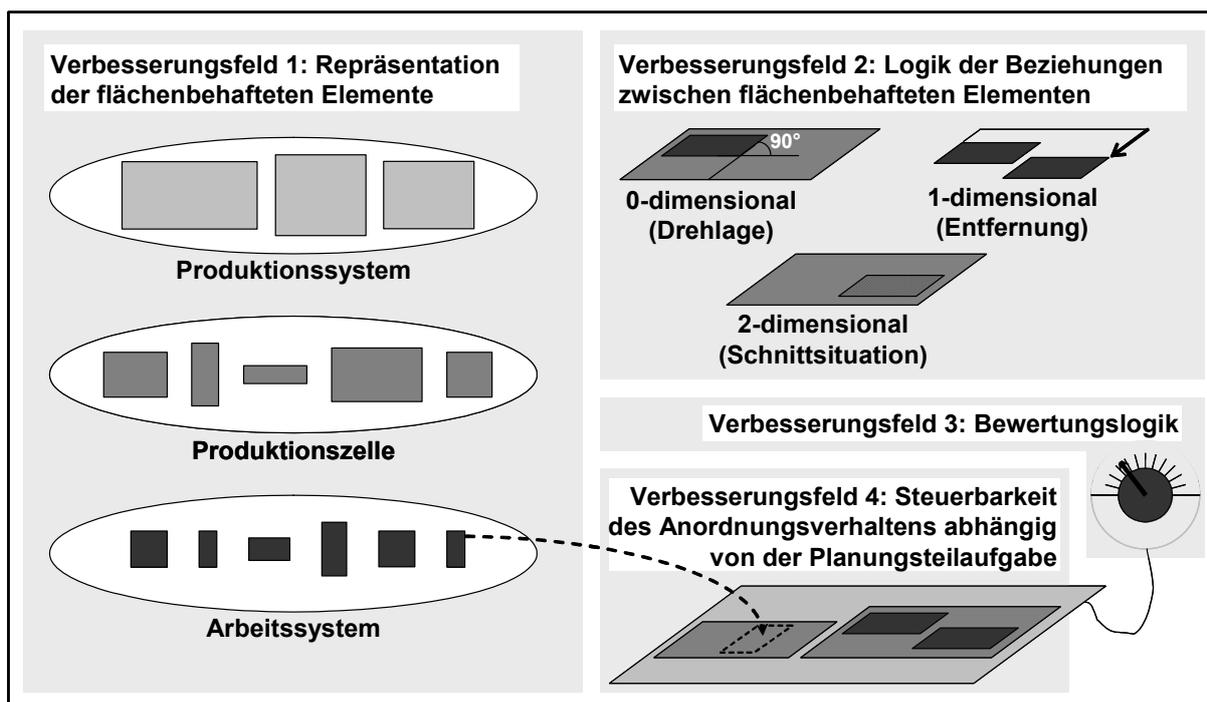


Abb. 5-2: Durch das verbesserte Verfahren adressierte Teilaspekte

funktion einerseits und anzuordnenden Elementen andererseits überwunden. In Abhängigkeit vom aktuellen Planungspunkt kann ein Element so zu gegebener Zeit Standortträgerfunktion wahrnehmen, bei Veränderung des Planungspunktes jedoch sofort wieder als anzuordnendes Element fungieren. Um gleichartige bzw. gleichwertige flächenbehaftete Elemente des Produktionsbetriebs jedoch in entsprechenden Klassen zusammenfassen zu können, ist der Attributsatz so zu gestalten, dass sich die Anordnungshierarchie abbilden lässt. Vergleichbar Abb. 5-2 links können so z. B. jeweils alle Arbeitssysteme, Produktionszellen oder Produktionssysteme repräsentierende flächenbehaftete Elemente in einer Klasse zusammengefasst werden. Diese Struktur lässt sich für logische Aufbauelemente des Produktionsbetriebs wie auch für bauseitige Konstruktionselemente, z. B. die Stützen einer Halle, nutzen. Diese Logik bietet gleichzeitig die Grundlage zur Etablierung einer Zuordnungsstruktur. Über diese kann z. B. für alle flächenbehafteten Elemente einer einzelnen Klasse definiert werden, dass diese ausschließlich im Bereich bzw. unter Erreichung einer Schnittsituation mit Elementen einer anderen Klasse angeordnet werden dürfen.

Der weitere Attributsatz der flächenbehafteten Elemente umfasst alle anordnungsrelevanten Attribute mit geometrischem wie auch logischem Charakter. Zu unterscheiden sind von der Anordnungsposition unabhängige Primärattribute, z. B. der erforderliche Flächenbedarf, spezifische Abmessungen, die geometrische Form insgesamt oder definierte Anknüpfungspunkte für Beziehungen. Für bereits angeordnete Elemente werden zusätzlich Bestimmungsparameter aus der Anordnung zurückgegeben, so z. B. die Koordinate des Referenzpunktes oder die Elementorientierung in der Anordnung. Als Vorgabe für die Primärattribute der Elemente kommen diskrete Einzelwerte oder auch Wertebereiche in Frage. Dies kann beispielsweise die einzelnen Abmessungen eines Elementes betreffen, jedoch auch rechnerisch gebildete Größen wie z. B. das Längen-Breiten-Verhältnis eines rechteckigen Elementes. Hiermit lassen sich sehr schmale, dafür jedoch sehr langgezogene und daher nicht praxistaugliche Elementgeometrien verhindern. In gleicher Art und Weise können so beispielsweise die minimal bzw. die maximal zulässige Dimension oder die zulässige Flächenabweichung nach oben bzw. nach unten limitiert werden.

Um die Elemente mit ihrem planungsfallsspezifischen Bedarf bzw. Angebot hinsichtlich unterschiedlichster Eigenschaften und Charakteristika vollumfänglich beschrei-

ben zu können, sind zu den vorgegebenen Attributen zusätzlich frei definierbare Attribute gefordert. Zu diesen ist eine umfassende und intelligente Logik zu etablieren, die eine Harmonisierung spezifischer Bedarfe und Angebote im Rahmen der Anordnungsplanung durchgängig unterstützt. In der Praxis werden Bedarfe bzw. Angebote z. B. zur Beschreibung funktionaler Fähigkeiten, ausstattungsseitiger Gegebenheiten bzw. Eigenschaften oder auch qualitativer Aspekte der flächenbehafteten Elemente benötigt.

Die zu beplanende Fläche wird durch die von x- und y-Achse aufgespannte Ebene definiert. Achsen und zu beplanende Fläche sind in kontinuierlicher Logik modelliert. Mit zusätzlicher Einführung einer z-Achse ist die neu entwickelte Modellierung ohne Einschränkung der sonstigen Möglichkeiten und Charakteristika in der Lage, planerische Aufgaben zur Anordnung in mehrgeschossigen Umgebungen zu handhaben. Die Integration von Teilmodellen in einem umfassenden Gesamtmodell, das verschiedene Planungsteilaufgaben unterstützt, ist in Abb. 5-3 dargestellt.

Hinsichtlich der **erweiterten Abbildungsmöglichkeiten für Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen** bestimmen vier Leitgedanken den Lösungsansatz für das im Rahmen der Arbeit entwickelte, verbesserte Modellierungsverfahren:

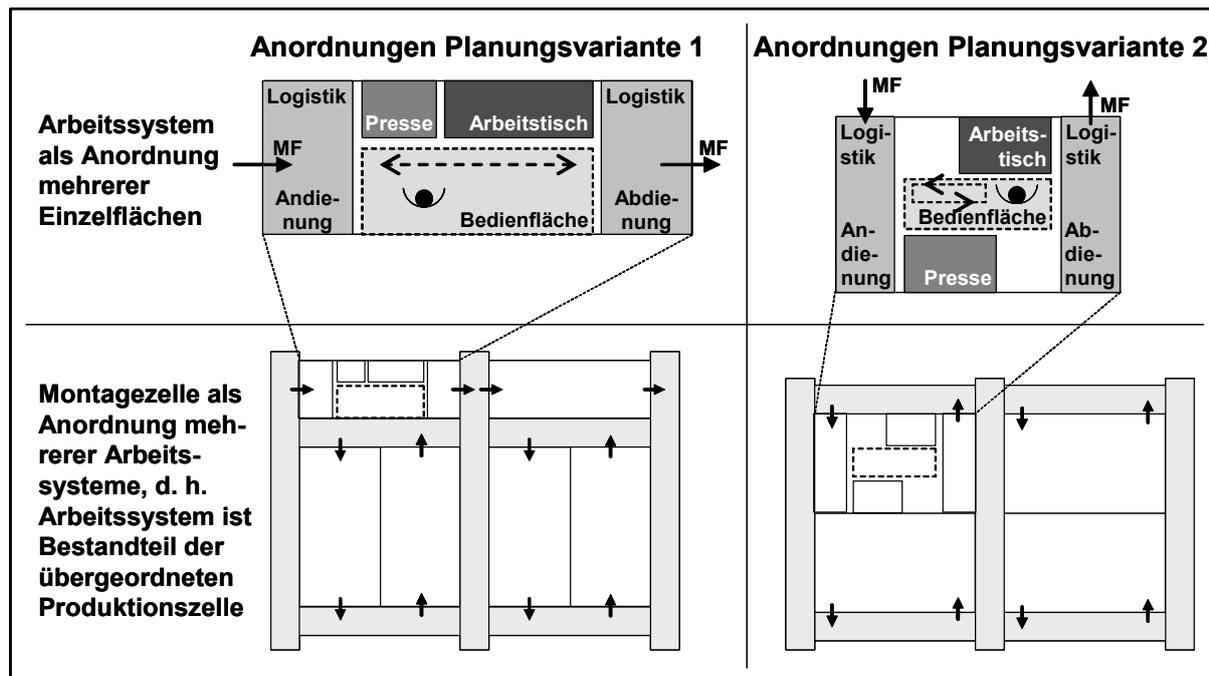


Abb. 5-3: Beispiel zur Integration der beiden Teilmodelle Arbeitssystem und Montagezelle als Voraussetzung zur freien Variation des Planungspunktes

- Abgebildet werden können die drei unterschiedlichen Beziehungsarten, nämlich Austausch-, Anforderungs- und Zuordnungsbeziehungen.
- Zur Verfügung steht je ein spezifisches Konstrukt für jede bezüglich Dimension unterschiedliche Art von anordnungsrelevanten Bestimmungsparametern, d. h. also 0-dimensionale (Drehlage), 1-dimensionale (Entfernung bzw. Abstand) sowie 2-dimensionale Beziehungen (Fläche bzw. Flächenschnitt).
- Die unterschiedlichen Beziehungskonstrukte lassen sich jeweils alternativ als Ziel oder als Randbedingung ausprägen.
- Die Ziel- und Randbedingungskonstrukte lassen sich jeweils in einer konvergierenden Logik (zentralisierende bzw. vereinheitlichende Wirkung) oder alternativ in einer divergierenden Logik (dezentralisierende bzw. differenzierende Wirkung) ausprägen.

0-dimensionale Beziehungen betreffen die Drehlage flächenbehaffeter Elemente. Mit ihnen werden vorwiegend Anforderungsbeziehungen abgebildet. Solche können beispielsweise bei Mehrmaschinenbedienung dazu dienen, Maschinen mit einer definierten relativen Ausrichtung anzuordnen, z. B. identisch orientiert. **1-dimensionale Beziehungen** haben Entfernungen bzw. Abstände zum Gegenstand und werden ebenfalls vorwiegend zur Abbildung spezifischer Anforderungsbeziehungen, jedoch auch von Austauschbeziehungen verwendet. **2-dimensionale Beziehungen** referenzieren flächige Konstrukte, wie z. B. Schnittflächen mehrerer flächenbehaffeter Elemente. Sie werden schwerpunktmäßig zur Abbildung spezifischer Anforderungs- und Zuordnungsbeziehungen genutzt. Diese Beziehungen beeinflussen in wesentlicher Art und Weise die relative Anordnung der flächenbehaffeten Elemente. Das neu zu entwickelnde Modellierungsverfahren ermöglicht somit im Gegensatz zu den herkömmlichen die Definition von Beziehungen zu sämtlichen unterschiedlichen Arten von Bestimmungsparametern, also Drehlage, Entfernung und Flächenschnitt. Die verschiedenen Arten der Bestimmungsparameter lassen sich dabei entweder unmittelbar bzw. direkt oder mittelbar bzw. indirekt beeinflussen. Randbedingungen sind in jedem Falle zu erfüllen und führen im Falle ihrer Nichterfüllung zur Unzulässigkeit der gesamten Anordnung. Für die Ziele dagegen wird eine möglichst weitgehende Realisierung angestrebt. Je besser sie umgesetzt werden können, umso größer ist der positive Beitrag zur Gesamtbewertung. Die Gesamtbewertung erfolgt im Normalfall quantifiziert in Form eines Zielwertes.

Das verbesserte Modellierungsverfahren sieht für Beziehungen zwei alternative Logiken vor, entweder eine 1:1-Formulierung oder eine 1:m- bzw. n:m-Logik. Eine Beziehung in 1:1-Logik wird explizit zwischen zwei flächenbehafteten Elementen definiert. In 1:m- bzw. n:m-Logik modellierte Beziehungen beziehen sich dagegen nicht explizit auf einzelne flächenbehaftete Elemente, sondern implizit über die Logik der freien Attribute der Elemente. In Abb. 5-4 sind die Zusammenhänge zwischen 1:1- und 1:n- bzw. n:m-Logik in einem planerischen Gesamtzusammenhang beispielhaft anhand von 2-dimensionalen Randbedingungen dargestellt.

Die realitätsnahe Abbildung der Beziehungen im Allgemeinen erfordert darüber hinaus, vergleichbar wie bei den flächenbehafteten Elementen, die Möglichkeit zur Parametrisierung der anordnungsrelevanten Attribute. Primärattribute der Beziehungen sind insbesondere die referenzierten flächenbehafteten Elemente, ggf. die dortigen Anknüpfungspunkte für die 1-dimensionalen Beziehungen, die Beziehungsintensität sowie die zugeordneten Methoden zur Ermittlung der Bestimmungsparameter und zur Bewertung der Einzelbeziehung. Die Bewertungsmethode kann als Rechenvorschrift zur Transformation der ermittelten Bestimmungsparameter in die übergeordnete Bewertungsgröße aufgefasst werden. Neben diesen Vorgabewerten stellen auch hier die aus der Anordnung resultierenden, zurückgegebenen Bestimmungsparameter

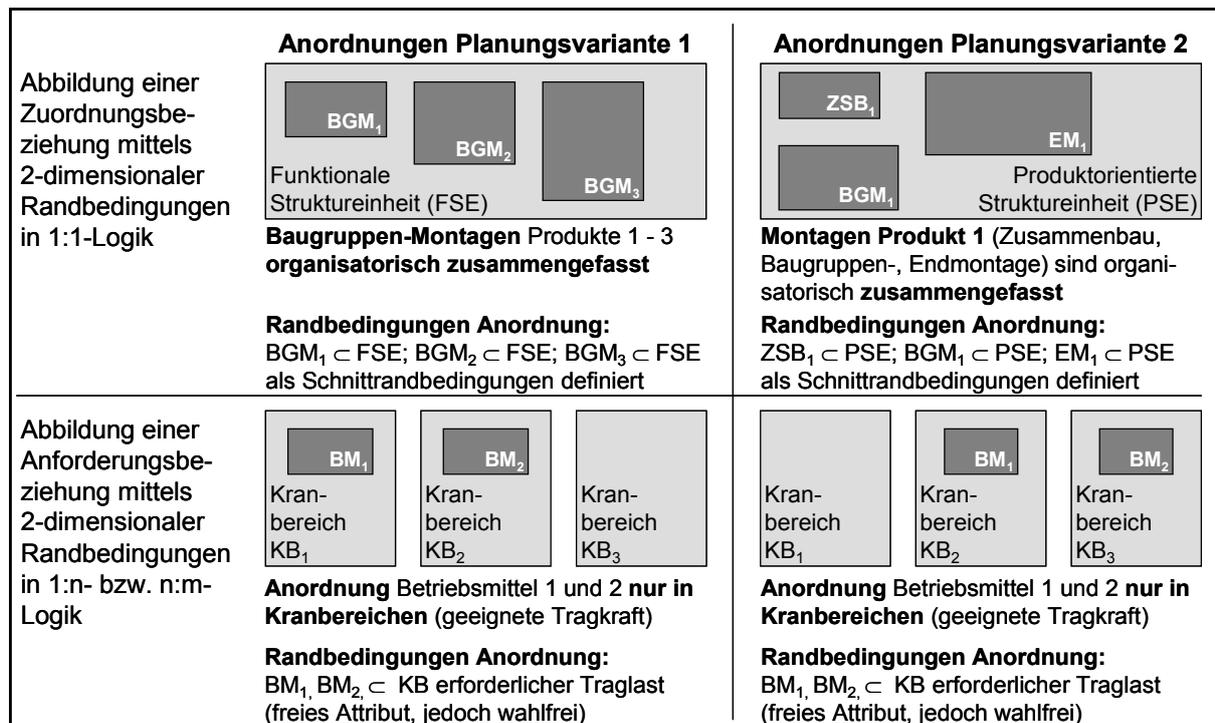


Abb. 5-4: Beispielhafte Darstellung der 1:1- und 1:n- bzw. n:m-Logik anhand 2-dimensionaler Randbedingungen

parameter weitere Attribute dar. Bei Randbedingungslogik lassen sich zulässige Wertebereiche für die Bestimmungsparameter definieren. Zur näheren Spezifizierung der Beziehungen ist auch hier eine Logik freier Attribute vorzusehen. Mit dem Vorzeichen des die relative Intensität der Beziehungen bestimmenden Attributes lässt sich der bereits angesprochene Grundcharakter der Beziehungen alternativ mit zentralisierender oder dezentralisierender Wirkung ausprägen.

Hinsichtlich der **erweiterten und verbesserten Bewertungslogik** sind folgende Leitgedanken für den Lösungsansatz des im Rahmen der Arbeit entwickelten, verbesserten Modellierungsverfahrens führend:

- Nutzbarkeit aller drei unterschiedlicher Arten von Bestimmungsparametern (0-, 1- und 2-dimensional) für multikriterielle Bewertungen
- Alternative Methoden zur Ermittlung der jeweiligen Bestimmungsparameter, z. B. euklidisch-direkte Messung und rechtwinklige Messung der 1-dimensionalen Bestimmungsparameter bzw. Entfernungen
- Freie Definierbarkeit spezifischer Methoden zur Bewertung von einzelnen Zielen und zur Verknüpfung dieser Einzelbeziehungen zum Gesamtzielwert mittels Verwendung einer Methodensprache und freiem Zugriff derselben auf alle Attribute, inkl. freie, und Bestimmungsparameter des jeweiligen Modells

Die Nutzbarkeit aller unterschiedlichen 0-, 1- und 2-dimensionalen Bestimmungsparameter gewährleistet eine große Mächtigkeit der Bewertungslogik. Hiermit werden sämtliche anordnungsrelevante Aspekte der Bewertung zugänglich gemacht, also definitionsgemäß genau diejenigen, die direkt oder indirekt von den Bestimmungsparametern Drehlage, Entfernung bzw. Abstand und Fläche abhängen. Dabei lassen sich bereits die Bestimmungsparameter der Anordnung mit unterschiedlichen Logiken ermitteln. Beispiele für Metriken zur Messung von Entfernungen bzw. Abständen, also der 1-dimensionalen Bestimmungsparameter von Anordnungen, wurden für Fragestellungen in der Ebene bereits in Abb. 4-4 dargestellt. Zusätzliche oder sinnvoll angepasste Metriken sind für Fragestellungen der Mehrgeschossplanung erforderlich. Unterschiedliche Metriken zur Flächenermittlung, also der 2-dimensionalen Bestimmungsparameter von Anordnungen, sind insbesondere auch bei Mehrgeschossplanungen vorstellbar. Beispielhaft sei hier neben der standardmäßigen Ermittlung von in identischer x-y-Ebene angeordneten, sich direkt überschneidenden Elemen-

ten, eine zweite Metrik genannt. Dabei lassen sich Überschneidungen von in unterschiedlichen x-y-Ebenen angeordneten flächenbehafteten Elementen unter Verwendung von deren jeweils zugehörigen Projektionsflächen ermitteln.

Die freie Definierbarkeit der Methoden zur Bewertung von Einzelbeziehungen und derjenigen zu deren Verknüpfung zum Gesamtzielwert gewährleistet eine umfassende, realitätsnahe und vergleichbare Beziehungsbewertung. Umfassende, multikriterielle Bewertungsmöglichkeiten werden insbesondere dadurch erreicht, dass für jede Beziehung bzw. jedes Kriterium der ermittelte Bestimmungsparameter maßgeschneidert verknüpft und so die Beziehung individuell berechnet und gewichtet werden kann. So existieren kaum äußere Zwänge, die dazu führen, dass Beziehungen einer Bewertung nicht zugänglich sind oder aufgrund unpassender bzw. sogar fehlerhafter Bewertung besser vernachlässigt werden. Zur realitätsnahen Beziehungsbewertung sind freie und intelligent verknüpfbare mathematische Beschreibungen erforderlich. Solche Beschreibungen umfassen beispielsweise bedingte Ausdrücke. Für 1-dimensionale Beziehungen, die einen Materialfluss zwischen zwei flächenbehafteten Elementen abbilden, kann der Beziehung so beispielsweise in Abhängigkeit von der Transportentfernung jeweils ein unterschiedlicher Kostensatz zugeordnet werden. Dieser berücksichtigt die Entfernungsabhängigkeit des auszuwählenden bzw. des in der betrieblichen Realität zu verwendenden Transportmittels und stellt die Verwendung des zugehörigen spezifischen Kostensatzes zur Bewertung der Beziehung sicher (Abb. 5-5). Übergeordnet wird auf diese Weise gleichzeitig die umfassende Vergleichbarkeit der unterschiedlichsten definierten Beziehungen gewährleistet.

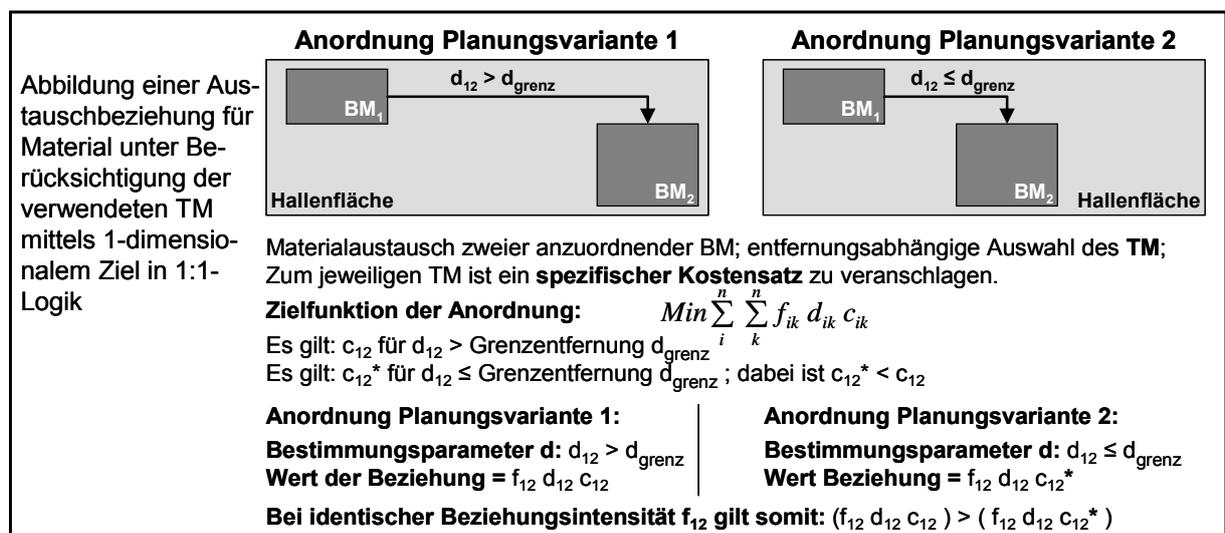


Abb. 5-5: Bewertung transportmittelabhängiger Kosten einer Austauschbeziehung

Denselben Anforderungen gehorchend, lassen sich weiterhin spezifische Ziele bezüglich 2-dimensionaler Beziehungen formulieren. Diese Beziehungslogik schafft insbesondere die Voraussetzung für die im Rahmen der Anordnungsplanung geforderte Harmonisierung bzw. gegenseitige Abstimmung von Angeboten und Bedarfen der flächenbehafteten Elemente. So können Kosten abgebildet werden, die von der Ausstattung bzw. der Beschaffenheit desjenigen Elementes abhängen, innerhalb dessen ein anderes Element angeordnet wird. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um Kosten abzubilden, die anfallen, wenn ein vorhandener Fußboden infolge der Anordnung eines bestimmten Betriebsmittels mit ESD-Funktion aufgerüstet werden muss (Abb. 5-6). Kosten entstehen dabei ausschließlich und genau in dem Falle, in dem das anzuordnende Element (BM₁) nicht innerhalb eines anderen Elementes angeordnet wird, das diese Fußbodenbeschaffenheit aufweist bzw. anbietet. Von welchem Element das Angebot genutzt wird, ist durch die verwendete 1:n-Logik ohne Bedeutung. In Planungsvariante 1 entstehen somit keine Zusatzkosten zur Aufrüstung des Fußbodens, da das anzuordnende Element (BM₁) dort angeordnet wird, wo bereits eine entsprechende Bodenqualität realisiert ist. In Planungsvariante 2 dagegen entstehen Zusatzkosten zur Aufrüstung des Fußbodens, da BM₁ innerhalb eines anderen Elementes angeordnet ist, das die erforderliche Fußbodenbeschaffenheit zurzeit nicht anbieten kann und entsprechend aufgerüstet werden muss.

Zur Erreichung eines bezüglich der spezifischen Anforderungen der unterschiedlichen Planungsteilaufgaben differenzierten und in Abhängigkeit vom aktuellen Pla-

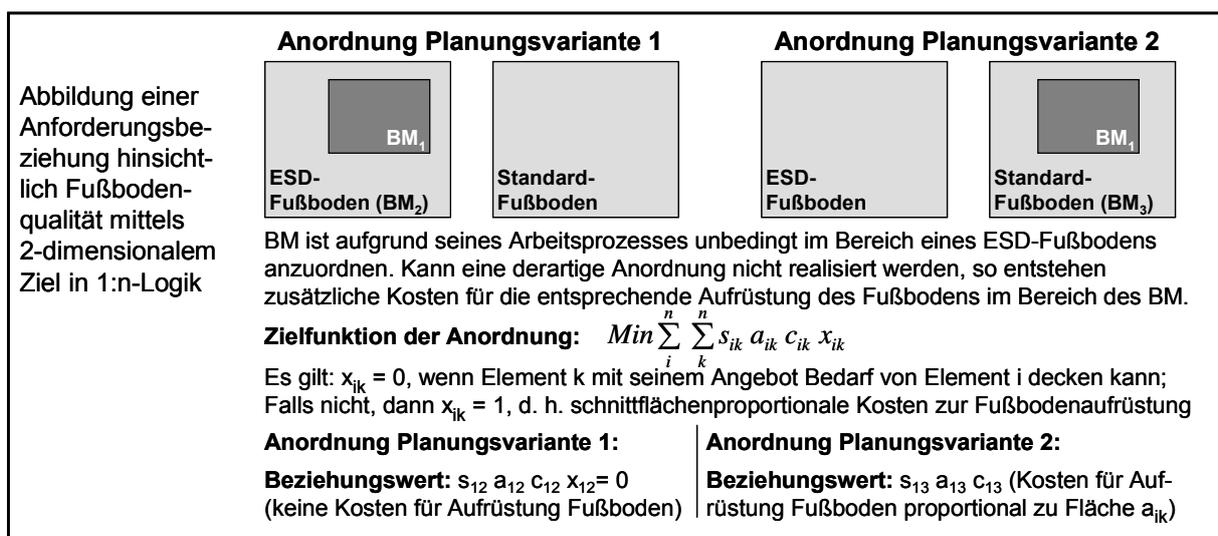


Abb. 5-6: Bewertung anordnungsabhängiger Kosten einer Anforderung an den Fußboden (ESD) mittels 2-dimensionalem Ziel in 1:n-Logik

nungspunkt einfach **steuerbaren Anordnungsverhaltens** sind folgende Leitgedanken für den Lösungsansatz des im Rahmen der Arbeit entwickelten, verbesserten Modellierungsverfahrens führend:

- Nutzbarkeit der 2-dimensionalen Randbedingungen für die Ausprägung eines für die jeweilige Planungsteilaufgabe spezifischen Anordnungsverhaltens
- Nutzbarkeit des Attributes, das die Stellung bzw. Funktion der Elemente in der Anordnungshierarchie beschreibt, zur Steuerung des Anordnungsverhaltens

Als 2-dimensionale Beziehungen ausgeprägte Randbedingungen ermöglichen die Etablierung eines intelligenten Anordnungsverhaltens. Ein solches zeichnet sich vor allem durch flexible Anpassbarkeit an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Planungsteilaufgabe bzw. des aktuellen Planungspunktes aus. Sollen z. B. bei der Generalstrukturplanung übergeordnete Funktionsbereiche innerhalb einer Halle mit gegebenem Stützenraster angeordnet werden, so bleibt die Überschneidung der anzuordnenden Bereiche mit den einzelnen Stützen normalerweise ohne Berücksichtigung. Ein Schnitt von Funktionsbereich mit einzelnen Stützen führt so zu keiner unzulässigen Anordnung. Dagegen ist bei der auf diesen Ergebnissen aufbauenden Betriebsmittelaufstellungsplanung die Überschneidung von Betriebsmitteln und Stützen im Regelfalle nicht zulässig. Ein Schnitt zwischen Betriebsmittel und einzelner Stütze führt so im Normalfall zur Unzulässigkeit der gesamten Anordnung (Abb. 5-7).

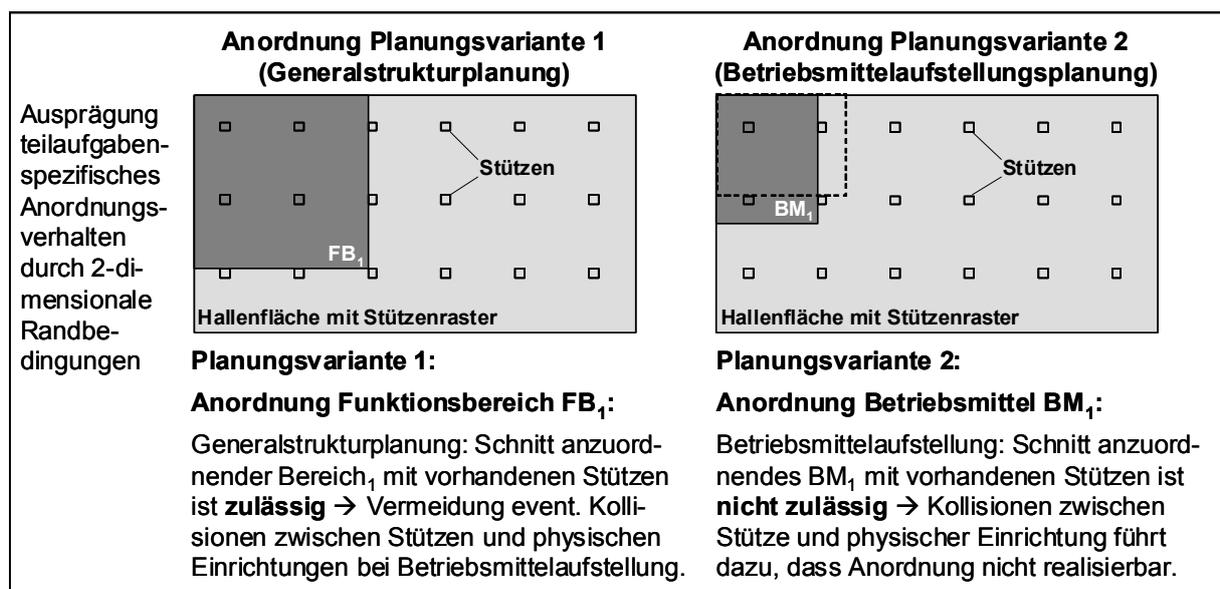


Abb. 5-7: Differenziertes Anordnungsverhalten für unterschiedliche Planungsteil-aufgaben mittels 2-dimensionaler Randbedingungen

Das beschriebene differenzierte Anordnungsverhalten kann erreicht werden, wenn im Falle der Betriebsmittelaufstellung 2-dimensionale Randbedingungen modelliert und aktiviert sind, die bei Überschneidung von Betriebsmitteln und Stützen automatisch zur Unzulässigkeit der Anordnung führen. Diese Randbedingungskonstrukte dürfen dagegen im Falle der Generalstrukturplanung nicht aktiviert sein.

Einfach steuerbar ist das Anordnungsverhalten insbesondere dann, wenn erforderliche Randbedingungen durch den Planer nicht explizit in ihrer vollen Kombinatorik, d. h. für jedes einzelne Betriebsmittel mit jeder einzelnen Stütze aufwändig definiert bzw. modelliert werden müssen. Zur Erzeugung der erforderlichen Randbedingungen lässt sich vielmehr dasjenige Attribute eines flächenbehafteten Elementes nutzen, mit dem dessen jeweilige Stellung und Funktion innerhalb der Anordnungshierarchie spezifiziert ist. Für den Fall der Betriebsmittelaufstellung bedeutet dies die automatisierte Ausprägung von Randbedingungen zwischen allen Elementen des Typs »Betriebsmittel« und allen Elementen des Typs »Stütze«. So wird die Überschneidungsfreiheit sämtlicher Betriebsmittel mit allen definierten Stützen sichergestellt.

Mit dem beschriebenen, streng an den in Kapitel 3 hergeleiteten spezifischen Anforderungen orientierten Lösungsansatz wird gegenüber den bekannten Verfahren eine wesentlich verbesserte Modellierung der Produktionsbetriebe zum Zwecke der Anordnungsplanung gewährleistet.

Die folgenden Kapitel erläutern detaillierter das neue Modellierungsverfahren mit seinen erforderlichen, verbesserten Strukturen (Kapitel 6) sowie deren weitergehende Nutzung (Kapitel 7) im Rahmen der Bewertung (Kapitel 7.1) und für die Steuerung des Anordnungsverhaltens (Kapitel 7.2). Die strukturellen Verbesserungen beziehen sich sowohl auf die Modellierungskonstrukte der flächenbehafteten Elemente (Kapitel 6.1) als auch auf die Beziehungen zwischen denselben (Kapitel 6.2). Anhand des Verfahrensablaufs werden diese übergeordneten Aspekte im Anschluss daran im Sinne des Gesamtablaufs von Planung und Modellierung, der eigentlichen Realitätsabbildung, sowie der Auswahl und Anwendung von Elementen und Methoden miteinander verknüpft (Kapitel 8). Dies beinhaltet jeweils das in Form von Regeln repräsentierte Know-how der spezifischen Anwendung in der Anordnungsplanung.

6 Struktur des verbesserten Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Die Struktur des Modellierungsverfahrens wird durch die Elemente, hier definitionsgemäß alle flächenbehafteten, und deren wechselseitige Beziehungen beschrieben.

6.1 Abbildungslogik der flächenbehafteten Elemente

Im Rahmen der Anordnungsplanung können alle physischen und somit flächenbehafteten Realobjekte der unterschiedlichsten Teilsysteme des Gesamtsystems Produktionsbetrieb relevant sein. Sie sind daher vollumfänglich einer möglichen Abbildung im Modell zugänglich zu machen. Als relevante Realobjekte kommen produktions-technische, logistische, infrastrukturbezogene und bauliche Einrichtungen, organisatorische Einheiten, funktionale Nutzungen oder Grundstücke bzw. Grundstücksteile in Frage [vgl. z. B. Grundig 2000, S. 151 6f; Aggteleky 1990a, S. 586 5f]. Im Kontext des verbesserten Modellierungsverfahrens werden die modellierten flächenbehafteten Realobjekte nachfolgend zusammenfassend als »Flächenelemente« bezeichnet.

In der Anordnungsplanung zu handhabende Flächenelemente sind im Planungsnetz im Regelfall bereits Gegenstand vorgelagerter Planungsschritte. Aufgabe des verbesserten Modellierungsverfahrens ist es somit auch, sämtliche dieser anordnungsrelevanten Informationen aus den vorhergehenden Schritten abzubilden. In der »Prozess- und Ressourcenplanung« können z. B. Vorgaben zu Größe und Geometrie der Flächenelemente, bestimmten Abmessungen und spezifischen Orientierungen, für Anbindungspunkte des Materialflusses oder Austauschbeziehungen im Allgemeinen, für fixe Positionierungen sowie für Angebote und Bedarfe bezüglich unterschiedlichster anordnungsrelevanter Aspekte und Kriterien entstehen. In der Planungsaufgabe »Dimensionierung« können Flächenbedarf und Abmessungen detailliert sowie in der »Segmentierung« bestimmte Zuordnungsstrukturen sowie die logische Stellung der Flächenelemente in der planerischen Hierarchie spezifiziert werden.

6.1.1 Grundcharakteristik zur Abbildung von Flächenelementen

Hinsichtlich der Abbildungsqualität der Flächenelemente sind neben dem Umfang der abbildbaren anordnungsrelevanten Attribute weitere Grundcharakteristika von wesentlicher Bedeutung. Die übergeordnete Anforderung hinsichtlich Skalierbarkeit

bedingt zunächst **drei Grundanforderungen** für das verbesserte Modellierungsverfahren. Dies ist zum ersten eine strenge Orientierung der Modellierung an den Anforderungen der **Systemtechnik**. Diese Logik kennt ausschließlich Elemente und wechselseitige Beziehungen zwischen diesen Elementen. Sowohl die Elemente wie auch die Beziehungen werden jeweils durch entsprechende spezifische Attribute weitergehend beschrieben. Auf alle diese Konstrukte kann mittels entsprechender Methoden zugegriffen werden. Die Methoden sind dabei in der Lage, unterschiedlichste Verknüpfungen zwischen diesen Elementen bzw. deren Attributen herzustellen. Solche passiven Methoden werden beispielsweise für Bewertungsaufgaben benötigt. Darüber hinaus können Methoden auch einen aktiven Charakter haben, d. h. sie sind in der Lage, entsprechende Attribute von Elementen oder Beziehungen zu verändern. Die passiven Methoden beziehen sich somit eher auf den strukturellen Aspekt, die aktiven eher auf die dynamischen Aspekte des Modellierungsverfahrens.

Der beschriebene systematische und durchgängige Aufbau des Modellierungsverfahrens im Sinne der Systemtechnik ist zur Gewährleistung der Skalierbarkeit noch nicht hinreichend. Für die endgültige Überwindung der grundsätzlichen Trennung von Flächenelementen, die als Standortträger und solchen, die als anzuordnende Elemente fungieren, sind zwei weitere Voraussetzungen zwingend zu erfüllen. Die Attributsätze sämtlicher Elemente, letztlich also die **Struktur der Attribute**, sind einheitlich zu gestalten³⁴. Außerdem ist der Attributsatz so auszulegen, dass beide Fähigkeiten, sowohl die eines Flächenelementes als Standortträger als auch die als anzuordnendes Element zu dienen, lediglich einen **temporären Zustand** darstellen. Eine Änderung dieses Zustandes kann bereits wieder für den nächsten Planungsschritt erforderlich sein. Die Erfüllung der genannten Anforderungen führt zur Hierarchiefähigkeit der Modellierung sowie einem einheitlichen und durchgängigen Anordnungsverhalten. Die Möglichkeit sowohl den Standortträger als auch die anzuordnenden Elemente flächig abzubilden, führt automatisch zu einer kontinuierlichen Repräsentation der Planungsgrundfläche für eines oder mehrere Geschosse. Die häufig verwendete einschränkende Abstraktion, den Standortträger lediglich als gerastert, z. B. als Drei- oder Viereckraster [vgl. Grundig 2000, S. 147f; Bogatzki 1998, S. 30; Kettner 1984, S. 232; jeweils inkl. dort zitierte Literatur] abbilden zu können, entfällt hiermit.

³⁴ Dies heißt selbstverständlich nicht zwingend identische Attributsausprägungen, jedoch identische Grundstruktur der Attribute, also identischer Attributsatz.

6.1.2 Modellierung der Flächenelemente

Die Qualität der Abbildung der Realobjekte im Modell wird durch die Möglichkeiten bestimmt, sämtliche anordnungsrelevante Attribute mit den vom verbesserten Modellierungsverfahren bereitgestellten Flächenelementen bzw. deren Attributen hinreichend exakt und richtig, d. h. vor allem auch mit den erforderlichen Freiheitsgraden repräsentieren zu können. Die **Attribute** der Flächenelemente lassen sich dabei in zwei grundsätzlich unterschiedliche Klassen gliedern:

- Geometriebezogene Attribute
- Sonstige Attribute

6.1.2.1 Geometriebezogene Attribute

Die geometrischen Abbildungsmöglichkeiten der Flächenelemente werden im Wesentlichen durch die funktionale Mächtigkeit der Modellierung hinsichtlich folgender drei Attribute bestimmt:

- Flächeninhalt
- Flächengeometrie
- Anknüpfungspunkte für Beziehungen

Mittels dieser Attribute lassen sich wesentliche Ergebnisse aus den im Planungsnetz vorgelagerten Gestaltungsaufgaben im Rahmen der Anordnungsplanung abbilden³⁵. Der Flächeninhalt repräsentiert den ermittelten Flächenbedarf, die Flächengeometrie die z. B. aus den konkret ausgewählten technischen Ressourcen resultierende geometrische Gestalt. Mit den Anknüpfungspunkten werden beispielsweise die aus technischem bzw. logistischem Konzept resultierenden Ausgangspunkte von vor allem Austausch- bzw. Flussbeziehungen, wie z. B. Materialflüssen, abgebildet.

Flächeninhalt und Flächengeometrie

Bezüglich der Geometrie der Flächenelemente sind die in Abb. 6-1 dargestellten Abbildungslogiken gebräuchlich. Dabei nehmen Freiheitsgrad bzw. Realitätsnähe der

³⁵ Flächenelemente stellen die Repräsentation von Realobjekten speziell zum Zwecke der Anordnungsplanung dar. Für andere Planungsaufgaben ist eine identische Abbildungsform nicht zwingend. Zur Anordnungsplanung können so beispielsweise bei der Definition der Flächenelementgeometrie für eine Maschine neben dem eigentlichen Maschinenkörper auch andere, der Maschine fest zugeordnete Flächen, wie z. B. Bedien- oder Instandhaltungsflächen, Eingang finden.

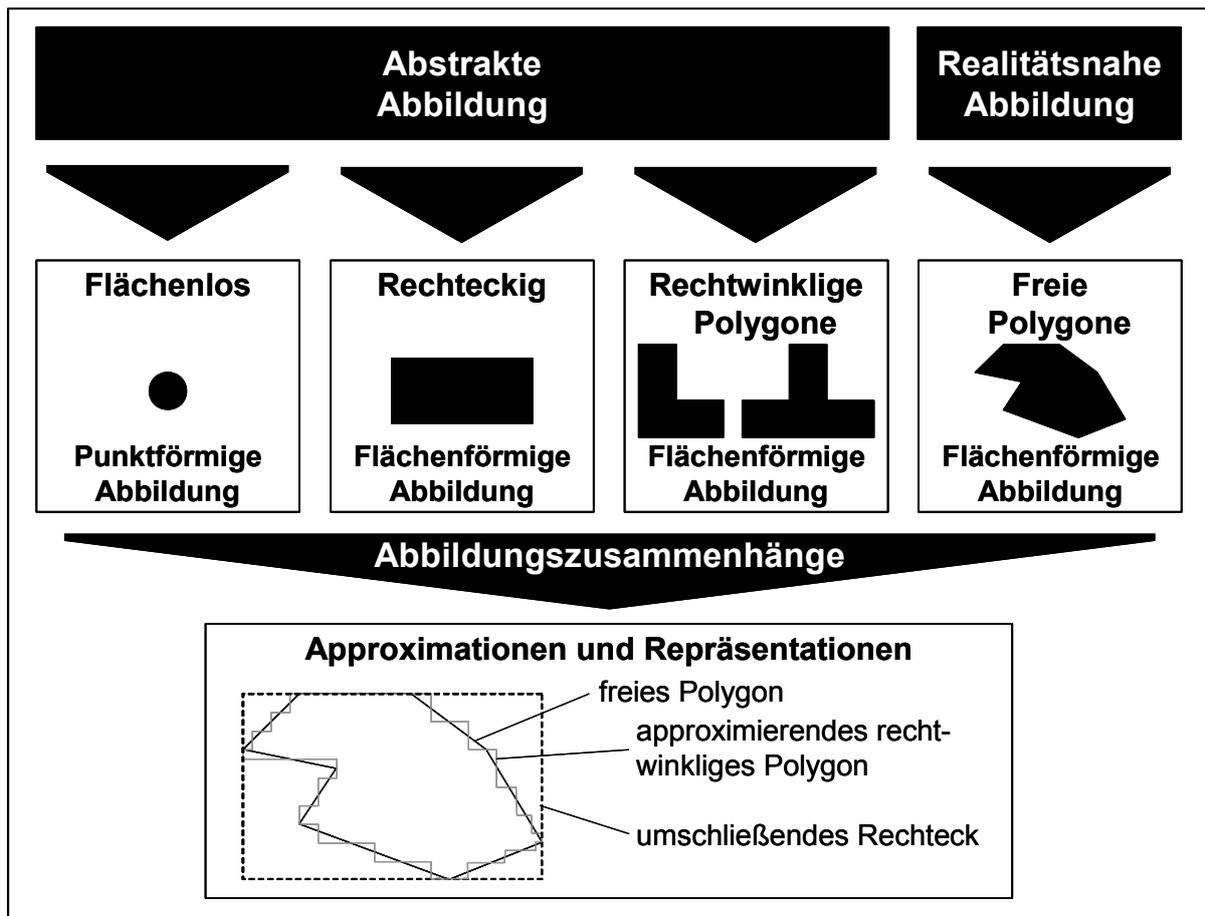


Abb. 6-1: Abbildungslogik flächenbehafteter Realobjekte im Modell

Abbildung von links nach rechts zu. Mit der flächenlosen, punktförmigen Abbildung und der flächenförmigen, rechteckigen Elementabbildung werden die Anforderungen der Praxis deutlich verfehlt. Im Vergleich dazu stellt die flächenförmige Abbildung als rechtwinkliges Polygon [vgl. Drira 2006, S. 390 und dort zitierte Literatur; Liggett 2000; Hardin 2005; Lahmar 2005; Hu 2004, Hamamoto 1999³⁶; Bukchin 2006; Barbosa-Póvoa 2002, 2001³⁷] bereits einen erheblich größeren Abdeckungsgrad hinsichtlich der Planungsfälle der betrieblichen Praxis dar und übertrifft die Abbildungsmöglichkeiten der Masse der heute bekannten Modellierungsverfahren schon deutlich. Das verbesserte Verfahren bietet darüber hinaus die noch realitätsnähere Modellierung mittels freier Polygone an [vgl. Drira 2006, S. 390 und dort zitierte Literatur]. Für die meisten Planungsfälle lassen sich die Flächenelemente jedoch ohne wesentlichen Informationsverlust als rechtwinklige Polygone approximieren bzw. abstra-

³⁶ Rechtwinklige Polygone resultieren bei den vier vorigen Verfahren aus dem Set Covering Ansatz.

³⁷ Rechtwinklige Polygone resultieren bei den drei zuletzt genannten Verfahren aus der Kombination zunächst disjunkter Rechtecke.

hieren. Unter bestimmten Umständen kann zusätzlich auch die planerische Mitführung eines repräsentierenden, z. B. des umschließenden Rechtecks sinnvoll sein. Dieses Rechteck lässt sich ggf. auch für Betrachtungen nutzen, wie sie von den herkömmlichen Modellierungsverfahren bekannt sind. Zu beachten ist dabei jedoch, dass dieses Rechteck im Normalfall nicht mehr in der Lage ist, den erforderlichen Flächenbedarf des Elementes hinreichend genau und korrekt zu repräsentieren.

Anknüpfung der Austauschbeziehungen

Insbesondere zur Anknüpfung der verschiedenen Austauschbeziehungen sind zu den Flächenelementen definierte Punkte zu modellieren. Diese werden aufgrund ihrer Funktion im Folgenden als »**Konnektorpunkte**« bezeichnet. Mit derartigen Punkten lassen sich beispielsweise Aufnahme- bzw. Abgabepunkte von Material für den Transport, Bereitstellungspunkte von Material bzw. Information sowie Medienanschlüsse abbilden. Mittels Konnektorpunkten sind Flächenelemente und deren 1-dimensionale Beziehungen aneinander gebunden. Die Konnektorpunkte stellen so eine Art Anfangs- bzw. Endpunkt der 1-dimensionalen Beziehungen dar. Für sie sind die in Abb. 6-2 dargestellten Abbildungslogiken möglich. Dabei nimmt die abbildbare Anzahl möglicher Anknüpfungspunkte von links nach rechts zu. Die verschiedenen Logiken verstehen sich nicht als zwingend exklusiv, sondern lassen sich nach Bedarf frei kombinieren (siehe Abb. 6-2 unten). Mit Einschränkung der Konnektorpunkte auf die Mittel-, Eck- oder Randpunkte [vgl. Chae 2006; Deb 2005; Sarkar 2005, Kim 2005] der Flächenelemente werden die Anforderungen der betrieblichen Praxis eindeutig verfehlt. Einen erheblich größeren Abdeckungsgrad hinsichtlich der Planungsfälle der betrieblichen Praxis stellen demgegenüber innerhalb der Flächenelemente frei anzuordnende Konnektorpunkte dar. Bereits hiermit wird die Masse der heute bekannten Modellierungsverfahren übertroffen. Das verbesserte Verfahren bietet darüber hinaus einen weiteren Freiheitsgrad für eine noch realitätsnähere Abbildung. Die Konnektorpunkte dürfen nicht nur innerhalb sondern auch außerhalb der Flächenelemente liegen. Bei Erweiterung der zulässigen Flächenelementgeometrie auf Polygone ist dies durchaus sinnvoll, kann sich bei diesen der Mittelpunkt eines Flächenelementes doch bereits außerhalb des Polygons selbst befinden³⁸, beispielsweise bei L-förmigen Flächenelementen mit schmalen Schenkeln.

³⁸ Der Mittelpunkt der von einem Polygon eingeschlossenen Fläche entspricht hier deren Schwerpunkt.

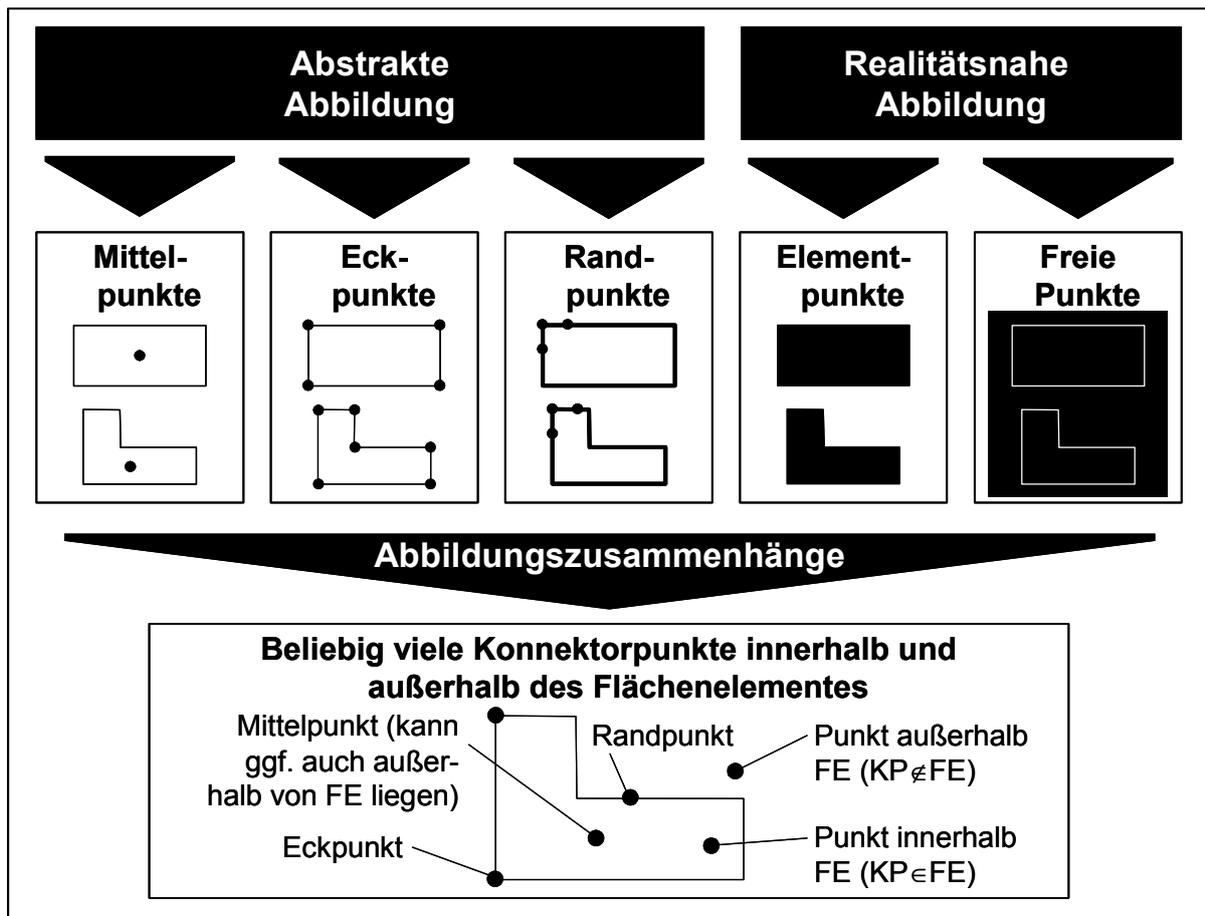


Abb. 6-2: Abbildungslogik der Anknüpfungspunkte von Beziehungen

Freiheitsgrade hinsichtlich der geometriebezogenen Attribute

Die Flächenelemente sind mit Definition ihrer Geometrie entsprechend Abb. 6-1 und ihrem daraus resultierenden Flächeninhalt geometrisch vollständig beschrieben. Alle Formen der Abbildung der Flächenelemente beinhalten ein Rechteck. Bei rechteckigen Flächenelementen repräsentiert dieses die Geometrie als solches, bei nicht rechteckigen entsteht es als umschließendes Rechteck des Polygons. Der Flächenbedarf des Rechtecks resultiert dabei aus dessen Länge und Breite:

$$A_{\text{Rechteck}} = L_{\text{Rechteck}} \cdot B_{\text{Rechteck}} \quad (\text{F 6-1})$$

Im Rahmen der Planung ist es vorteilhaft, die entsprechenden Längen und Breiten der zugehörigen Rechtecke explizit mitzuführen. Des Weiteren erfordert die planerische Handhabung der Flächenelemente nicht in jedem Falle die Verwendung der vorgegebenen, exakten Geometrie. Häufig sind gerade in Planungsteilaufgaben mit geringerem Detaillierungsgrad, wie z. B. der Generalstrukturplanung, definierte Frei-

heitsgrade hinsichtlich der Flächenelementgeometrie gewünscht. Die erforderlichen Freiheitsgrade lassen sich in einfacher Form durch die Vorgabe von **zulässigen Wertebereichen** für das repräsentierende Rechteck erreichen [vgl. Paul 2006]. Dies erlaubt innerhalb wohl definierter Grenzen Veränderungen der Flächenelementgröße und -geometrie. Alle relevanten Parameter verstehen sich jeweils in Bezug auf das lokale Koordinatensystem des zugehörigen Flächenelementes. Für rechteckige Geometrien liegen die Kanten des Flächenelementes jeweils parallel zu den Achsen dieses elementeigenen Koordinatensystems. Für das umschließende Rechteck gilt dies sinngemäß. Auf Basis der vorgegebenen Länge und Breite bzw. des daraus resultierenden Flächeninhalts lassen sich die geforderten Freiheitsgrade bzw. die zulässigen Wertebereiche durch Parametrisierung folgender Attribute vordefinieren:

- Maximale Dimension des Rechtecks
- Minimale Dimension des Rechtecks
- Minimale Fläche bzw. alternativ minimale Flächenabweichung nach unten bei vorgegebenem Referenzwert für den Flächeninhalt [vgl. Paul 2006]
- Maximale Fläche bzw. alternativ maximale Flächenabweichung nach oben bei vorgegebenem Referenzwert für den Flächeninhalt [vgl. Paul 2006]

Die aus der Vorgabe dieser Werte bzw. Wertebereiche resultierenden zulässigen Geometrien des Rechtecks sind in Abb. 6-3 beispielhaft als dunkel hinterlegte Fläche dargestellt. Die zulässigen Ausprägungen ergeben sich hier aus einer minimalen Dimension des Rechtecks von $B_{\min} = 4$, einer maximalen Dimension von $L_{\max} = 14$ sowie einer minimalen Fläche von $A_{\min} = 60$ und einer maximalen von $A_{\max} = 90$. Die horizontalen und vertikalen Grenzen des Zulässigkeitsbereiches resultieren dabei aus der Begrenzung der zulässigen Dimensionen, die hyperbelartigen Grenzkurven aus der Begrenzung des zulässigen Flächeninhalts. Mit Vorgabe von minimal und maximal zulässiger Dimension wird gleichzeitig das **Längen-Breiten-Verhältnis** des Rechtecks limitiert und so verhindert, dass beliebig schmale, dabei gleichzeitig jedoch sehr langgezogene Geometrien entstehen [vgl. Paul 2006]. Für das dargestellte Beispiel gilt daher implizit: $L/B \leq 3,5$ ($= 14/4$). Zu beachten ist hierbei, dass dieser Maximalwert im Beispiel bereits aufgrund der Flächenrestriktion als nicht zulässig anzusehen ist. Mit der beschriebenen Attributlogik lassen sich die planungsbedingt geforderten Freiheitsgrade hinsichtlich einer zielgerichteten Variation der Geometrie der Flächenelemente realisieren.

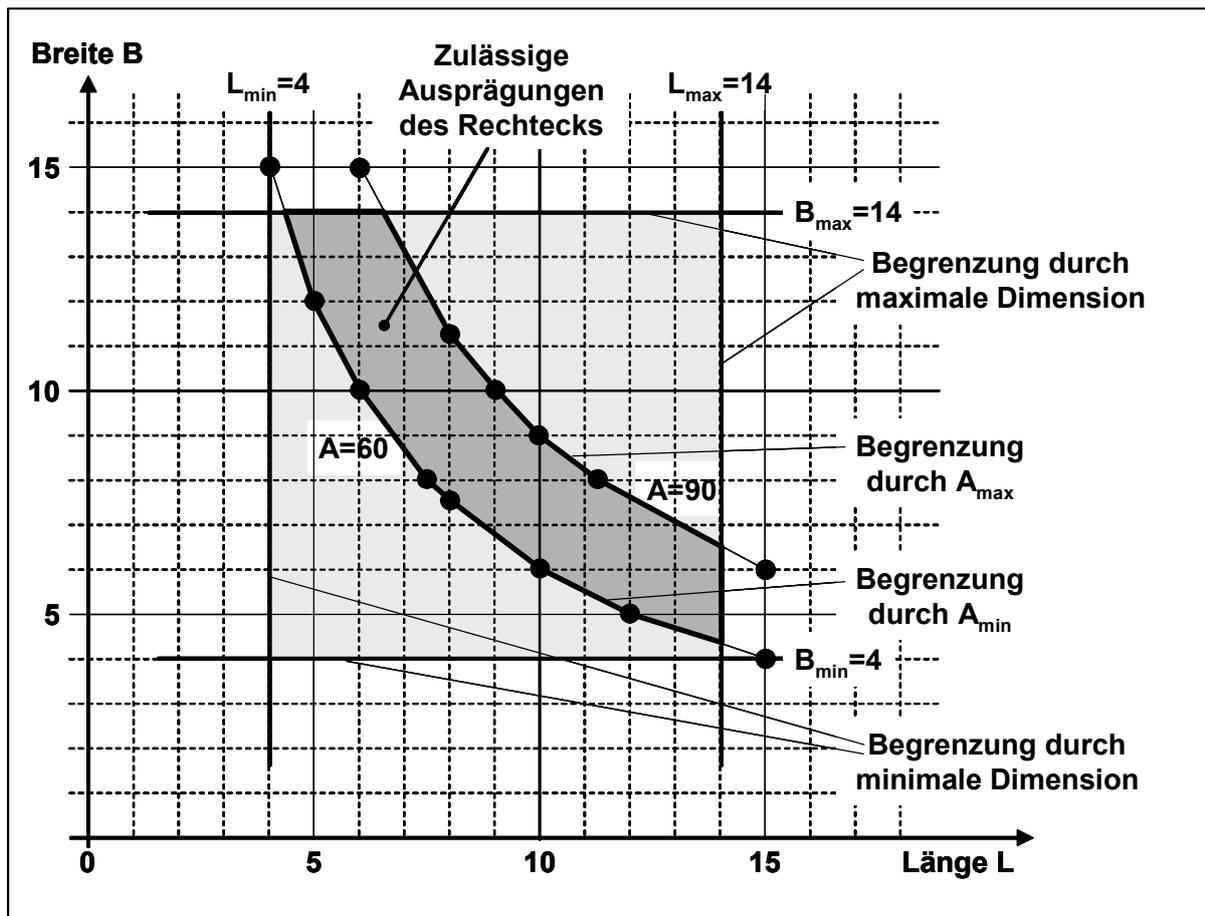


Abb. 6-3: Beispielhafte Darstellung der zulässigen Ausprägungen eines Rechtecks bei Vorgabe zulässiger Wertebereiche

Die Anordnung eines Flächenelementes lässt sich als räumliche Fixierung des lokalen Koordinatensystems innerhalb des übergeordneten Koordinatensystems der Planung verstehen. Diese Anordnung eines Flächenelementes wird durch zwei Größen eindeutig bestimmt:

- Ein im lokalen Koordinatensystem definierter Referenzpunkt ist genau einer Koordinate des übergeordneten Koordinatensystems zugeordnet.
- Ein im lokalen Koordinatensystem definierter Referenzvektor weist einen definierten Winkel in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung des übergeordneten Koordinatensystems auf.

Nach Anordnen des Flächenelementes innerhalb des übergeordneten Koordinatensystems werden die zugehörigen geometrischen **Bestimmungsparameter** der Anordnung zurückgegeben. Diese sind im Einzelnen:

- Position des Referenzpunktes
- Winkel des Referenzvektor
- Länge des Flächenelementes bzw. seines umschließenden Rechtecks
- Breite des Flächenelementes bzw. seines umschließenden Rechtecks
- Fläche des Flächenelementes bzw. seines umschließenden Rechtecks
- Position Mittel- bzw. Schwerpunkt des Flächenelementes bzw. Rechtecks

Auf Basis dieser zurück gegebenen geometrischen Bestimmungsparameter erfolgt nun der Abgleich mit den entsprechenden Vorgabewerten. Die realisierte Länge bzw. die realisierte Breite werden mit den zulässigen Dimensionen des Rechtecks abgeglichen, die realisierte Fläche mit dem minimal bzw. maximal zulässigen Flächeninhalt. Liegen die Werte innerhalb der vorgegebenen Bereiche, so ist in der Anordnung eine zulässige Geometrie des entsprechenden Flächenelementes realisiert.

In analoger Logik lassen sich hinsichtlich der verschiedenen Attribute und der zugehörigen Bestimmungsparameter aus der Anordnung je nach Bedarf der Planungsaufgabe geometriebezogene **Fixierungen** realisieren. Hinsichtlich der Fixierungen sind die folgenden Fälle zu unterscheiden:

- Fixierung der Gesamtgeometrie, d. h. in diesem Zustand sind keinerlei Änderungen der Geometrie möglich (für rechteckige Flächenelemente heißt das, sowohl die Länge wie auch die Breite und der resultierende Flächeninhalt sind fixiert) [vgl. Drira 2006, Meller 2006]
- Fixierung des umschließenden Rechtecks, d. h. Änderungen der Geometrie sind in diesem Zustand möglich, solange sie das umschließende Rechteck nicht verändern (Länge und Breite des umschließenden Rechtecks sowie sein resultierender Flächeninhalt sind fixiert)
- Fixierung des Flächeninhalts A , d. h. Änderungen der Geometrie sind lediglich hinsichtlich eines der beiden Attribute Länge oder Breite möglich. Die zweite Größe ist mit dieser korreliert und ergibt sich stets so, dass $A = \text{const.}$ gilt
- Fixierung der Anordnungsposition, d. h. die Position des Referenzpunktes im übergeordneten Koordinatensystem ist nicht veränderbar, das Flächenelement ist also nicht verschiebbar [vgl. Meller 2006, Hardin 2005, Castillo 2002b, Sherali 2003]

- Fixierung des Winkels, d. h. der Referenzvektor im übergeordneten Koordinatensystem ist nicht veränderbar, das Flächenelement ist also nicht drehbar
- Fixierung des Mittel- bzw. Schwerpunktes durch Fixierung von sowohl Anordnungsposition wie auch Anordnungswinkel, das Flächenelement ist also weder verschiebbar noch drehbar

6.1.2.2 Sonstige Attribute

Über die beschriebenen geometriebezogenen Attribute hinaus sind noch weitere Attribute erforderlich, da anordnungsrelevant. Dies betrifft zum Ersten einen eindeutigen **Bezeichner** bzw. Namen für das Flächenelement. Mittels diesem lässt es sich bei Bedarf, z. B. für den Zugriff von Methoden, eindeutig identifizieren. Für die Erfüllung der beschriebenen Anforderungen sind darüber hinaus zwei weitere, nicht geometriebezogene Attributlogiken von wesentlicher Bedeutung. Die ist einerseits die Logik zur Beschreibung der Stellung der Flächenelemente in der planerischen Hierarchie, andererseits die Logik zur Abbildung freier Attribute.

Attributlogik hinsichtlich der hierarchischen Stellung der Flächenelemente

Ein wesentlicher Aspekt der Modellierung ist die Zusammenfassung von im Rahmen der Planung gleichgestellten bzw. gleichwertigen Flächenelementen. Um eine derartige Teilmenge von Flächenelementen beschreiben und identifizieren zu können, wird ein separates Attribut eingeführt, das die Stellung innerhalb der Anordnungshierarchie beschreibt. Weitere wesentliche Information dieser Hierarchie, über die Zusammenfassung von gleichgestellten bzw. gleichwertigen Flächenelementen hinaus, kann die Einordnung der resultierenden Gruppen von Flächenelementen innerhalb einer hierarchischen Rangfolge sein.

Ein wichtiger Aspekt, der sich mit dieser Logik abbilden lässt, ist die Hierarchie des Produktionssystems i. e. S. (vgl. auch Abb. 2-6). Hierbei werden beispielsweise jeweils sämtliche Flächenelemente zusammengefasst, die Arbeitssystemelemente, Arbeitssysteme selbst, Produktionszellen, Produktionssysteme oder Produktionssegmente repräsentieren [vgl. Westkämper 2006a, S. 55f; Kapp 2003, S. 33]. Mittels dieser Zusammenfassung kann unter anderem die planerische Generierung einer **Zuordnungsstruktur** erreicht werden. In einer solchen ist es beispielweise erforderlich, dass ein jedes Flächenelement einer detaillierteren bzw. tieferen Hierarchieebene ei-

nem Flächenelement der nächst höheren, weniger detaillierten Ebene zugeordnet ist. Dies bedeutet, es ist zwingend erforderlich, dass jedes Flächenelement der tieferen Hierarchieebene im Bereich bzw. unter Erreichung eines Flächenschnittes mit einem oder mehreren der Flächenelemente der nächst höheren Ebene angeordnet ist. Mit welchem bzw. welchen dieser Elemente ein Flächenschnitt zu erreichen ist, ist jedoch nicht konkret vorgegeben. So sind beispielsweise alle Segmente eines Produktionsbetriebs zwingend innerhalb der vorhandenen oder geplanten Hallen anzuordnen (Abb. 6-4). In welcher Halle die Segmente konkret angeordnet werden, ist jedoch planerisch gestaltbar. Die Anordnungshierarchie lässt sich über die Flächenelemente des Produktionssystems hinaus auch für bauliche, infrastrukturelle oder sonstige Gegebenheiten, wie z. B. Stützen, Verkehrswege oder Leitungstrassen, nutzen.

Die Anforderung der Skalierbarkeit macht es zwingend erforderlich, den aktuellen Planungspunkt beliebig variieren zu können. Das bedeutet in Konsequenz, dass die grundsätzliche Trennung in anzuordnende Flächenelemente einerseits und einen Standortträger bzw. eine Planungsgrundfläche andererseits zu überwinden ist. Bei einem variablen Planungspunkt sind die beiden Funktionalitäten lediglich temporäre Zustände und rechtfertigen daher keine grundsätzlich unterschiedliche Modellierungslogik. Zur Gewährleistung einer **hierarchieübergreifenden Modellierung** sind im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren somit folgende Anforderungen unbedingt zu erfüllen:

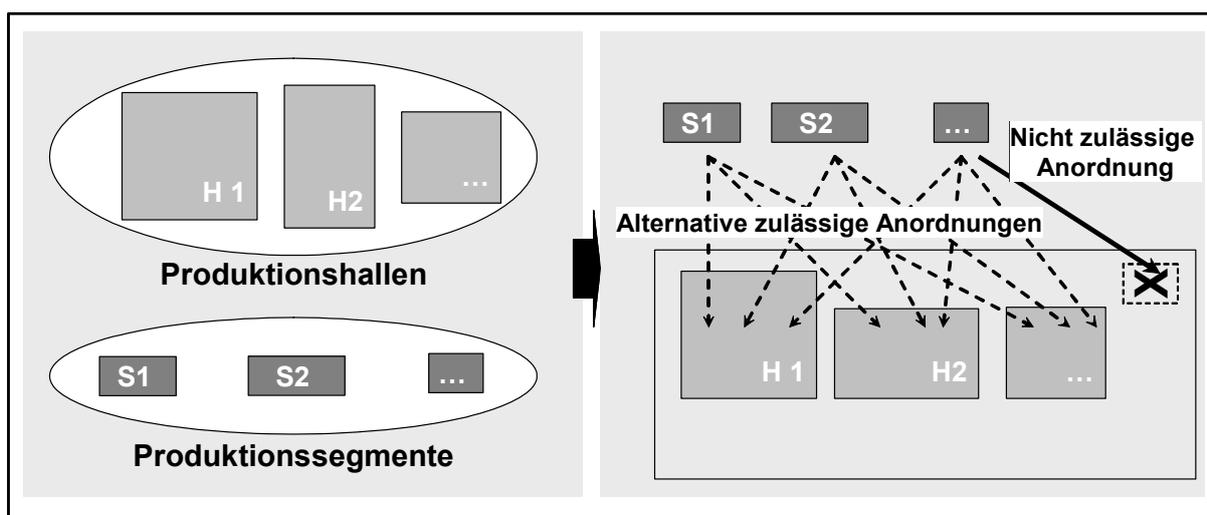


Abb. 6-4: Anordnung entsprechend den Anforderungen der Zuordnungsstruktur Segmente zu Hallen

- Prinzipiell identische Abbildungslogik für bei den herkömmlichen Verfahren unterschiedlich abgebildete »organisatorische Einheiten« (anzuordnend) einerseits und »Planungsgrundfläche« bzw. »Standortträger« andererseits
- Abbildung beider Objektarten mittels des Modellierungskonstruktes »Flächenelement«
- Einheitliche Grundcharakteristik der Flächenelemente hinsichtlich
 - der Attributsätze
 - des Anordnungsverhaltens

Unter Anwendung der beschriebenen Modellierungslogik und oben beschriebener Charakteristika der Flächenelemente ist auch der Sonderfall einer **Mehrgeschossplanung** abgedeckt. Die verschiedenen Geschosse werden so im Sinne einer mehrgeschossigen Planungsgrundfläche mittels mehrerer Flächenelemente abgebildet. Dazu ist es lediglich erforderlich, dass für das übergeordnete Koordinatensystem der Planung neben der x- und y- auch die z-Koordinate bzw. z-Dimension angelegt ist. Die Planung erfolgt dann gewissermaßen in 2½-D, d. h. innerhalb unterschiedlicher, definierter Ebenen in x-y-Richtung mit jeweils diskretem z-Wert.

Logik zur Beschreibung der freien Attribute der Flächenelemente

Eine wesentliche Anforderung der Anordnungsplanung besteht unter anderem darin, Angebote und Bedarfe hinsichtlich unterschiedlichster Eigenschaften zur Deckung zu bringen [vgl. auch Warnecke 1999, S. 9-82; Aggteleky 1990a, S. 586]. Die Situation bezüglich der zu harmonisierenden Angebote und Bedarfe ist in Form von Anforderungsbeziehungen gegeben. Um beliebige Angebote und Bedarfe hinsichtlich beispielsweise Fähigkeiten, Eigenschaften, Ausstattungen, qualitativen Aspekten wie z. B. Flächenqualitäten sowie den Flächenelementen zugeordneten Produktionsfaktoren formulieren zu können, ist eine Logik freier Attribute vorzusehen. Mit dieser Logik lassen sich bezogen auf jedes einzelne Flächenelement spezifische, für die Anordnung relevante Angebots- und Bedarfssituationen beschreiben.

Zur vollständigen Ausprägung entsprechender Bedarfe oder Angebote für ein Flächenelement hinsichtlich eines freien Attributes, sind zwei Informationen erforderlich:

- Bezeichner bzw. Name des freien Attributs
- Ausprägung eines zugehörigen Bedarfes bzw. Angebotes

Über den **Bezeichner** bzw. Namen lässt sich ein definiertes freies Attribut bei Bedarf eindeutig identifiziert, z. B. für den Zugriff durch die Methoden. Der Attributname ist übergeordnet und bezieht sich zunächst nicht auf einzelne Flächenelemente. Zu einem definierten Flächenelement ist dann ein entsprechend spezifizierter Bedarf bzw. ein spezifisches Angebot hinsichtlich dieses Attributes auszuprägen. Die prinzipiell möglichen Ausprägungsformen für derartige Angebote und Bedarfe sind in Abb. 6-5 dargestellt. Sie verstehen sich nicht exklusiv, bauen also aufeinander auf und sind so auch in Kombination anwendbar.

Einfachste Ausprägungsform für Angebote und Bedarfe sind **alphanumerische Zeichenfolgen**, bestehend aus Buchstaben, Ziffern und bzw. oder Sonderzeichen. Verwenden lassen sind hier sowohl einzelne wie auch mehrere, eindeutig voneinander getrennte Zeichenfolgen. Neben alphanumerischen Ausprägungsformen sind auch rein **numerische** möglich. Dies sind zum einen **Zahlenwerte**, die als diskrete reelle Zahlen auf einer entsprechenden Skala aufgefasst werden. Wie bei den alphanumerischen Zeichenfolgen lassen sich einzelne oder mehrere Zahlenwerte definieren.

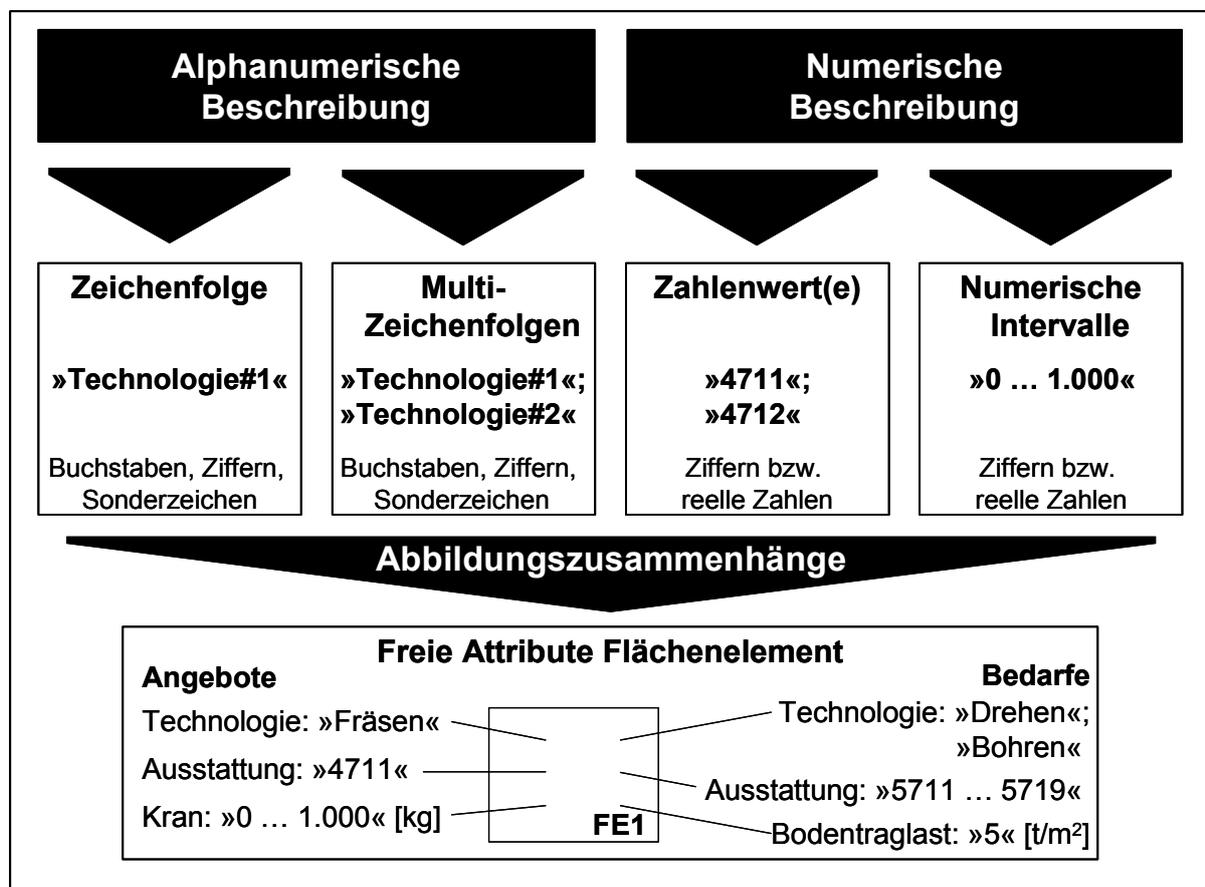


Abb. 6-5: Logik zur Beschreibung freier Attribute von Flächenelementen

Die Verwendung von Zahlenwerten schließt den vereinfachten Sonderfall einer binären Logik mit den Werten »0« (kein Angebot bzw. kein Bedarf vorhanden) und »1« (Angebot bzw. Bedarf vorhanden) ein. Zum zweiten sind **Intervalle** definierbar. Hierzu ist eine Ober- und eine Untergrenze anzugeben und zusätzlich festzulegen, ob es sich um eine Grenze im Sinne eines geschlossenen oder eines offenen Intervalls handelt. Grenzen im Sinne eines offenen Intervalls sind nicht Bestandteil desselben, solche im Sinne eines geschlossenen Intervalls dagegen schon. Wie bei Zeichenfolgen und Zahlenwerten können prinzipiell sowohl einzelne als auch mehrere Intervalle zu einem freien Attribut definiert werden. Das verbesserte Verfahren bietet alle vier beschriebenen Logiken an, auch in ihrer jeweiligen Kombination.

Im angeführten Beispiel (Abb. 6-5 unterer Teil) sind insgesamt vier Attribute ausgeprägt: Technologie, Ausstattung, Kran und Bodentraglast. Hinsichtlich der Technologie bietet das Flächenelement in der Logik »Zeichenfolge« die Ausprägung »Fräsen« an, benötigt jedoch gleichzeitig die Ausprägungen »Drehen« bzw. »Bohren«. Bezüglich des numerischen Kriteriums »Ausstattung« wird die Ausprägung »4711« angeboten, modelliert in Logik »Zahlenwert«. Gleichzeitig besteht ein Bedarf in Intervall-Logik, begrenzt durch die beiden Zahlenwerte »5711« und »5719«. Entsprechend formuliert sind ein Angebot hinsichtlich eines Kranes in Intervall-Logik und ein Bedarf hinsichtlich einer zulässigen Bodentraglast in Form von Zahlenwerten.

In Abb. 6-6 sind die Spezifika der Abbildungslogik für die Flächenelemente des verbesserten, skalierbaren Modellierungsverfahren nochmals im **Überblick** zusammengestellt. Hier sei noch ergänzend und erläuternd angemerkt, dass die Verwendung des Konstruktes »Flächenelement« zur Modellierung der zu beplanenden Grundfläche für das verbesserte Verfahren gleichzeitig bzw. automatisch zu einer kontinuierlichen Repräsentation der Realität im Modell führt, konform zu den definierten Anforderungen der betrieblichen Praxis aus Kapitel 3.2.

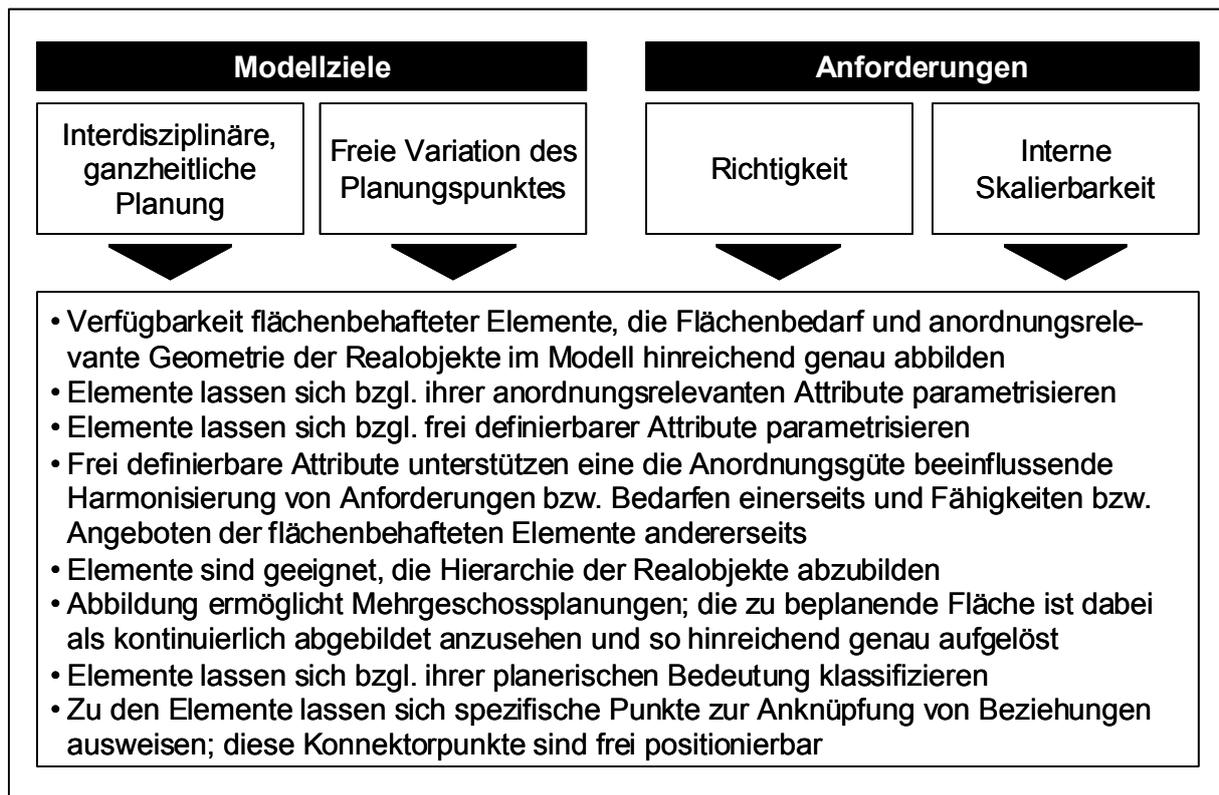


Abb. 6-6: Zusammenfassung der Abbildungslogik für die Flächenelemente

6.2 Abbildungslogik der Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen

Im Rahmen der Anordnungsplanung können Beziehungen zwischen alle physischen und somit flächenbehafteten Realobjekten der unterschiedlichsten Teilsysteme des Gesamtsystems Produktionsbetrieb relevant sein. Die Beziehungen lassen sich dabei verschiedensten Aspekten zuordnen. Diese reichen von der Strategie, über den Produktionsprozess mit Material, Information, Personen und Organisation bis hin zur Ver- und Entsorgung sowie Vorschriften und Auflagen. Diese unterschiedlichsten Beziehungen sind vollumfänglich einer möglichen Abbildung im Modell zugänglich zu machen [vgl. z. B. Aggteleky 1990a, S. 578-581; Aggteleky 1987, S. 27-30].

In der Anordnungsplanung zu handhabende Beziehungen sind innerhalb des Planungsnetzes im Regelfall bereits Gegenstand vorgelagerter Planungsschritte [vgl. z. B. Grundig 2000, S. 141f, 151f; Aggteleky 1990a, S. 579; Warnecke 1999, S. 9-60]. Aufgabe des verbesserten Modellierungsverfahrens ist es somit auch, sämtliche anordnungsrelevanten Informationen aus den vorhergehenden Schritten abzubilden. In der Strategischen Planung können beispielsweise übergeordnete, strategi-

sche Ziele und Vorgaben entstehen. Die »Prozess- und Ressourcenplanung« kann technische Abläufe, spezifische Anforderungen durch Prozesse und Ressourcen, benötigte Hilfsmittel sowie Vorgaben aufgrund zu beachtender Vorschriften und Auflagen definieren. Die »Organisationsplanung« kann aufbau- und ablauforganisatorische Aspekte wie z. B. Zuordnungsstrukturen und Segmentierungen, Arbeitsfolgen und Informationsflüsse vorgeben. Bei der »Arbeitsplatzgestaltung« können Anforderungen von Systemen und Personal detailliert sowie aufgrund relevanter Vorschriften und Auflagen definiert werden. Die »Materialfluss- und Logistikplanung« liefert beispielsweise relevante Ergebnisse hinsichtlich Förder- bzw. Transportmitteln, Behältern und Ladehilfsmitteln sowie Transportabwicklung inklusive Mengen, Steuerungslogik und Wegenetz. Als relevante Ergebnisse der »Infrastrukturplanung« können Aspekte der Ver- und Entsorgungssysteme sowie bezüglich der TGA abzubilden sein, aus dem Bereich der »personalbezogenen Planung« beispielsweise Personalbedarfe, Strategien der Einsatzplanung und resultierende Personenflüsse. Die »Bauplanung« kann beispielsweise relevante Ergebnisse hinsichtlich gegebener Flächenqualitäten und Topographie, Erschließung und Anbindung sowie baulicher Ausstattungen etc. liefern. Zu beachten sind hier wiederum die Aspekte der iterativen Planung, welche die Aufgabe der Anordnungsplanung mit den anderen Planungsaufgaben direkt verzahnt und so die wechselseitigen Anforderungen derselben definiert [vgl. z. B. Wirth 2000b, S. 8f; Warnecke 1999, S. 9-58 2f; Aggteleky 1990a, S. 579].

6.2.1 Grundcharakteristik zur Abbildung von Beziehungen zwischen Flächenelementen

Entsprechend den Anforderungen der Systemtechnik sind zur Gewährleistung einer umfassenden und korrekten Abbildung der Realität zum Zwecke der Anordnungsplanung neben den Flächenelementen deren Beziehungen untereinander zu modellieren [vgl. Westkämper 2006a, S. 51; Wiendahl 2000, S. 70]. Die Möglichkeiten zur Abbildung dieser wechselseitigen Beziehungen zwischen den Flächenelementen stellen beim verbesserten Verfahren im Vergleich zu den herkömmlichen das eindeutig größte Verbesserungspotenzial dar. Die Abbildungsmöglichkeiten hinsichtlich der Ziele sind bei der Masse dieser Verfahren auf 1-dimensionale Beziehungen beschränkt, meist dediziert zur Modellierung von ausschließlich Materialflüssen als einer spezifischen Art von unterschiedlichsten denkbaren, anordnungsrelevanten Austauschbeziehungen. Auch hinsichtlich der Möglichkeiten zur Abbildung von Randbe-

dingungen weisen herkömmliche Verfahren starke Einschränkungen auf, so dass, wenn überhaupt, meist lediglich ganz wenige und sehr eingeschränkt anwendbare Arten von Beziehungen verfügbar sind. Die Anforderungen der betrieblichen Praxis erfordern im Gegensatz dazu eine möglichst umfassende Modellierung von mannigfaltigen Beziehungen [vgl. Bischoff 2001, S. 233; Warnecke 1999, S. 9-81f]. Anordnungsrelevant sind dabei im Einzelnen folgende **Typen von Beziehungen**:

- Austauschbeziehungen
- Anforderungsbeziehungen
- Zuordnungsbeziehungen

Anordnungsrelevant können Beziehungen immer dann sein, wenn sie sich in irgendeiner Form auf die unterschiedlichen Dimensionen der **Bestimmungsparameter** der Anordnung zurückführen lassen. Die Dimensionen der Bestimmungsparameter einer Anordnung sind definitionsgemäß alternativ von folgendem Typ:

- 0-dimensional (Drehlagen)
- 1-dimensional (Abstände bzw. Entfernungen)
- 2-dimensional (Flächen bzw. Schnittflächen)

Das verbesserte Verfahren weist entsprechend den Anforderungen der betrieblichen Praxis erheblich erweiterte Abbildungsmöglichkeiten für Beziehungen auf. Durch die vollumfängliche Bereitstellung von 0-, 1- und 2-dimensionalen Beziehungskonstrukten lassen sich die unterschiedlichen Beziehungstypen, also sowohl Austausch- und Anforderungs- als auch Zuordnungsbeziehungen, umfassend abbilden. Jede Beziehung lässt sich dabei individuell als Ziel oder auch als Randbedingung formulieren [vgl. z. B. Gabler 1993, S. 2064]. Die zur Abbildung von Beziehungen verfügbaren Konstrukte des verbesserten Verfahrens sind in Abb. 6-7 im Überblick dargestellt.

Neben den verfügbaren Konstrukten zur Abbildung der Beziehungen zwischen den Flächenelementen ist für die Leistungsfähigkeit des Modellierungsverfahrens auch der Umfang der **verfügbaren Logik** zur Abbildung der Beziehungen bestimmend. Die sich aus der Anordnungsplanungsaufgabe ableitenden Anforderungen lassen sich in vollem Umfang lediglich mit grundsätzlich unterschiedlichen Logiken hinsichtlich der an den Beziehungen beteiligten Flächenelemente erfüllen. Bezüglich der an einer Beziehung beteiligten Flächenelemente sind die drei in Abb. 6-8 dargestellten

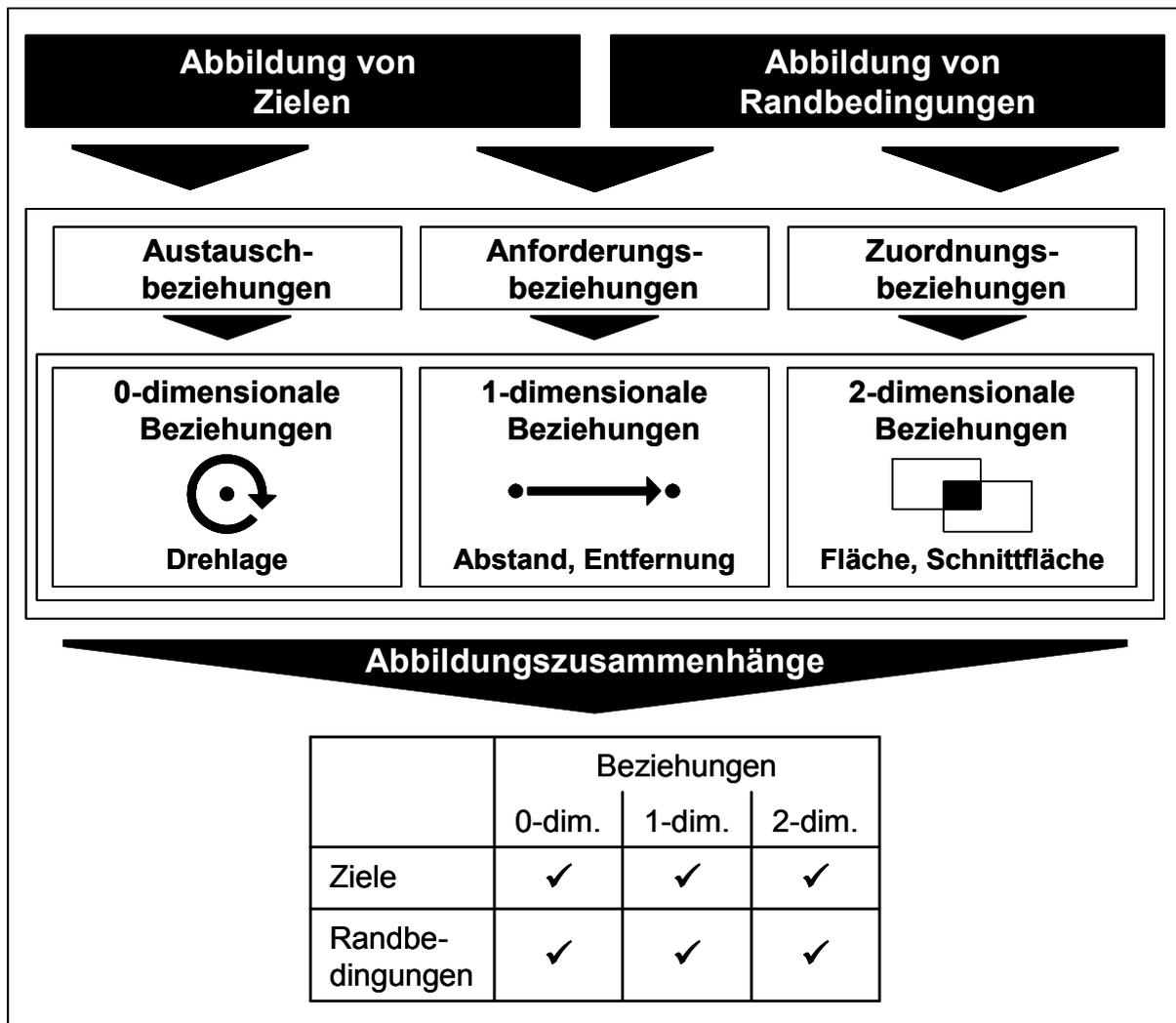


Abb. 6-7: Verfügbare Konstrukte zur Abbildung von Beziehungen

Logiken zu unterscheiden. Danach lassen sich Beziehungen zum einen explizit formulieren, d. h. die Beziehung wirkt zwischen genau zwei konkret definierten Flächenelementen. Man spricht hierbei von einer **1:1-Logik** der Beziehung. So gibt beispielsweise eine Fräsmaschine 4711 das Material eines definierten Typs entsprechend der im zugehörigen Arbeitsplan festgelegten Arbeitsfolge an eine Bohrmaschine 5812 weiter. Die Austauschbeziehung für das Material besteht genau zwischen diesen beiden Maschinen.

Zum anderen existieren jedoch auch Beziehungen, die sich in dieser expliziten Logik nicht abbilden lassen. Dies ist dann der Fall, wenn sich eine Beziehung nicht nur auf zwei, sondern auf mehrere beteiligte Flächenelemente bezieht. Häufig wird diese Logik für die Abbildung von spezifischen Anforderungen eines Flächenelementes hinsichtlich bestimmter Flächenqualitäten seiner Umgebung benötigt [vgl. Warnecke

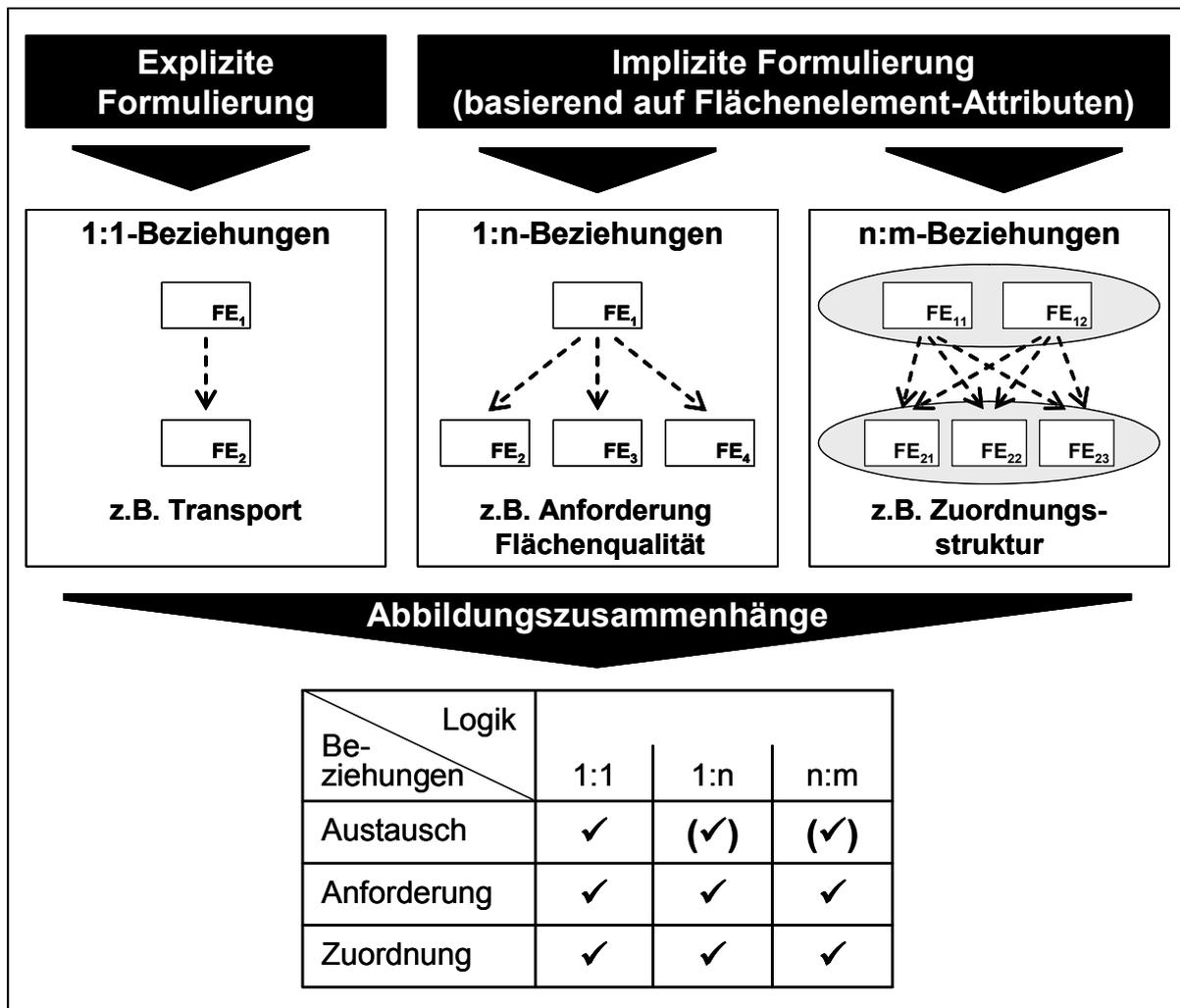


Abb. 6-8: Verfügbare Logiken zur Abbildung von Beziehungen

1999, S. 9-82]. So kann beispielsweise Maschine 4711 eine spezifische Anforderung hinsichtlich einer zulässigen Bodentraglast für den Bereich haben, in dem sie angeordnet werden soll. Die geforderte Bodentraglast kann jedoch prinzipiell nicht ausschließlich von einem Bereich der zu beplanenden Gebäude oder Hallen, sondern von mehreren angeboten werden. Die Erfüllung der vordefinierten Anforderung ist dabei also durch jeden einzelnen dieser Bereiche möglich, von welchem konkret ist dabei ohne Bedeutung. Man spricht bei dieser Art der Beziehungen von einer **1:n-Logik**. Die Abbildung derartiger Beziehungen erfordert neben der expliziten Formulierung eine andere Art der Logik zur impliziten Formulierung der Beziehungen. Diese implizite Formulierung erfolgt unter Verwendung der Attribute der Flächenelemente, speziell der freien Attribute und des deren hierarchische Stellung in der Planung beschreibenden Attributes. Die beschriebene 1:n-Logik erweitert sich bei mehreren Flä-

chenelementen auf eine **n:m-Logik**, wie sie beispielsweise zur Modellierung von Zuordnungsstrukturen benötigt wird.

Die Beziehungen lassen sich darüber hinaus alternativ in konvergierender oder divergierender Logik abbilden [vgl. Wirth 2000b, S. 41; Aggteleky 1990a, S. 626]. Als **konvergierend** wird das Verhalten dann bezeichnet, wenn möglichst identische Drehlagen (0-dimensionale Beziehungen), möglichst kurze Wege (1-dimensionale Beziehungen) oder möglichst große Schnittflächen (2-dimensionale Beziehungen) favorisiert sind. Als **divergierend** wird das Verhalten im Gegensatz dazu dann bezeichnet, wenn unterschiedliche Drehlagen, große Entfernungen oder keine Schnittflächen erwünscht sind.

Analog zu den Ausführungen bei den Flächenelementen ist auch hinsichtlich deren wechselseitiger Beziehungen auf eine einheitliche Gestaltung des Attributsatzes Wert zu legen, d. h. die Struktur der Attribute ist dementsprechend auszugestalten. Wie bei den Flächenelementen ist anderenfalls die Skalierbarkeit der Modellierung nicht gewährleistet.

6.2.2 Modellierung der Beziehungen zwischen Flächenelementen

Die Qualität der Abbildung der zwischen den Elementen in der Realität bestehenden Wechselwirkungen im Modell wird durch die Möglichkeiten bestimmt, sämtliche der anordnungsrelevanten Beziehungen mit den entsprechenden Konstrukten des Modellierungsverfahrens bzw. deren Attributen hinreichend exakt und richtig repräsentieren zu können. Hinsichtlich der Modellierung der Beziehungen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Beziehungen in

- expliziter Formulierung und
- impliziter Formulierung.

6.2.2.1 Beziehungen in expliziter Formulierung

Bei expliziter Formulierung sind zu einer Beziehung jeweils zwei konkrete Flächenelemente referenziert. Der zur kompletten Beschreibung einer Beziehung erforderliche Umfang umfasst sowohl klassische Attribute als auch zugeordnete Methoden. Diese stellen daher ebenfalls Attribute der Beziehungen dar.

Die **klassischen Attribute** der Beziehungen sind:

- Erstes referenziertes Flächenelement (ggf. Quelle)
- Zweites referenziertes Flächenelement (ggf. Senke)
- Intensität
- Freie Attribute

Die explizite Formulierung erfordert zu jeder Beziehung genau zwei **referenzierte Flächenelemente**, die bei gerichteten Beziehungen Quelle und Senke darstellen. Gerichtete Beziehungen werden vor allem zur Abbildung von Austauschbeziehungen mit Flusscharakter verwendet. Sie haben 1-dimensionalen Charakter. Die Quelle ist das gebende Element, die Senke das empfangende. Die 0- und 2-dimensionalen Beziehungen dagegen sind in der Regel ungerichtet. Eine Unterscheidung der zugeordneten Flächenelemente hinsichtlich Quelle und Senke ist somit meist nicht erforderlich. Die **Intensität** einer Beziehung dient deren Gewichtung. Von Bedeutung ist vor allem die relative Gewichtung der Beziehung im Vergleich zu anderen. Solange im Rahmen der Planung lediglich verschiedene Ergebnisvarianten miteinander verglichen werden bzw. diese zu optimieren sind, ist der absolute Wert der Intensität von sekundärer Bedeutung. Er kann allerdings gefordert sein, wenn Rückschlüsse hinsichtlich tatsächlicher Aufwände, Kosten oder Leistungen gefragt sind. Wie bei den Flächenelementen ist auch für die Beziehungen eine Logik **freier Attribute** sinnvoll. Diese lassen sich durch den Planer nach Bedarf frei definieren. Die Bedeutung dieser Attribute ist hier jedoch geringer, da sie keine vergleichbar wichtige Funktion wie beim Abgleich von Angebot und Bedarf der Flächenelemente aufweisen. Sie haben ausschließlich detaillierenden Charakter. Die hinterlegten Detailinformationen lassen sich im Rahmen der Bewertung nutzen und erweitern die Möglichkeiten derselben erheblich. Als Ausprägungen der freien Attribute sind, vergleichbar den Flächenelementen, Zeichenfolgen, Zahlenwerte und Intervalle sinnvoll. Mehrere Ausprägungen zu ein und demselben Attribut, wie bei den Flächenelementen, sind in der Regel jedoch nicht erforderlich, da diese sich bei entsprechenden Anforderungen problemlos auf mehrere voneinander unabhängige freie Attribute aufteilen lassen.

Neben den klassischen Attributen werden die Beziehungen durch ihre zugeordneten **Methoden** bestimmt. Zur vollständigen Bestimmung ist die jeweilige Zuordnung von zwei unterschiedlichen Arten von Methoden erforderlich:

- Messmethoden zur Ermittlung der geometrischen Bestimmungsparameter
- Bewertungsmethoden zur Ermittlung des »Gesamtwertes« der Beziehung

Die **Messmethode** spezifiziert die genauen Modalitäten zur Ermittlung der relevanten geometrischen Bestimmungsparameter in der Anordnung, die Bewertungsmethode verrechnet diese dann ggf. zu einem übergeordneten »Gesamtwert« der Beziehung. Die durch die Messmethode zu ermittelnden Bestimmungsparameter hängen von der Dimension der Beziehung ab. Für 0-dimensionale Beziehungen werden zugehörige Drehlagen bzw. Winkel, für 1-dimensionale Beziehungen zugehörige Abstände bzw. Entfernungen und für 2-dimensionale Beziehungen zugehörigen Flächen bzw. Schnittflächen ermittelt. Die Ermittlung der Drehlage der beiden referenzierten Flächenelemente stellt eine relativ triviale Aufgabe dar und erfordert in der Regel keine alternativen Metriken. Zur Ermittlung von Abständen und Entfernungen stehen dagegen unterschiedlichste Metriken (siehe Abb. 6-9) zur Verfügung [vgl. v. a. Özdemir 2003; Islier 1998]. Für die 1-dimensionalen Beziehungen ist jeweils ein

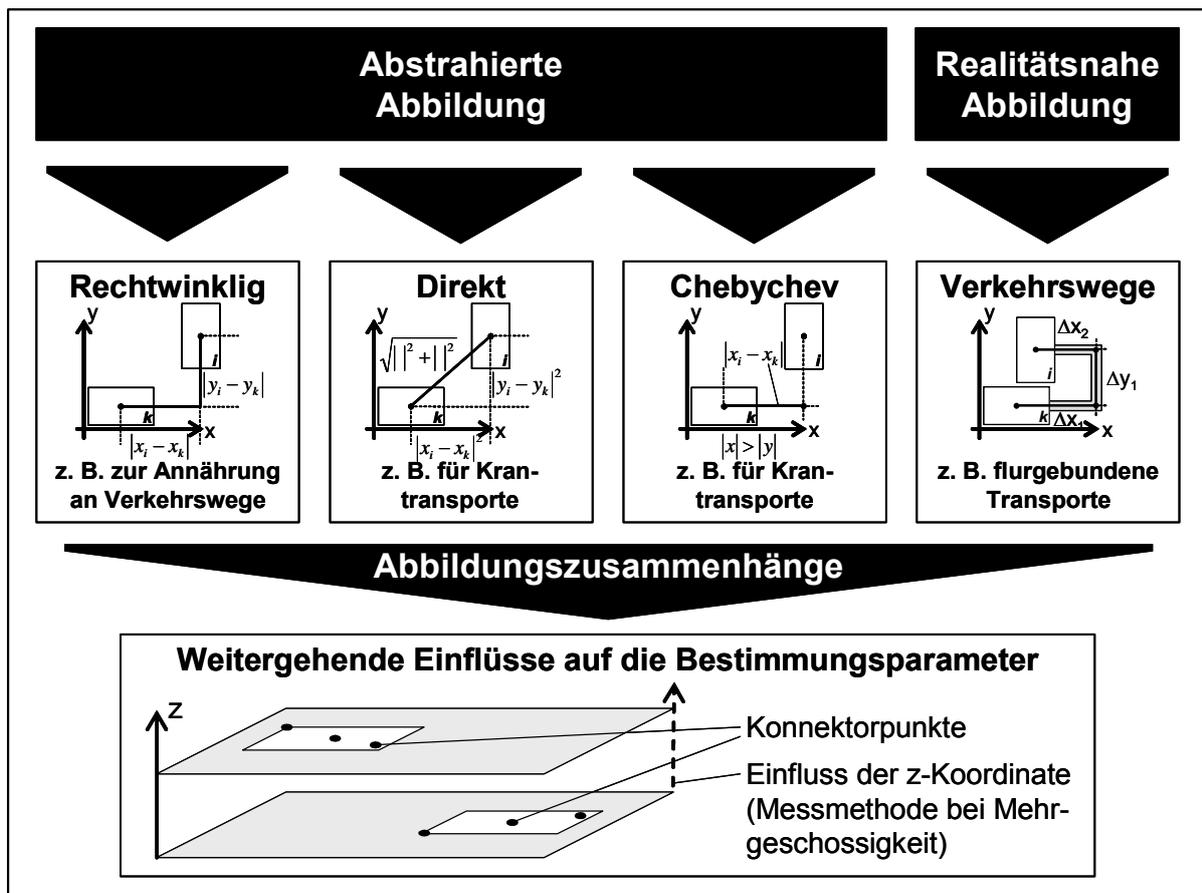


Abb. 6-9: Verfügbare Messmethoden für die Bestimmungsparameter 1-dimensionaler Beziehungen

Konnektorpunkt der Quelle und einer der Senke als Anfangs- bzw. Endpunkt für die Entfernungs- bzw. Abstandsmessung zu referenzieren. Bei Mehrgeschossplanungen sind über die x- und y-Dimensionen hinaus die Modalitäten der Messung der Entfernungen bzw. Abstände in z-Richtung zu definieren. Die alternativen Messmethoden für 2-dimensionale Beziehungen resultieren insbesondere aus der Festlegung, ob lediglich Überschneidungen bzw. Schnitte von Flächenelementen innerhalb derselben z-Ebene oder auch über diese hinweg gewertet werden. Die Wertung von Schnitten über unterschiedliche z-Ebenen hinweg entspricht der Logik von Projektionsflächen.

Neben der Messmethode ist jeder Beziehung eine **Bewertungsmethode** zuzuordnen. Diese definiert, wie unter Berücksichtigung des durch Anwendung der referenzierten Messmethode ermittelten geometrischen Bestimmungsparameters, der Gesamtwert der Beziehung gebildet wird. Im Falle der Ausprägung einer Beziehung als Ziel geht dieser in den Gesamtzielwert der Anordnung ein und ist so unmittelbar Gegenstand der Optimierung. Wird eine Beziehung dagegen als Randbedingung ausgeprägt, so wird der resultierende Wert an einem vorgegebenen Zulässigkeitsbereich gespiegelt. Randbedingungen weisen gegenüber Zielen also einen um diesen Zulässigkeitsbereich erweiterten Attributsatz auf.

Einfachste Ausprägung einer Bewertungsmethode ist die unveränderte Weitergabe des von der Messmethode ermittelten Bestimmungsparameters. Bereits diese einfache Logik ist zur Formulierung von Randbedingungen von großer Bedeutung. Lassen sich doch in diesem Falle zulässige Wertebereiche direkt hinsichtlich der zugehörigen geometrischen Bestimmungsparameter formulieren. Beispiele hierfür sind:

- Drehwinkel zwischen zwei bestimmten Maschinen darf aus Gründen der Bedienbarkeit nicht größer als 90° sein (zulässiger Drehwinkel von 0° bis 90°)
- Entfernung einer Werkzeugvoreinstellung zu einer von ihr versorgten Maschine darf nicht größer als 30 Meter sein (zulässige Entfernung 0 bis 30m)
- Entfernung eines Feinmessraumes von einer Umformpresse muss aufgrund der Erschütterungen mindestens 100 Meter betragen (zulässige Entfernung 100 m bis ∞)
- Definierte Maschine ist einer bestimmten Meisterei zugeordnet (zulässige Schnittfläche entspricht 100%, d. h. komplette Überschneidung der Flächen)

- Definierte Maschine darf in einem bestimmten Hallenbereich nicht angeordnet werden (zulässige Schnittfläche entspricht 0%, keine Überschneidung zulässig)

Nach Bedarf lassen sich die durch Anwendung der referenzierten Messmethode ermittelten Bestimmungsparameter mittels der Bewertungsmethode auch weiterverarbeiten bzw. weiterverrechnen. Eine Randbedingung kann dann auch hinsichtlich eines beliebigen Zulässigkeitsbereiches für den so weiterverarbeiteten Wert formuliert werden. Dies kann beispielweise eine definierte Obergrenze für die resultierenden Kosten bzw. Aufwände sein. Die Definition des Zulässigkeitsbereiches erfolgt dann im Normalfall als ein geschlossenes bzw. offenes Intervall, lässt sich aber prinzipiell auch durch mehrere solcher Intervalle beschreiben.

6.2.2.2 Beziehungen in impliziter Formulierung

Beziehungen in impliziter Formulierung adressieren eine im Rahmen der Planung häufig auftretende Problemstruktur. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass bei Anordnung eines Flächenelementes dessen spezifische Anforderungen an sein Umfeld bzw. seinen Standort zu berücksichtigen sind. Die zugehörigen Anforderungen bzw. formulierten Bedarfe sind jedoch nicht einzig von einem speziellen, sondern von einem ganzen Satz von Flächenelementen zu erfüllen. Typische Fragestellungen dieser Art beziehen sich auf Flächenqualitäten des Standorts, wie z. B. Bodentragfähigkeiten, Fundamentierungen sowie Lichtverhältnisse und Raumklima oder auch auf Anforderungen hinsichtlich definierter Ausstattungen, wie z. B. Überkranungen mit bestimmter Tragkraft, oder spezifischer Fähigkeiten, wie z. B. bestimmter Technologien [vgl. z. B. Gäse 2006; Günther 2005, S. 34; Müller 2003; Grundig 2000, S. 49f, 57f; Warnecke 1999, S. 9-82]. Zur Modellierung derartiger Aspekte bietet das verbesserte Verfahren die Möglichkeit einer impliziten Formulierung von Beziehungen auf Basis der Attribute der Flächenelemente, insbesondere der freien Attribute, als wesentliches und sehr leistungsfähiges Instrumentarium an. Auch dieses Beziehungskonstrukt lässt sich prinzipiell für alle verschiedenen Dimensionen nutzen, also für 0-, 1- und 2-dimensionale Beziehungen.

Die Beziehungskonstrukte entfalten ihre Wirkung in einem im Wesentlichen in vier aufeinander folgende **Phasen** gegliederten Ablauf:

- Ermittlung von Flächenelementen mit einem den formulierten Bedarf erfüllenden Angebot
- Ermittlung der zugehörigen geometrischen Bestimmungsparameter
- Verrechnung der geometrischen Bestimmungsparameter mittels der zugehörigen Bewertungsmethode
- Interpretation bzw. Weiterverarbeitung des ermittelten Beziehungswertes

Zu jedem definierten Attribut und jedem hierzu formulierten Bedarf werden zunächst alle diesen **Bedarf prinzipiell erfüllenden Flächenelemente** identifiziert. Grundvoraussetzung dieses Abgleichs ist, dass Angebote und zugehörige Bedarfe stimmig formuliert sind. Wie bereits in Kapitel 6.1.2 beschrieben, können freie Attribute von entsprechenden Elementen in drei unterschiedlichen Formen ausgeprägt werden:

- Zeichenfolge
- Zahl
- Intervall

Zur Abbildung der Bedarfe auf entsprechende Angebote sind jedoch hinsichtlich dieser Ausprägungen nicht alle denkbaren Kombinationen sinnvoll und zulässig. So ist beispielsweise der Abgleich eines als Zeichenfolge modellierten Bedarfs mit einem Angebot lediglich dann möglich, wenn dieses ebenfalls in Logik »Zeichenfolge« formuliert ist. Ebenso lassen sich Bedarfe und Angebote abgleichen, wenn beide als numerische Intervalle beschrieben sind. Die Abbildung eines als Zahl formulierten Bedarfs auf ein als Zahl formuliertes Angebot lässt sich auf den ersten, die Abbildung auf ein als Intervall formuliertes Angebot dagegen auf den zweiten der beiden zuvor genannten Fälle zurückführen. Alle anderen Kombinationen sind entsprechend Abb. 6-10 nicht zulässig. Für die beiden verbleibenden zulässigen Beschreibungen ist die Erfüllung des vorgegebenen Bedarfs durch das definierte Angebot konkret zu über-

Bedarf \ Angebot	Zeichenfolge	Zahl	Intervall
Zeichenfolge	Erfüllung ist zu prüfen !	Unzulässige Formulierung!	Unzulässige Formulierung!
Zahl	Unzulässige Formulierung!	Entspricht Abbildung Zeichenfolge auf Zeichenfolge	Entspricht Abbildung Intervall auf Intervall
Intervall	Unzulässige Formulierung!	Entspricht Abbildung Intervall auf Intervall	Erfüllung ist zu prüfen !

Abb. 6-10: Zulässige Formulierungen für den Abgleich von Bedarf und Angebot

prüfen. Sowohl hinsichtlich der durchgängig alphanumerisch wie auch der durchgängig numerischen Beschreibung in Form von Intervallen sind für die Prüfung jeweils zwei unterschiedliche Logiken zu differenzieren (siehe Abb. 6-11).

Werden bei Formulierung von Bedarf und Angebot in Form von **Zeichenfolgen** mehrere Ausprägungen zu einem Attribut zugelassen, so können sowohl eine ODER- wie auch eine UND-Logik angeraten sein. Bei **ODER-Logik** ist es für die Erfüllung einer Anforderung insgesamt ausreichend, wenn mindestens eine von mehreren zugehörigen Bedarfsausprägungen erfüllt wird. Bei **UND-Logik** dagegen ist es erforderlich, dass alle verschiedenen Ausprägungen zu einem Bedarf erfüllt werden. Eine einzelne erfüllte Ausprägung ist hier also zur Erfüllung der Anforderung insgesamt nicht hinreichend. In Anhang 13.3 sind anhand eines einfachen Beispiels die konkreten Ergebnisse hinsichtlich der Bedarfserfüllung für die beiden alternativen Logiken gegenübergestellt. Bei Formulierung von Bedarf und Angebot in Form von **Intervallen** lassen sich ebenfalls zwei unterschiedliche Logiken ausprägen. Diese sind im Gegensatz zu den Gegebenheiten bei den Zeichenfolgen bereits dann relevant, wenn

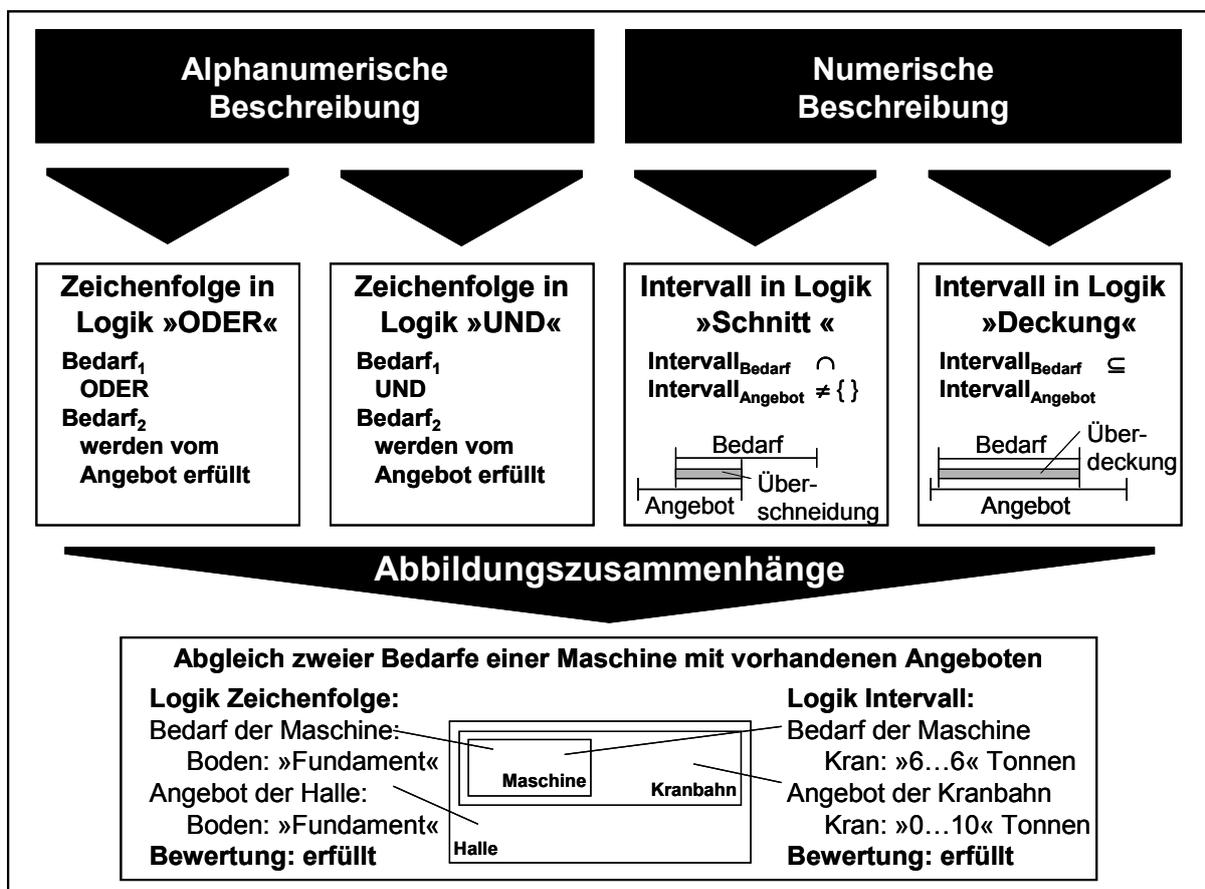


Abb. 6-11: Mögliche Formulierungen zum Abgleich von Bedarf und Angebot auf Basis der Attribute von Flächenelementen mit alternativen Logiken

lediglich ein Intervall definiert ist. Die **Logik »Schnitt«** ist immer dann sinnvoll, wenn die Beziehung insgesamt bereits dann erfüllt sein soll, wenn sich die beiden definierten Intervalle für Bedarf und Angebot bei mindestens einem Wert überschneiden. Die **Logik »Deckung«** ist dagegen dann angeraten, wenn die Beziehung insgesamt erst dann erfüllt sein soll, wenn das Intervall des Bedarfs eine Teilmenge des Intervalls des Angebotes ist, sich diese beiden also komplett überdecken. Auf Basis der in Abb. 6-11 dargestellten Zusammenhänge erfolgt dann die Identifizierung der einen Bedarf prinzipiell erfüllenden Flächenelemente. Diese Flächenelemente bzw. die entsprechenden Elementpaare, gebildet aus jeweils dem Flächenelement mit dem formulierten Bedarf und jeweils einem der den Bedarf erfüllenden Flächenelemente, dienen als Input für die zweite Ablaufphase.

In der zweiten Phase wird zu all den ermittelten Flächenelementpaaren der jeweils zugehörige, durch die Dimension der Beziehung vorgegebene, geometrische **Bestimmungsparameter** aus der Anordnung ermittelt. Die Ermittlung erfolgt unter Anwendung der bereits beschriebenen Messmethoden (vgl. auch Abb. 6-9). Ergebnis ist somit je nach Dimension der Beziehung ein relativer Winkel, eine relative Entfernung oder die Schnittfläche der beiden zugehörigen Flächenelemente.

In der dritten Phase werden die Bestimmungsparameter mittels der zugeordneten **Bewertungsmethoden** weiter zu einem Gesamtwert für die Beziehung, dem sogenannten Beziehungswert, verrechnet. Der resultierende Beziehungswert wird in der vierten Phase entsprechend weiterverarbeitet. Im Falle einer Randbedingung heißt das, es erfolgt ein **Abgleich** mit dem vorgegebenen Zulässigkeitsbereich dieses Beziehungswertes. So wird ermittelt, ob die definierte Randbedingung erfüllt ist oder nicht. Im Falle eines Zieles wird der resultierende Beziehungswert zur Ermittlung des **Gesamtzielwertes** der Anordnung für den Zugriff durch entsprechend weiterführende Bewertungsmethoden bereitgestellt. Die einfachste Ausprägung einer Bewertungsmethode ist auch hier diejenige, die den aus der Anordnung ermittelten Bestimmungsparameter unverändert weitergibt. In diesem Falle lassen sich für Randbedingungen zulässige Wertebereiche direkt hinsichtlich der geometrischen Bestimmungsparameter ausprägen. Der Gesamttablauf zur Auswertung aller implizit formulierten Beziehungen, d. h. für alle Attribute und jedem zu diesen Attributen definierten Bedarf ist in Anhang 13.4 ausführlich dargestellt.

Der Ablauf im Anhang beinhaltet an entsprechender Stelle einen Detailablauf, der auf der rechten Seite der Abbildung als separater Teilablauf dargestellt ist. Dieser Detail- bzw. Unterablauf trägt einer wichtigen Anforderung der betrieblichen Praxis an das verbesserte Verfahren Rechnung. Neben der Erfüllung eines formulierten Bedarfs eines Flächenelementes durch ein einzelnes anderes Flächenelement kann für den Anforderungsabgleich hinsichtlich definierter Attribute auch die Bedarfserfüllung durch mehrere Flächenelemente zugelassen werden. Dies kann beispielsweise für eine Überkranung eines Produktionsbereiches sinnvoll sein. Im gesamten Bereich muss ein Kran entsprechender Tragkraft zur Verfügung stehen. Dass dies aber ein und derselbe Kran bzw. Kräne auf derselben Kranbahn sind, ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Die entsprechende Situation ist in Abb. 6-12 dargestellt.

Soll eine implizit formulierte Beziehung als **Randbedingung** ausgeprägt werden, so müssen zur vollständigen Beschreibung folgende Details festgelegt sein:

- Details zum Attribut
 - Bezeichner des Attributs
 - Art der Formulierung von Bedarf und Angebot für dieses Attribut: alphanumerisch (Zeichenfolge) versus numerisch (Intervall)
 - Spezifisches Verhalten dieses Attributes: Logik UND versus ODER bzw. »Schnitt« versus »Deckung«

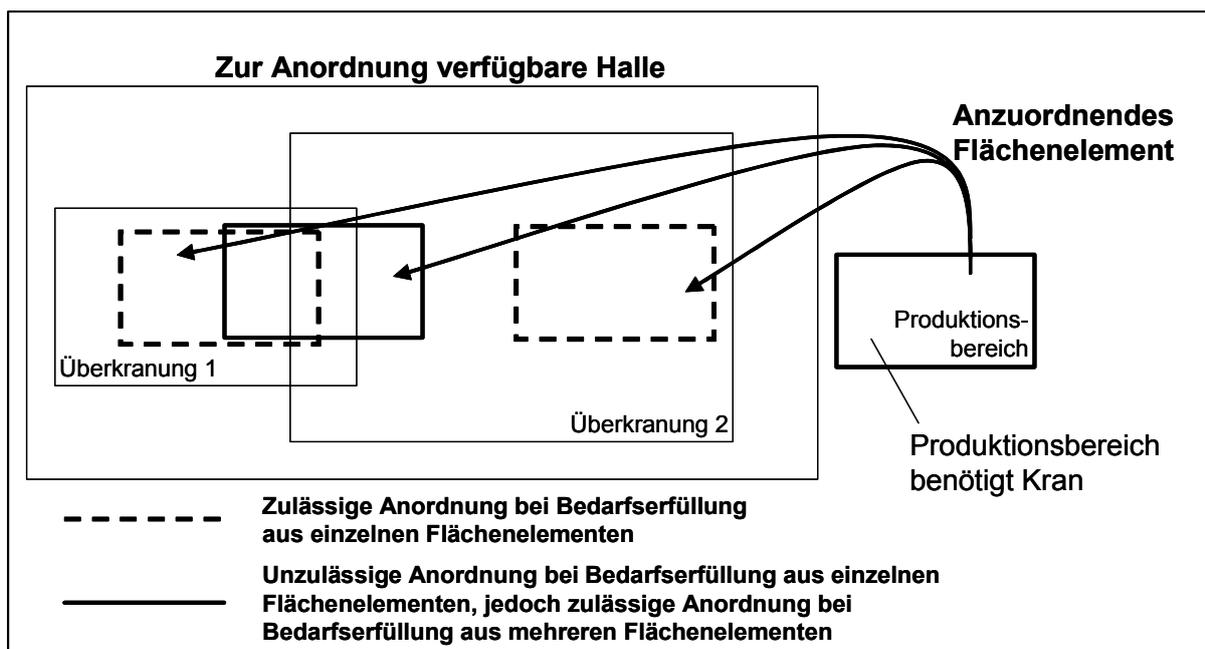


Abb. 6-12: Zulässigkeit der Anordnung abhängig von der unterschiedlichen Charakteristik hinsichtlich der Bedarfserfüllung

- Details zur einzelnen Beziehung
 - Referenziertes Attribut
 - Messmethode
 - Intensität
 - Bewertungsmethode
 - Zulässiger Wertebereich bzgl. des Beziehungswertes
 - Geometrischer Bestimmungsparameter (resultiert aus der Anordnung)
 - Für 2-dimensionale Beziehungen: Bedarfserfüllung lediglich durch einzelne versus Bedarfserfüllung auch durch mehrere Flächenelemente

Zur Ausprägung einer implizit formulierten Beziehung als **Ziel** kann einzig die Vorgabe eines zulässigen Wertebereiches entfallen, alle anderen Details sind entsprechend den Randbedingungen festzulegen. Die verwendeten Bewertungsmethoden werden sich je nach Einsatz für Ziele bzw. für Randbedingungen im Normalfall hinsichtlich ihrer Spezifika unterscheiden.

Mit der beschriebenen Logik der impliziten Formulierung von Beziehungen bietet das verbesserte Verfahren gegenüber herkömmlichen zahlreiche funktionale Erweiterungen und Möglichkeiten zum Abgleich von Bedarfen und Angeboten der Flächenelemente. Im Folgenden sind die wesentlichen Aspekte nochmals zusammengefasst:

- Beziehungen ermöglichen den Abgleich von Bedarf und Angebot zu 0-, 1- und 2-dimensionalen Bestimmungsgrößen von Anordnungen
- Beziehungen ermöglichen eine alternative Abbildung von Zielen und Randbedingungen
- Beziehungen lassen sich alternativ mit einer konvergierenden oder einer divergierenden Charakteristik ausprägen
- Randbedingungen lassen sich alternativ entweder direkt hinsichtlich der geometrischen Bestimmungsgrößen aus der Anordnung oder auch zu aus diesen Größen resultierenden Werten formulieren
- Randbedingungen zu 2-dimensionalen Beziehungen lassen sich alternativ in der Einheit Fläche [m²] oder auch prozentual [%] formulieren
- Optional kann für 2-dimensionale Beziehungen eine Bedarfserfüllung auch aus mehreren Flächenelementen zugelassen werden

- Als spezielle Zielelogik ist die quantitative Bewertung der Erfüllung bzw. Nichterfüllung von Randbedingungen möglich; der zulässige Wertebereich ist für diesen Fall in einer entsprechend spezifizierten Bewertungsmethode integriert
- Die beschriebene Logik für die freien Attribute ist in gleicher Form auch für das Attribut »Anordnungshierarchie« sinnvoll; diese Logik unterstützt die Bildung von Zuordnungsstrukturen, z. B. entsprechend der Hierarchien des Produktionsbetriebs [vgl. Westkämper 2006a, S. 55f; Meier 2007, S. 26]

Die Zusammenstellung der Funktionalitäten zeigt, dass für die implizit formulierten Beziehungen somit ein ähnlich umfassendes und differenziert nutzbares Instrumentarium wie für die explizit formulierten Beziehungen zur Verfügung steht. Daher haben die planerischen Möglichkeiten für 1:n- bzw. n:m-Beziehungen nahezu die gleiche Mächtigkeit wie diejenigen für das klassische Konstrukt herkömmlicher Verfahren zur Anordnungsplanung, die 1:1-Beziehungen.

In Abb. 6-13 sind die Spezifika der im verbesserten, skalierbaren Modellierungsverfahren realisierten Logik zur Abbildung der Beziehungen zwischen Flächenelementen, impliziter wie expliziter, nochmals im **Überblick** zusammengestellt.

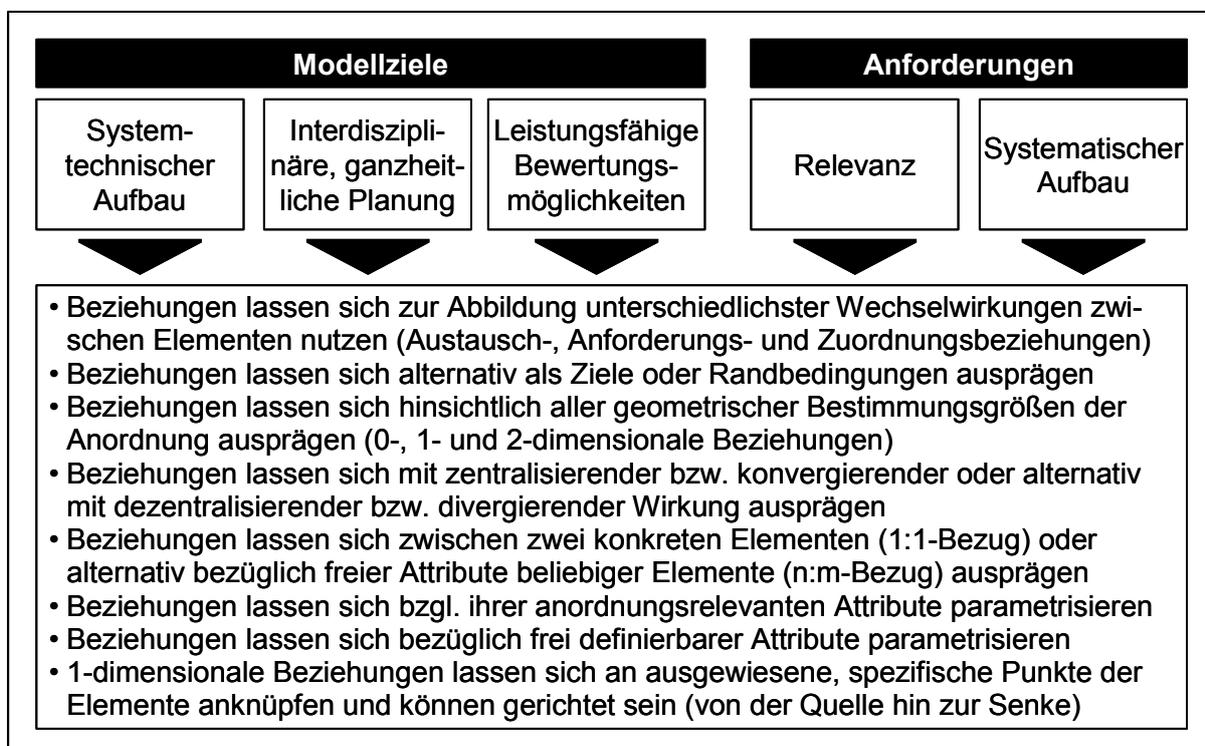


Abb. 6-13: Zusammenfassung der Abbildungslogik für Beziehungen zwischen flächenbehafteten Elementen

7 Nutzung der strukturellen Verbesserungen des Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Die im vorigen Kapitel beschriebenen strukturellen Weiterentwicklungen des verbesserten Modellierungsverfahrens hinsichtlich der Flächenelemente und insbesondere der zwischen diesen bestehenden wechselseitigen Beziehungen bieten erhebliche Nutzenpotenziale im Rahmen der Durchführung der Anordnungsplanungsaufgabe. Die aus den strukturellen Verbesserungen resultierenden **Potenziale** beziehen sich dabei auf zwei wesentliche Teilaspekte:

- Erweiterte Möglichkeiten zur Bewertung von räumlichen Anordnungen
- Erweiterte Möglichkeiten zur Steuerung des Anordnungsverhaltens

7.1 Logik zur Bewertung räumlicher Anordnungen

Die Anforderungen an die Bewertung räumlicher Anordnungen sind äußerst vielfältig. Unter Top-Dow-Aspekten ist zunächst die Unternehmensplanung als Anforderungsquelle zu nennen. Hier werden auf übergeordneter Ebene strategische Vorgaben und wesentliche Zielfaktoren definiert [vgl. Aggteleky 1987, S. 149 2f]. Das Zielsystem der Fabrik- bzw. Anordnungsplanung ist konsistent aus diesem abzuleiten. Eventuelle Zielkonflikte sind nach Möglichkeit aufzulösen. Dies erfolgt in der Regel, indem die Ziele in eine durchgängige Hierarchie gebracht und entsprechend gewichtet werden [vgl. Warnecke 1999, S. 9-9]. Neben diesen aufgabenspezifischen Zielen resultiert weiterer konkreter Input für die Bewertung räumlicher Anordnungen im Normalfall aus nahezu allen zu durchlaufenden Aufgaben des Planungsnetzes, sowohl denjenigen, die der Anordnungsplanung vor- wie auch denjenigen, die ihr nachgelagert sind. Besonders relevante vorgelagerte Aufgaben sind in diesem Zusammenhang die Ressourcen- und Prozessplanung, die Segmentierung sowie die Prinzipplanung und Dimensionierung. Relevante nachgelagerte und möglichst zu antizipierende Aufgaben sind insbesondere die Infrastruktur-, Bau- und Investitionsplanung [vgl. Aggteleky 1987, S. 234 6f; Aggteleky 1990a, S. 599]. Die Vielzahl der Einflüsse und der an der Planung beteiligten Disziplinen führt zu einem äußerst breiten Anforderungsspektrum für die Bewertung räumlicher Anordnungen. Dies resultiert letztlich in einer **Vielzahl unterschiedlichster Aspekte**, die der Bewertung zugänglich zu machen sind:

- Strukturelle Aspekte [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Grundig 2000, S. 97 2f; Warnecke 1999, S. 9-57f; Aggteleky 1990b, S. 472f]
- Ablaufbezogene Aspekte [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Aggteleky 1990b, S. 472f; Aggteleky 1987, S. 149 3f]
- Technologische Aspekte [vgl. Aggteleky 1990b, S. 472f; Aggteleky 1987, S. 46]
- Infrastrukturelle Aspekte [vgl. Aggteleky 1990a, S. 602; Aggteleky 1990b, S. 472]
- Wirtschaftliche Aspekte [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Wiendahl 2000, S. 21; Warnecke 1999, S. 9-1; Aggteleky 1987, S. 46]
- Adaptive Aspekte [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Wiendahl 2000, S. 21; Warnecke 1999, S. 9-1; Aggteleky 1990a, S. 614 2f]
- Ästhetische Aspekte [vgl. Wiendahl 2000, S. 21; Warnecke 1999, S. 9-2; Aggteleky 1990b, S. 472f]
- Ökologische Aspekte [vgl. Aggteleky 1990b, S. 472f; Aggteleky 1987, S. 151]

Die erkennbar große Breite der für die Bewertung räumlicher Anordnungen potenziell relevanten Aspekte macht deutlich, dass von der Existenz allgemeingültiger oder auch nur hinlänglich standardisierter Zielsysteme für die Anordnungsplanung nicht ausgegangen werden kann. Die Mehrzahl der heute bekannten Verfahren geht jedoch genau davon aus. Die Zielsysteme sind vielmehr als in hohem Maße **aufgaben- und planerspezifisch** anzusehen [vgl. Aggteleky 1990a, S. 597]. Realitätsnahe und anforderungsgerechte Bewertungen räumlicher Anordnungen erfordern daher ein höchst flexibles und leistungsfähiges Instrumentarium, mit dem sich verschiedenste Bewertungskriterien unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Sichten der beteiligten Planungsdisziplinen differenziert abbilden lassen.

Die zu berücksichtigenden Kriterien verstehen sich dabei als Umsetzung von Muss- wie auch von Soll- und Wunschanforderungen [vgl. Wirth 2000b, S. 17; Aggteleky 1990a, S. 307]. Aus **Mussanforderungen** resultierende Kriterien werden im Normalfall als Randbedingungen bzw. Restriktionen formuliert. Diese sind definitionsgemäß unbedingt einzuhalten. **Soll- und Wunschanforderungen** fließen dagegen in die Kriterien ein, die den Zielwert der Anordnung bildenden. Sie sind unmittelbar Gegenstand der Optimierung. Zu beachten ist, dass auch Randbedingungen bzw. Re-

striktionen nicht für alle Fälle und Eventualitäten als unumstößlich anzusehen sind. Sie lassen sich häufig durch entsprechenden Mitteleinsatz und zugehörige Maßnahmen relativieren oder sogar auflösen. Dies geht jedoch in der Regel zu Lasten eines negativen Einflusses auf die Gesamtbewertung der Anordnung.

7.1.1 Grundlagen der verbesserten Bewertungslogik

Wesentliche Grundlage der stark erweiterten Bewertungsmöglichkeiten des verbesserten Modellierungsverfahrens sind die gegenüber herkömmlichen Verfahren deutlich umfassenderen Beziehungskonstrukte. Dies betrifft Ziele wie Randbedingungen mit ihren unterschiedlichen Dimensionen und Logiken. Die konsequente Nutzung der erweiterten Abbildungsmöglichkeiten zur verbesserten Bewertung setzt den **freien Zugriff** auf sämtliche Konstrukte der Modellierung voraus. Dies umfasst die Flächenelemente und deren wechselseitige Beziehungen, insbesondere jedoch deren jeweilige Attribute mit ihren zugehörigen aktuellen Ausprägungen (Abb. 7-1). Bestandteil

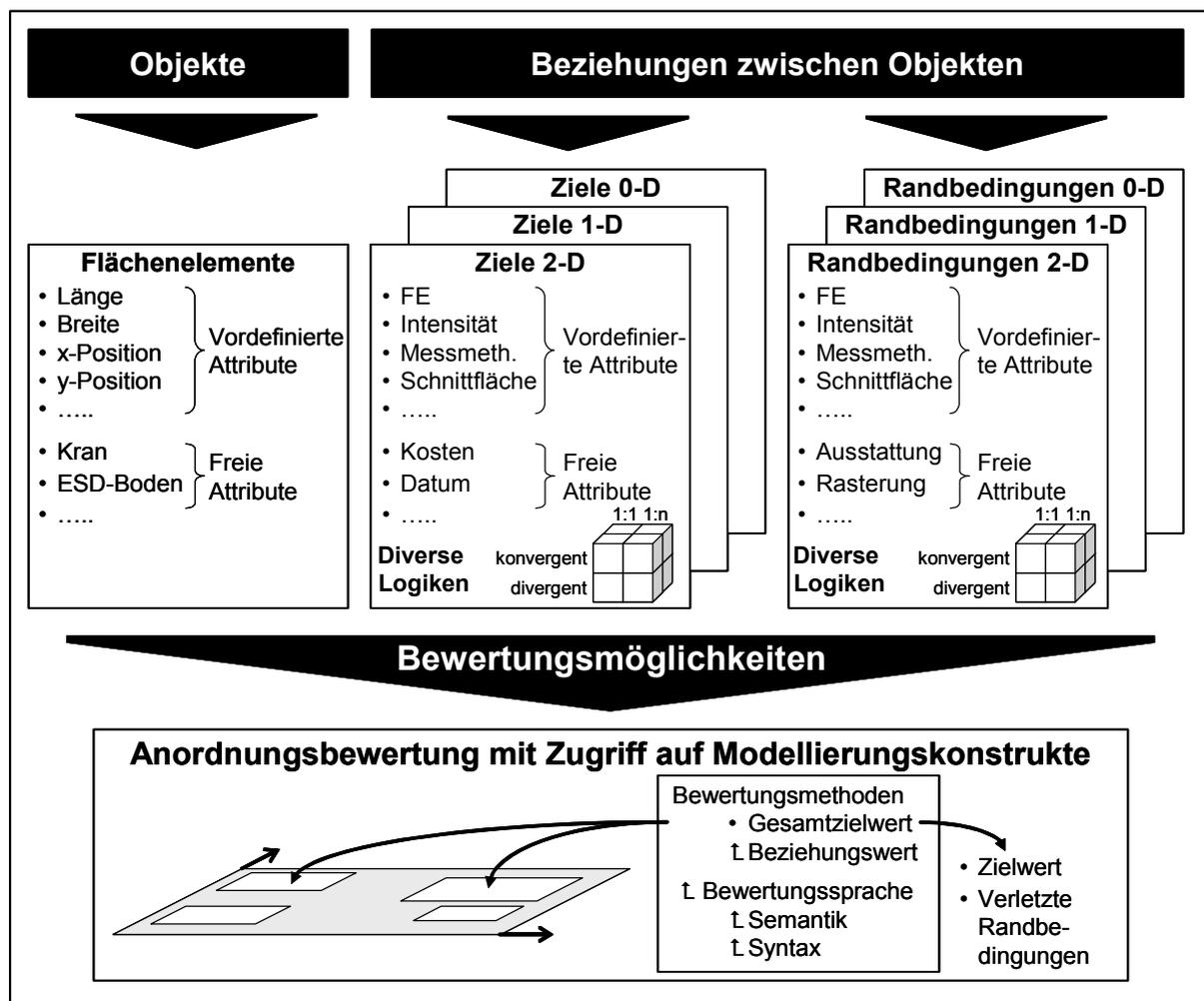


Abb. 7-1: Bewertung mit Zugriffsmöglichkeit auf die Konstrukte der Modellierung

dieser Attribute sind auch und gerade die 0-, 1- und 2-dimensionalen Bestimmungsparameter aus der Anordnung. Um diese im Rahmen der Bewertung möglichst flexibel weiter verarbeiten zu können, stellt das verbesserte Verfahren eine spezifische Sprache zur Formulierung der Bewertungsmethoden bereit. Diese orientiert sich aufgrund der geforderten Freiheitsgrade an den Möglichkeiten von objektorientierten Programmiersprachen³⁹. Hiermit lassen sich je nach Planungsaufgabe unterschiedlichste Aspekte bewerten, die sich aufgrund ihrer geforderten Vergleichbarkeit meist an der Wirtschaftlichkeit der Anordnung orientieren [vgl. Aggteleky 1990a, S. 586]. So können je nach Bedarf verschiedenste Kosten- und Nutzen- bzw. Aufwands- und Leistungsaspekte ausgewertet werden. Dies umfasst sowohl einmalige (z. B. Investitionen) wie auch laufende Aufwendungen bzw. Kosten des Betriebs. Bezüglich der Anwendung der **Methodensprache** sind zwei unterschiedliche Arten von Bewertungsmethoden zu unterscheiden:

- Methoden zur Bewertung von einzelnen Beziehungen (Ermittlung des Beziehungswertes)
- Methoden zur Verknüpfung der einzelnen Beziehungen zur Bewertung der Gesamtanordnung (Ermittlung des Gesamtzielwertes der Anordnung)

Während der erste Methodentyp die Interpretation und Verrechnung der aus der Anordnung resultierenden Bestimmungsparameter in den Mittelpunkt stellt, orientiert sich der zweite Typ inhaltlich vor allem an der Logik der **Nutzwertanalyse** [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Grundig 2000, S. 174; Wiendahl 2000, S. 74; Wirth 2000b, S. 37; Warnecke 1999, S. 9-27; Aggteleky 1990a, S. 322, 762]. Die Zusammenführung einzelner Beziehungswerte bzw. deren Verknüpfung zum Gesamtzielwert kann dabei durchaus in **mehreren Stufen** erfolgen. Beispielsweise wird zunächst der Wert eines einzelnen Kriteriums ermittelt, das sich seinerseits bereits aus mehreren einzelnen Beziehungen zusammensetzt. Dieses Kriterium wird anschließend in gewichteter Form zusammen mit anderen zum Gesamtzielwert integriert.

Vergleichbar den Programmiersprachen wird auch die Methodensprache durch ihre Semiotik⁴⁰ definiert, deren Schwerpunkte die **Semantik** und die **Syntax** sind. Wäh-

³⁹ Inhaltlich orientiert sich die Methodensprache an den Gegebenheiten der Programmiersprachen der 3. und 4. Generation [vgl. Wikipedia 2007, »Programmiersprachen«].

⁴⁰ Zum Begriff der Semiotik einer Sprache vgl. Wikipedia 2007, »Programmiersprachen«.

rend die Syntax für die Leistungsfähigkeit der Methodensprache lediglich von untergeordneter Bedeutung ist und an diejenige einer der höheren Programmiersprachen angelehnt werden kann, ist die Semantik von wesentlicher Bedeutung. Insbesondere die verfügbaren **Sprachbausteine** definieren letztlich den Funktionsumfang der Methodensprache. Diese sollen im Folgenden näher beleuchtet werden (Abb. 7-2):

Die verfügbaren Bausteine lassen sich in datenseitig und berechnungsseitig eingesetzte Konstrukte unterscheiden. Datenseitig sind zunächst **Zugriffsmethoden** erforderlich, die den Zugriff auf die Attribute der Flächenelemente und deren Beziehungen gewährleisten. Der lesende Zugriff auf das entsprechende Attribut bzw. dessen aktuelle Ausprägung liefert den Input für die eigentliche Berechnung. Die Methode mit schreibendem Zugriff schreibt das Ergebnis der Berechnung wieder zurück. Der schreibende Zugriff wird insbesondere, jedoch nicht zwingend für das Zurückschreiben von Zwischenergebnissen verwendet, die im Anschluss durch andere Methoden weiter bearbeitet werden. Prinzipiell lassen sich mit dem schreibenden Zugriff jedoch auch strukturelle Zustandsänderungen von Flächenelementen oder deren Be-

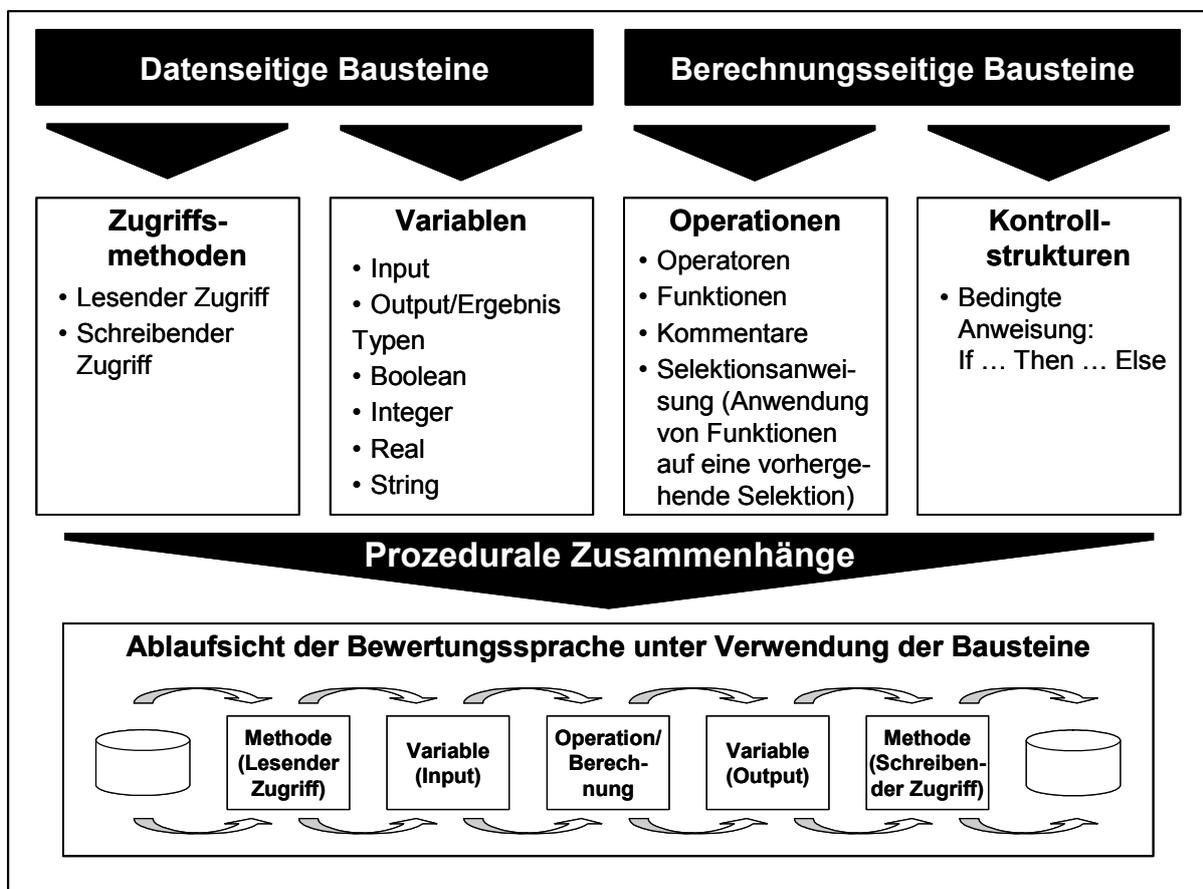


Abb. 7-2: Verfügbare Bausteine der Methodensprache und deren Zusammenwirken zur Bewertung

ziehungen bzw. deren aktuellen Attributsausprägungen realisieren, sofern tatsächlich sinnvoll und gewünscht. Das mittels der Methode abgefragte Ergebnis wird als Input für die Berechnung als **Variable** bereitgestellt bzw. definiert. Für die Anordnungsplanung werden Variablen vom Typ »boolean«, »integer«, »real« und »string« benötigt. Die Zwischenspeicherung von Ergebnissen bzw. Teilergebnissen der Bewertung wird erheblich vereinfacht, wenn die Variablen auch einen Typ »kriterium« umfassen.

Im Rahmen der eigentlichen Berechnungen sind für die Manipulation der Variablen verschiedene **Operationen** vorzusehen. Dies sind zum einen arithmetische, logische, relationale und einige ergänzende **Operatoren**, zum anderen jedoch auch verschiedene mathematische **Funktionen**, wie z. B. e^x , $\sqrt{\quad}$, $\log(x)$, $\log_{10}(x)$, $\text{abs}(x)$, $\text{round}(x)$ sowie verschiedene statistische Funktionen, wie z. B. $\text{sum}()$, $\text{qsum}()$, $\text{avg}()$, $\text{min}()$, $\text{max}()$, $\text{mult}()$. Zur besseren Erläuterung der Operationen sind darüber hinaus, wie von Programmiersprachen bekannt, **Kommentare** bzw. Kommentarzeichen zugelassen. Mittels sogenannter »**Selektionsanweisungen**« lassen sich abhängig von spezifischen Attributsausprägungen zunächst definierte Teilmengen von Flächenelementen oder Beziehungen selektieren⁴¹, auf die dann im Anschluss eine oder mehrere Funktionen angewendet werden können, hier bevorzugt die statistischen Funktionen. Zur Steuerung des Methodenablaufs wird als einzige erforderliche **Kontrollstruktur**⁴² die »bedingte Anweisung«⁴³ angeboten.

Mit den erläuterten Bausteinen lassen sich beliebige Bewertungsmethoden formulieren. Der **Gesamtablauf** unter Verwendung der Bausteine ist in Abb. 7-2 unten dargestellt. Die Methode für lesenden Zugriff liefert eine definierte Attributsausprägung, die als Inputvariable in den eigentlichen Berechnungsvorgang eingeht. Die aus der Berechnung resultierende Output- bzw. Ergebnisvariable steht anschließend für weitere Berechnungsvorgänge zur Verfügung und lässt sich darüber hinaus bei Bedarf an eine entsprechende Stelle schreiben bzw. zurück schreiben. Dieser gesamte Ablauf kann bei Bedarf mehrfach, letztlich sogar beliebig oft durchlaufen werden.

⁴¹ Vgl. hierzu »SELECT«-Statement der Programmiersprachen, z. B. Wikipedia 2007, »Programmiersprache«.

⁴² Vgl. z. B. Wikipedia 2007, »Kontrollstruktur«.

⁴³ Die bedingte Anweisung ist vom Typ »IF ... THEN ... ELSE«.

7.1.2 Methoden zur Bewertung von Beziehungen zwischen Flächenelementen

Dieser Typ von Bewertungsmethoden dient zur Ermittlung des Wertes einer einzelnen Beziehung. In die Bewertung können hierbei zwei grundsätzlich unterschiedliche **Aspekte** einfließen:

- Variable Bewertungsanteile, d. h. Größen, die von mindestens einem der zugehörigen Bestimmungsparameter der Anordnung abhängen
- Fixe Bewertungsanteile, d. h. Größen, die von keinem der zugehörigen Bestimmungsparameter der Anordnung abhängen

Bestimmungsparameter können dabei sämtliche aus der Anordnung zurück gemeldeten Attribute der entsprechenden Beziehung oder von einem der zu dieser Beziehung referenzierten Flächenelemente sein. Für die variablen Bewertungsanteile sind hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Bestimmungsparameter und Beziehungswert wiederum zwei grundsätzlich unterschiedliche **Arten** abbildbar:

- Lineare Zusammenhänge
- Nicht lineare Zusammenhänge

Die mit der Methodensprache gegebenen Möglichkeiten zur Bewertung einzelner Beziehungen werden nachfolgend anhand einiger **Beispiele** der betrieblichen Praxis veranschaulicht:

Kosten für Materialtransporte (1-dimensionale Beziehung)

Kosten für Materialtransporte lassen sich beispielsweise so abbilden, dass sie abhängig von Transportdistanz und verwendetem Transportmittel sind. Die Auswahl des Transportmittels erfolgt dabei in Abhängigkeit von der Transportdistanz. Der Transport selbst verursacht einen fixen Kostenanteil. Dieser berücksichtigt z. B. den Aufwand für das Beladen und ist unabhängig von der Transportdistanz, jedoch abhängig vom verwendeten Transportmittel. Für die Transportabwicklung stehen mehrere unterschiedliche Transportmittel mit jeweils einem spezifischen Satz für **fixe und variable Kosten** zur Verfügung. Jedes Transportmittel deckt dabei überlappungsfrei ein definiertes Distanzspektrum ab. In ähnlicher Weise kann die Auswahl des Transportmittels auch alternativ in Abhängigkeit von der Intensität anstatt der Transportdistanz der Beziehung erfolgen [vgl. Bölte 1994, S. 42].

Kosten für Umstellung einer Maschine (1- bzw. 2-dimensionale Beziehung)

Die Kosten für das Umstellen einer Maschine lassen sich beispielsweise so abbilden, dass ein **fixer und ein variabler Kostenanteil** zum Ansatz kommt. Der fixe Anteil fällt bei jeder Umstellung an und ist unabhängig von der Umzugsdistanz. Er berücksichtigt z. B. den Aufwand für das Ab- und wieder Anschließen der Maschine. Hinzu kommt ein variabler Anteil, der von der Umzugsdistanz abhängt. Dass eine Maschine nicht mehr am ursprünglichen Standort steht, kann in der Bewertungsmethode auf drei verschiedene Arten ermittelt werden:

- Vergleich der x-, y- und ggf. z-Koordinate des Referenzpunktes der Maschine zwischen der Anordnung vorher und nachher
- Abfrage des Wertes einer 1-dimensionalen Beziehung zwischen einem im globalen Koordinatensystem der Planung fixen Konnektorpunkt (repräsentiert die bisherige Position der Maschine) und der aktuellen Position des Referenzpunktes der Maschine (Distanz $d > 0$ bzw. $d \neq 0$ bedeutet Umzug ist erfolgt)
- Abfrage des Wertes einer 2-dimensionalen Beziehung zwischen bisher und aktuell durch die Maschine belegter Fläche (Schnittfläche $\neq 100\%$ bedeutet Umzug ist erfolgt)

Die erste Möglichkeit ist problematisch, da die Historie der Anordnungspositionen nicht mitgeführt wird. Die zweite und dritte Möglichkeit sind im Wesentlichen gleichwertig. Bei einer entfernungsabhängigen Kostenkomponente des Umzugs ist eher der zweite Weg zu favorisieren, da die Umzugsdistanz der Maschine für die Berechnung dieser Komponente in jedem Falle benötigt wird [vgl. Bölte 1994, S. 43].

Investitionskosten für ESD-Fußboden (2-dimensionale Beziehung)

Zur Anordnung einer Elektronikfertigung werden anfallende Investitionskosten beispielsweise so modelliert, dass die Nutzung eines bereits vorhandenen ESD-Fußbodens berücksichtigt wird. Ist eine Neuausstattung einer Fußbodenfläche mit ESD erforderlich, so entstehen fixe Kosten, z. B. für die Organisation und Vergabe der Arbeiten, sowie variable Kosten, abhängig von der Größe der neu auszurüstenden Fläche. Hierzu bildet ein implizit formuliertes Ziel den Bedarf der Elektronikfertigung bzw. das Angebot der bereits mit ESD ausgerüsteten Flächen ab. Ist die aus der Anordnung resultierende Schnittfläche von Elektronikfertigung und den bereits entsprechend qualifizierten Flächen ungleich 100%, so sind neue ESD-Flächen herzustellen.

Somit fällt der fixe Kostenanteil an. Der variable Anteil berechnet sich proportional zur bisher nicht ESD-ausgerüsteten Fläche, d. h. Gesamtfläche der Elektronikfertigung minus Schnittfläche mit bereits ESD-ausgerüsteter Fläche.

7.1.3 Methoden zur Verknüpfung von Beziehungen

Zur Bewertung der Gesamtanordnung werden die bereits ermittelten Werte der einzelnen Beziehungen mittels des zweiten Typs von Bewertungsmethoden zu einem Gesamtzielwert zusammengeführt. Diese Integration orientiert sich an den Prinzipien und der Logik der **Nutzwertanalyse** (Abb. 7-3). Demnach werden zunächst diejenigen Einzelbeziehungen zusammengeführt, die in der Nutzwertanalyse ein einzelnes Bewertungskriterium bilden. Zusammen mit dessen jeweiliger Gewichtung wird dieses Kriterium anschließend mit den anderen relativ zu diesem Kriterium gewichteten Kriterien zum **Gesamtzielwert** integriert [vgl. Bischoff 2001, S. 234; Grundig 2000, S. 174; Wiendahl 2000, S. 74; Wirth 2000b, S. 37; Warnecke 1999, S. 9-27; Aggteleky 1990a, S. 322, 762]. Der Anwendungsschwerpunkt der Methodensprache liegt bei dieser Aufgabenstellung auf Selektionsanweisungen und statistischen Funktionen.

Grundvoraussetzung zur Verknüpfung der Einzelbeziehungen bzw. zur Zusammenführung einzelner Beziehungswerte zum übergeordneten Zielwert der Gesamtanord-

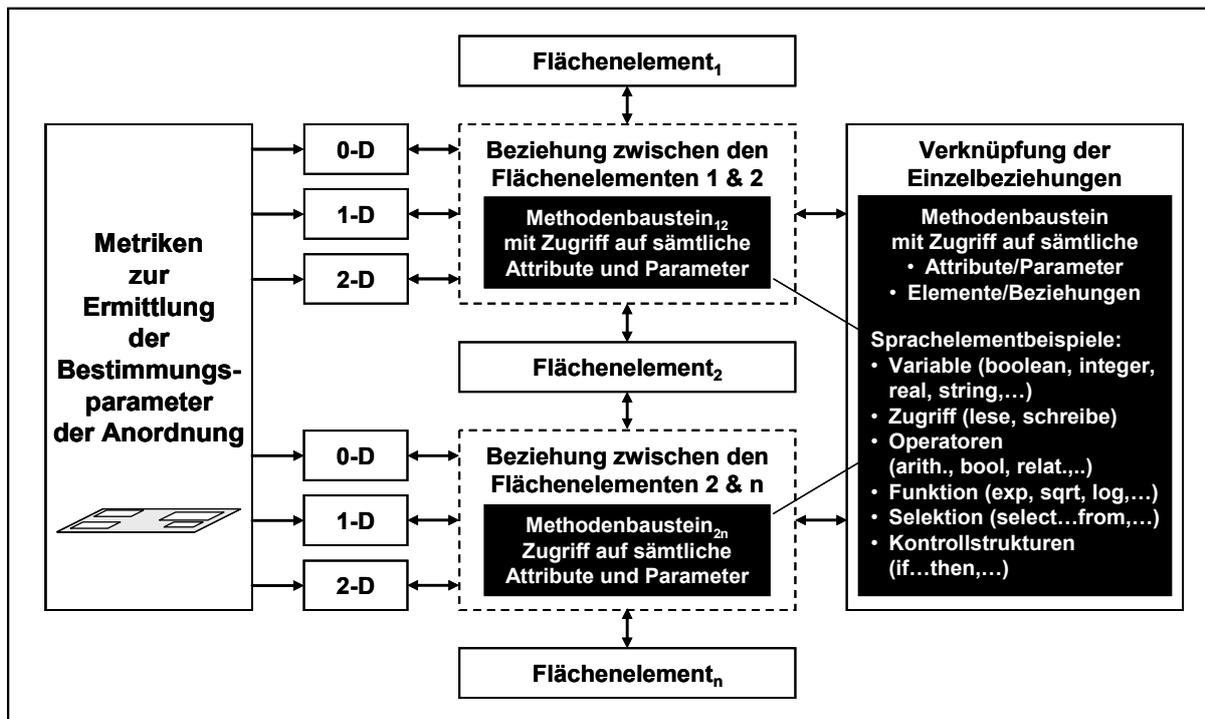


Abb. 7-3: Übergeordnete Logik der Anordnungsbewertung

nung ist die **Quantifizierbarkeit** der abzubildenden Beziehungen. Ist diese nicht automatisch möglich, so kann sie durchaus auch subjektiv, z. B. durch das Planungsteam erfolgen. Es ist dann einzig sicherzustellen, dass die Quantifizierung auch vorgenommen und an erforderlicher Stelle ein entsprechender Wert bereitgestellt wird.

Die Möglichkeiten der Methodensprache sollen auch hier anhand eines betrieblichen **Beispiels** veranschaulicht werden:

Identische Kostenarten und Einheiten (1- und 2-dimensionale Beziehungen)

Alle Kosten einer spezifischen Kostenart, wie z. B. Transportkosten oder auch Investitionskosten, werden zu jeweils einem übergeordneten Kriterium zusammengeführt. Für die Beziehungen lässt sich zur Differenzierung der relevanten Kostenarten beispielsweise ein freies Attribut »Kostenart« definieren und mit den entsprechenden Ausprägungen belegen. Mittels **Selektionsanweisung** werden aus all den definierten Beziehungen zusammengehörige Teilmengen gebildet und jeweils miteinander verrechnet, beispielsweise aufaddiert. Um übergeordnet wieder vergleichbar zu sein, werden die ermittelten Kriterienwerte erforderlichenfalls entsprechend umgerechnet, z. B. Investitionskosten über eine vorgegebene Amortisationszeit wieder in laufende Kosten umgerechnet. Diese lassen sich dann im Anschluss beispielsweise zu einem Kriterium »Gesamtkosten des Betriebs« integrieren. Analog den Kostenarten lassen sich gleichwertige Beziehungs- oder Kriterienwerte auch anhand der ihnen zugeordneten und in einem freien Attribut hinterlegten Einheit, wie z. B. $\text{€}/(\text{m} \cdot \text{kg})$, identifizieren und anschließend rechnerisch entsprechend integrieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das verbesserte Modellierungsverfahren ganz erhebliche Potenziale hinsichtlich der Möglichkeiten einer aufgabenspezifischen und ganzheitlichen Bewertung erschließt. Basis der Verbesserung ist die Kombination aus den strukturellen Weiterentwicklungen im Bereich der Flächenelemente und deren Beziehungen einerseits, sowie aus der Bereitstellung einer sehr flexiblen und leistungsfähigen Methodensprache andererseits. Die **strukturellen Verbesserungen** beziehen sich vor allem auf Umfang, Struktur und Durchgängigkeit der Attributsätze sowie den Umfang und die differenzierte Logik bei der Beziehungsmodellierung. Hinsichtlich der Beziehungen lassen sich bedarfsorientiert die folgenden alternativen Logiken ausprägen:

- Ziele oder Randbedingungen
- 0-, 1- oder 2-dimensionale Logik
- Explizite (1:1) oder implizite (1:n bzw. n:m) Formulierung
- Konvergierendes bzw. zentralisierendes oder divergierendes bzw. dezentralisierendes Verhalten

Die **Verbesserungen** der **Bewertung** räumlicher Anordnungen resultieren somit vor allem aus den freien Zugriffsmöglichkeiten auf sämtliche Attribute der Flächenelemente und Beziehungen bzw. deren Ausprägungen sowie der großen Flexibilität und den erheblichen Freiheitsgraden zur Definition von Berechnungen mittels der Methodensprache. Die Grenzen der Bewertung wurden mit den Verbesserungen so erheblich hinaus geschoben, dass die grundsätzlichen Grenzen der Bewertung wieder zunehmend in den Mittelpunkt rücken. Diese beziehen sich beispielsweise auf die generelle Quantifizierbarkeit der Kriterien, sei es monetär oder nicht, oder auch auf deren grundsätzliche Vergleichbarkeit. In Abb. 7-4 sind die Spezifika der dem verbesserten Modellierungsverfahren zugrunde liegenden Bewertungslogik nochmals im **Überblick** dargestellt. Die Logik berücksichtigt in besonderer Weise die Anforderungen einer multikriteriellen und aufgabenspezifischen Bewertung.

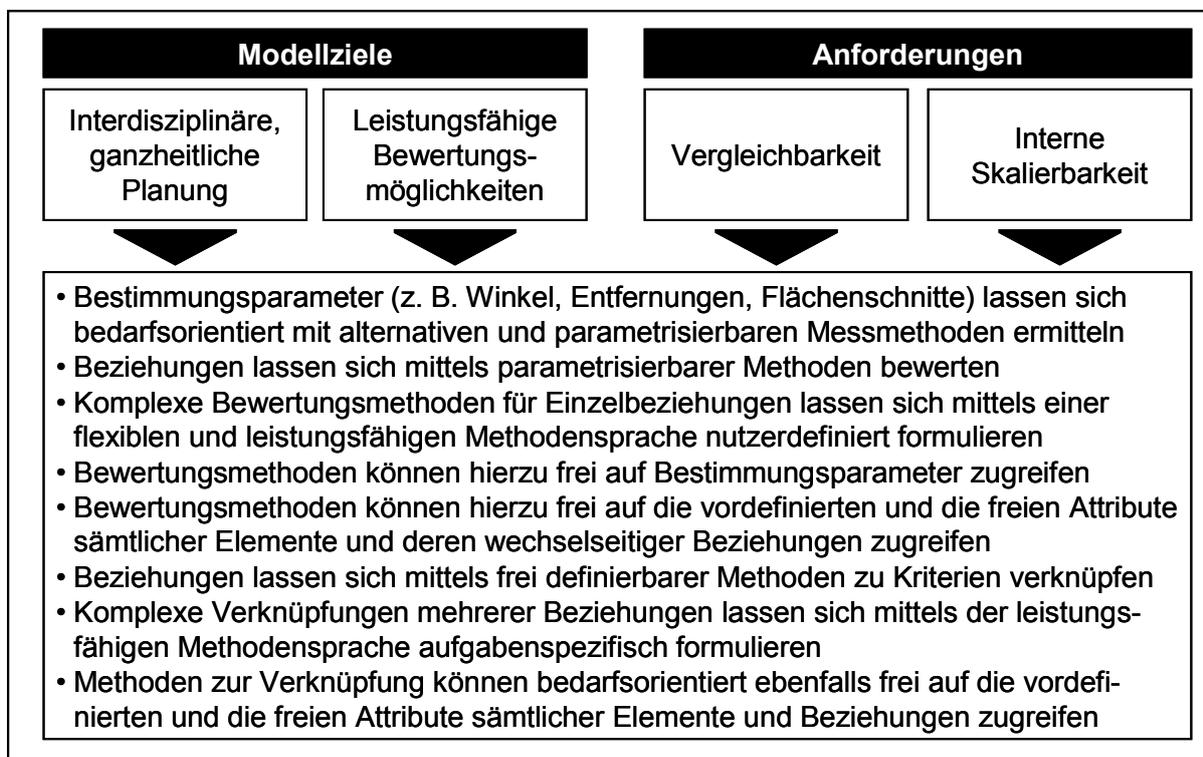


Abb. 7-4: Zusammenfassung der Bewertungslogik

7.2 Logik des Anordnungsverhaltens

Neben der erheblichen Erweiterung der Bewertungsmöglichkeiten bietet die strukturelle Weiterentwicklung des verbesserten Modellierungsverfahrens gerade hinsichtlich des Anordnungsverhaltens und dessen Adaptierbarkeit durch den modellierten Kontext erhebliche Nutzenpotenziale in der Durchführung der Anordnungsplanungsaufgabe. Auch hier resultieren die verbesserten Möglichkeiten insbesondere aus der deutlich erweiterten Abbildungsmöglichkeit und der konsequenten Systematisierung der Beziehungen zwischen Flächenelementen. Hinsichtlich der Adaption des Anordnungsverhaltens kommt die größte Bedeutung den als Randbedingungen ausprägenden Beziehungen zu, vor allem den implizit formulierten.

Vor dem Hintergrund der geforderten Skalierbarkeit bewegt sich die Logik des Anordnungsverhaltens in einem Spannungsfeld zwischen Durchgängigkeit und Konsistenz der Modellierung einerseits sowie kontextabhängiger Beeinflussbarkeit und Steuerbarkeit des Anordnungsverhaltens andererseits. Die geforderte **Durchgängigkeit und Konsistenz** bezieht sich hier sowohl auf die strukturellen Gegebenheiten der Modellierung, insbesondere die Verfügbarkeit der durchgängigen Planungs- und Anordnungshierarchie sowie die Durchgängigkeit der jeweiligen Attributsätze von Flächenelementen und Beziehungen, als auch auf ein durchgängiges Anordnungsverhalten. Von einem solchen ist auszugehen, wenn der Einfluss von Zielen und Randbedingungen auf die Anordnung unabhängig vom planerischen Kontext und von der Einordnung der zugehörigen Flächenelemente in der Planungs- und Anordnungshierarchie ist. Dies bedingt gleichzeitig, dass die Wirkung der Ziele und Randbedingungen auf die Anordnung in allen Fällen jeweils identisch ist.

Die kontextabhängige **Adaptier- bzw. Steuerbarkeit** des Anordnungsverhaltens setzt auf der einen Seite entsprechende Abbildungsmöglichkeiten des spezifischen strukturellen Kontextes voraus. Dies erfolgt mittels spezifischer Attributs- und Beziehungsausprägungen. Als Beziehungen kommen hier aufgrund der gegebenen Anforderungen insbesondere implizit formulierte Randbedingungen zur Anwendung. Auf der anderen Seite ist ein kontextsensitives Anordnungsverhalten erforderlich. Zwingende Voraussetzung für diese Verhaltenscharakteristik ist wiederum die zuvor beschriebene Verhaltenskonsistenz. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Abb. 7-5 im Überblick dargestellt. Da die ersten drei der dort genannten prägenden Model-

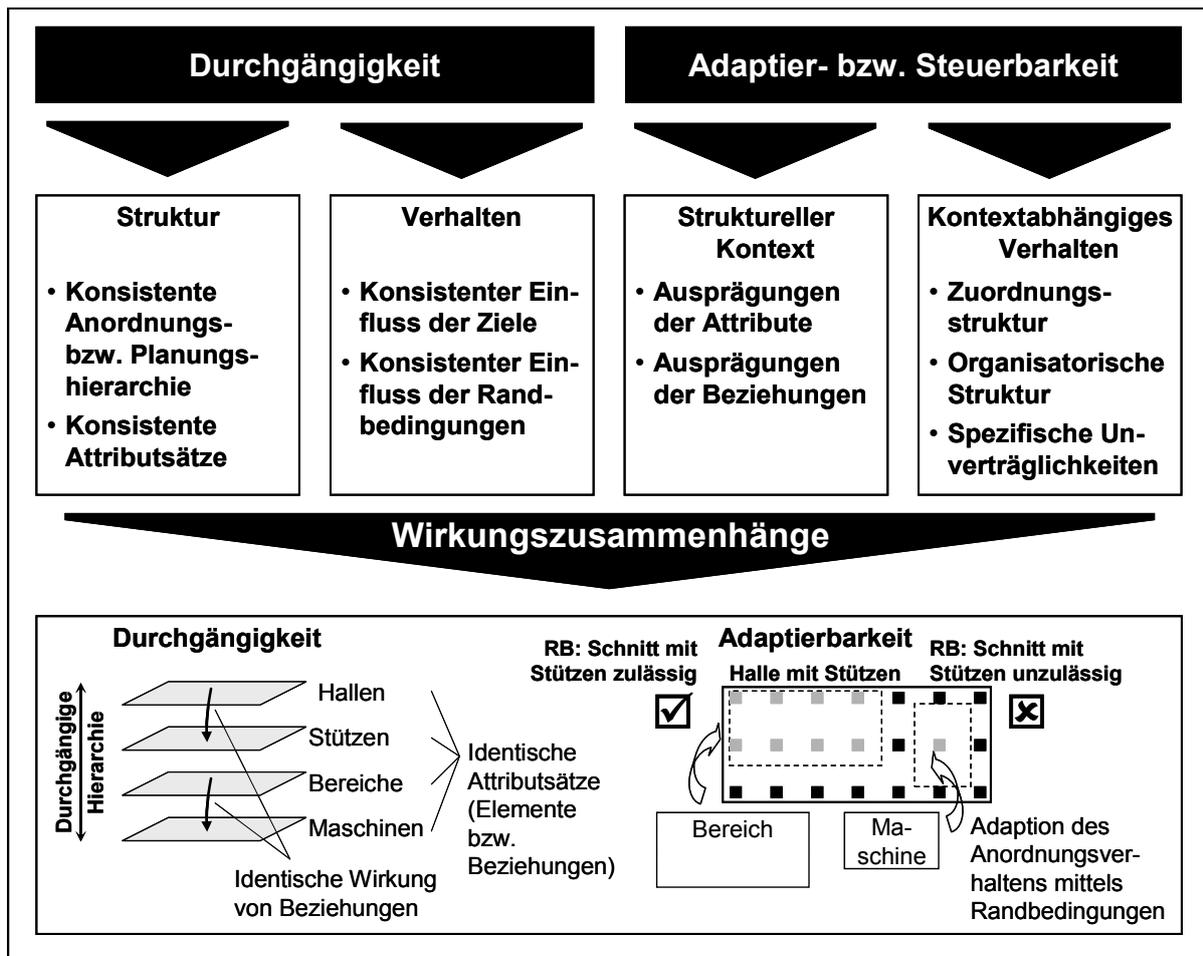


Abb. 7-5: Prägende Modellierungsaspekte der Logik des Anordnungsverhaltens

lierungsaspekte mehr oder weniger direkt aus den bereits in den vorigen Kapiteln beschriebenen Gegebenheiten der Modellierung und den an den entsprechenden Stellen gegebenen Erläuterungen resultieren, sollen hier im folgenden die Detailspekte hinsichtlich des **kontextabhängigen Anordnungshaltens** vertieft werden. Als Grundmuster lassen sich diesbezüglich drei verschiedene planerische Anforderungen unterscheiden:

- Realisierung übergeordneter Zuordnungsstrukturen
- Realisierung alternativer organisatorischer Strukturen
- Berücksichtigung planungsteilaufgabenspezifischer Unverträglichkeiten

Realisierung übergeordneter Zuordnungsstrukturen

Mit dieser Logik lässt sich die in den herkömmlichen Modellierungsverfahren anzutreffende, grundsätzliche Differenzierung in anzuordnende Flächenelemente und solche, die den Standortträger bzw. die Planungsgrundfläche abbilden [vgl. z. B. Drira

2006; Singh 2006; Liggett 2000; Meller 1996a], in analoger Form auf die mehrstufige und durchgängige Anordnungs- bzw. Planungshierarchie des verbesserten Verfahrens übertragen. Die Aktivierung dieses **Grundverhaltens** ist hier jedoch optional und nicht wie bei den bekannten Verfahren zwingend. Für sämtliche Elemente einer bestimmten Ebene der Anordnungshierarchie ist eine Anordnung somit lediglich dann zulässig, wenn diese vollständig innerhalb eines Elementes aus einer anderen, zugeordneten Ebene angeordnet werden. Sie bilden mit diesem dann also einen vollständigen Flächenschnitt. Mit welchem der Elemente der entsprechenden Ebene dabei eine Schnittsituation entsteht, ist ohne Bedeutung. So lassen sich beispielsweise Hallen lediglich innerhalb des verfügbaren Grundstücks, Bereiche lediglich innerhalb der Hallen und Maschinen lediglich innerhalb der Bereiche anordnen. Zu diesem Zwecke werden zwischen den Elementen der detaillierteren Ebene und denen der nächst höheren, d. h. der Ebene mit den weniger detaillierten Elementen, 2-dimensionale Randbedingungen in impliziter Form formuliert. Die Elemente der übergeordneten Ebene stellen mittels eines entsprechend gestalteten Attributes ein spezifisches Angebot bereit, das für die formulierten Bedarfe der Elemente der untergeordneten Ebene zwingend erfüllt sein muss. So kann beispielsweise für alle anzuordnenden Bereiche ein Bedarf »Halle« ausgeprägt werden, der vom Angebot »Halle« desselben Attributs der Hallen gedeckt sein muss. Gleichzeitig kann für die Bereiche ein Angebot »Bereich« definiert werden, das für die Anordnung von Maschinen in Form des ausgeprägten Bedarfs »Bereich« zwingend erforderlich ist.

Realisierung alternativer organisatorischer Strukturen

Mit dieser Logik lassen sich alternative organisatorische Strukturen [vgl. Bischoff 2001, S. 223-227; Wiendahl 2000, S. 47-54; Warnecke 1999, S. 9-66 3f; Aggteleky 1990a, S. 476-484] direkt im Rahmen der Anordnungsplanung erreichen. Einzige Voraussetzung ist dabei, dass die Kriterien, nach denen die alternativen Strukturen gebildet werden sollen, in entsprechenden freien Attributen bzw. deren Ausprägungen abgebildet werden. Über eine entsprechende Logik der zu diesen Attributen definierten 2-dimensionalen Randbedingungen in impliziter Formulierung lassen sich alternative strukturelle Zusammenfassungen realisieren. Für die zu strukturierenden Einheiten werden hinsichtlich der verschiedenen Attribute entsprechende Angebote ausgeprägt. Durch Ausprägung einer alternativen Bedarfsstruktur bzw. unterschiedlicher Bedarfe für die übergeordneten organisatorischen Einheiten entstehen die ver-

schiedenen Strukturalternativen. So können beispielsweise zu einem Maschinenpool die jeweils relevanten Technologien und die mit der Maschine bearbeiteten Produkte in Form von zwei freien Attributen bzw. deren spezifischen Ausprägungen hinterlegt werden. Anschließend lassen sich dann zwei alternative Strukturen bilden, indem die Maschinen in einem Falle zu einer funktionalen, im anderen Falle zu einer **produktbezogenen Struktur** zusammengefasst werden. In Abb. 7-6 ist ein entsprechendes Beispiel mit sechs Maschinen dargestellt. Bezüglich der Kombination aus Technologie und produziertem Produkt weist jede Maschine eine individuelle Nutzung auf. Zur Bildung der **funktionalen Struktur** ist eine Zusammenfassung der Maschinen entsprechend ihrer angebotenen Technologie erforderlich. Somit entsteht jeweils ein Bereich Dreherei, Fräserei und Schleiferei. Zur Bildung der Dreherei wird hinsichtlich des Attributes »Technologie« der Bedarf »Drehen« ausgeprägt, für die Fräserei »Fräsen« und die Schleiferei »Schleifen«. Eine Anordnung der verschiedenen Maschinen ist dann nur noch in der jeweils entsprechenden organisatorischen Einheit möglich. Bei Bildung der alternativen Struktur mit produktbezogener Zusammenfassung entstehen zwei Produktbereiche. Für den »Produktbereich 4711« wird hinsichtlich des Attributes »Produkt« der Bedarf »4711« ausgeprägt, für den »Produktbereich 4712« der Bedarf »4712«. Eine Anordnung der verschiedenen Maschinen ist dann nur noch in der jeweils entsprechenden organisatorischen Einheit möglich.

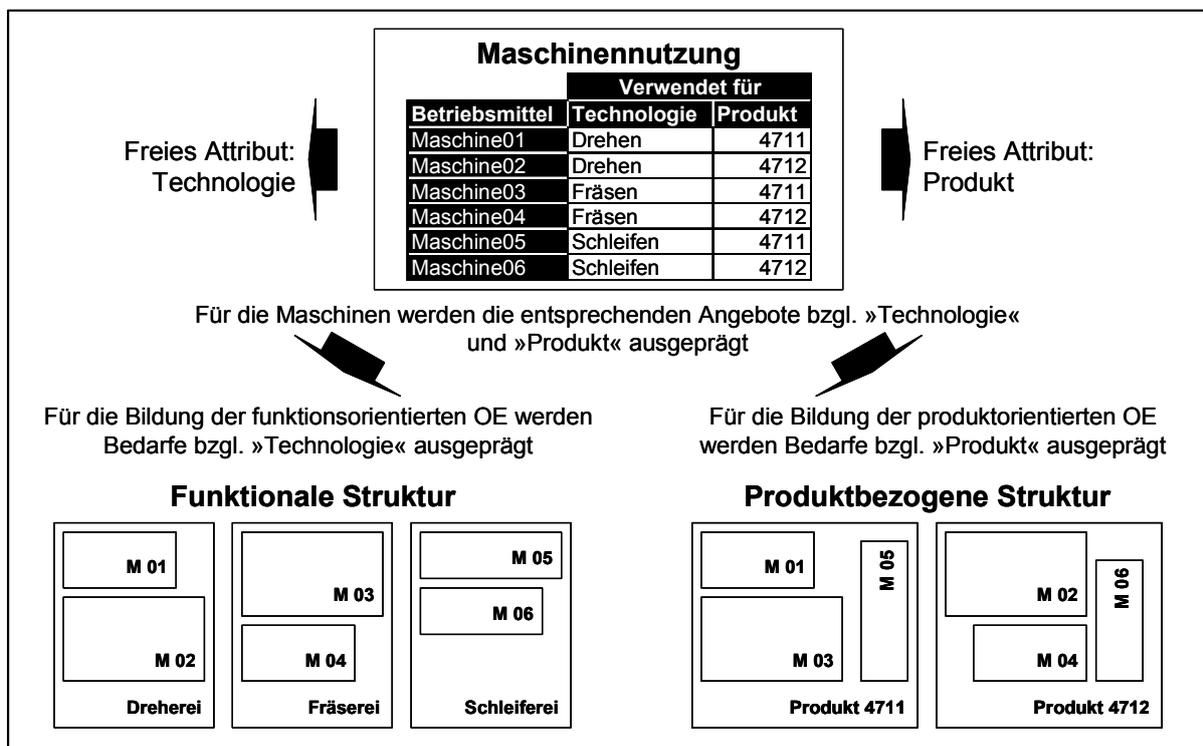


Abb. 7-6: Beispiel zur Bildung alternativer organisatorischer Strukturen

Berücksichtigung planungsteilaufgabenspezifischer Unverträglichkeiten

Bedarf hinsichtlich eines differenziert steuerbaren Anordnungsverhaltens kann auch aus spezifischen Anforderungen einzelner Teilaufgaben der Anordnungsplanung resultieren. Die Charakteristik des Anordnungsverhaltens wie sie für eine Teilaufgabe benötigt wird, kann für die nächste bereits zu Unverträglichkeiten führen. Ein solches Beispiel ist die bereits oben beschriebene differenzierte Handhabung eines Stützenrasters in Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Planungsteilaufgabe. Im Rahmen der Generalstrukturplanung, die normalerweise die Anordnung der verschiedenen Bereiche innerhalb der bestehenden oder geplanten Hallen zum Gegenstand hat, werden die Bereiche üblicherweise angeordnet, ohne das bestehende **Stützenraster** zu berücksichtigen. Man geht dabei davon aus, dass die konkrete Belegung der entsprechenden Fläche durch Maschinen und Arbeitsplätze im nächst detaillierteren Schritt so gestaltet wird, dass eine kollisionsfreie Detailanordnung gewährleistet ist. Während im Rahmen der Generalstrukturplanung somit die Überschneidung der Bereiche und der Stützen zulässig ist, ist dies für die Maschinenaufstellung nicht mehr der Fall. In dieser Phase ist ein Überschneiden zwischen zugeordneten Maschinen und den einzelnen Stützen nicht mehr zulässig. Dieses Verhalten lässt sich modellierungsseitig ebenfalls mittels 2-dimensionaler Beziehungen in impliziter Formulierung abbilden.

Hierzu wird beispielsweise mit einem freien Attribut »Stütze« in boolescher Logik ein Angebot »1« für die Flächenelemente ausgeprägt, mit denen Stützen abgebildet werden. Dagegen wird für Flächenelemente, die Bereiche abbilden, kein Bedarf hinsichtlich dieses Angebotes ausgeprägt. Somit gilt das Grundverhalten, nach dem Schnitte jederzeit zulässig sind. Für Flächenelemente, die Maschinen und Arbeitsplätze abbilden, wird dagegen ein entsprechender Bedarf »1« ausgeprägt. Bedarf und Angebot von Stützen bzw. Maschinen sind einander aufgrund der identischen Attributsausprägung zugeordnet. Zu beachten ist weiterhin allerdings noch, dass hier im Gegensatz zu den beiden vorigen Fällen dieses Kapitels eine divergierende Logik ausprägen ist, also ein Schnitt bei Stimmigkeit von Angebot und Bedarf unzulässig ist, während ein solcher in den beiden vorigen Fällen zwingend gefordert war. Die Unzulässigkeit hinsichtlich der Überschneidung wird dadurch erreicht, dass der zugeordnete zulässige Wertebereich für die Schnittfläche auf das geschlossene Intervall $[0,0]$ gesetzt wird. Dies entspricht einem zulässigen Bereich von »0« bis »0«. Eine resul-

tierende Schnittfläche zwischen diesen beiden unterschiedlichen Typen von Flächenelementen führt somit sofort zur Verletzung einer Randbedingung und der Unzulässigkeit der zugehörigen Anordnung.

In Abb. 7-7 sind die Spezifika der dem verbesserten Modellierungsverfahren zugrunde liegenden Logik des Anordnungsverhaltens und dessen prägender Modellierungsaspekte nochmals im **Überblick** dargestellt. Die Logik berücksichtigt in besonderer Weise die Anforderungen einer systematischen und durchgängigen Modellierung. Durch die entsprechende Ausgestaltung wird somit letztlich auch die Skalierbarkeit derselben gewährleistet.

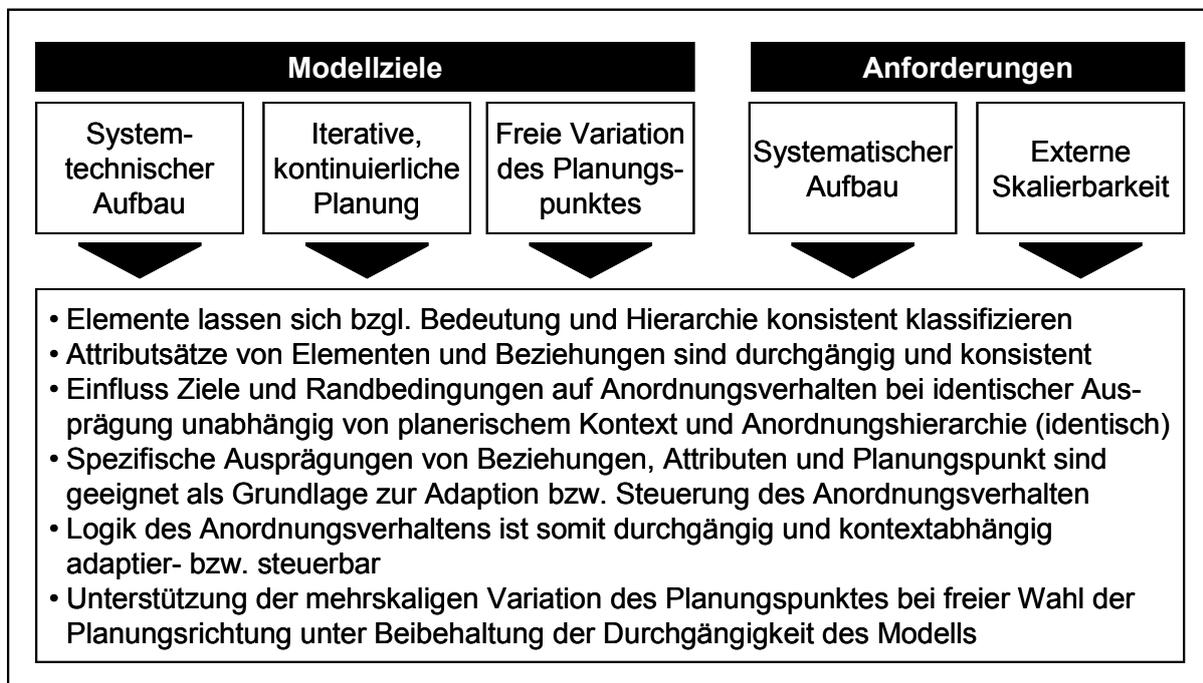


Abb. 7-7: Zusammenfassung der Logik des Anordnungsverhaltens und seiner prägenden Modellierungsaspekte

8 Ablauf des verbesserten Verfahrens zur Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung

Das verbesserte Modellierungsverfahren weist für die Planungsabläufe zwei wesentliche **Veränderungstreiber** auf. Zum ersten sind dies die durch die bereitgestellten Konstrukte und Logiken erweiterten Abbildungsmöglichkeiten. Somit werden zusätzliche, für die Wirtschaftlichkeit der Produktion wesentliche Umfänge des Beziehungssystems zwischen den flächenbehafteten Elementen einer Abbildung im Modell zugänglich gemacht. Zum zweiten resultieren nicht zuletzt aus den umfangreicheren Abbildungsmöglichkeiten weitergehende Potenziale bezüglich der Integration unterschiedlicher Planungssichten. Dies bezieht sich sowohl auf die Zusammenführung sämtlicher Sichten im Rahmen der Fabrikplanung generell als auch auf die Integration der anderen Sichten in die Aufgabe der Anordnungsplanung im speziellen.

Demzufolge beziehen sich auch die durch das verbesserte Verfahren getriebenen Veränderungen hinsichtlich einer verstärkt integriert, interdisziplinär, partizipativ und iterativ durchgeführten Planung auf zwei Aspekte des Planungsablaufs. Zunächst ist der übergeordnete Gesamtablauf der Planung innerhalb des gesamten Planungsnetzes betroffen, also der sogenannte **Makroablauf**. Darüber hinaus unterliegt jedoch auch der **Mikroablauf**, das heißt der Ablauf bei Durchführung der Anordnungsplanung im engeren Sinne, entsprechenden Veränderungen.

8.1 Makroablauf und Vorbereitung der Nutzung des Verfahrens

Die Anwendung des verbesserten Modellierungsverfahrens zum Zwecke der Anordnungsplanung ermöglicht insbesondere die für eine integrierte und interdisziplinäre Planung wesentliche, tiefer gehende Verankerung der Anordnungssicht innerhalb der vorgelagerten Schritte des übergeordneten Planungsablaufs. Dort entstehende Teilergebnisse lassen sich so frühzeitig aus dieser spezifischen Sicht heraus betrachten und interpretieren. So sind bereits zu frühen Zeitpunkten erste Entscheidungen hinsichtlich Integration der Ergebnisse in das anordnungsplanungsspezifische Teilmodell möglich. Mit Festlegung der zu übernehmenden Ergebnisse werden letztlich die im Rahmen der Anordnungsplanung aufrecht zu erhaltenden **Freiheitsgrade** definiert. Die übergeordneten Zusammenhänge des Planungsablaufs sind in Abb. 8-1 aufgezeigt. Man erkennt dort in der »Sicht Anordnungsplanung« jeweils die anord-

siert sind. Dies ist hinsichtlich der beschriebenen Charakteristik jedoch letztlich ohne wesentliche Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen in die Anordnungsplanung zu integrierenden Teilergebnissen vorgelagerter Planungsschritte und den resultierenden Freiheitsgraden sei anhand des im vorigen Kapitel in Abb. 7-6 dargestellten Beispiels verdeutlicht. Für die in der betrieblichen Praxis besonders relevante Integration von Strukturierung bzw. Prinzipplanung einerseits und Anordnungsplanung andererseits [vgl. Gäse 2006; Günther 2005; Warnecke 1999, S. 9-4] zeigt die Abbildung die definierte Aufrechterhaltung eines strukturellen Freiheitsgrades bis hinein in die Phase der Anordnungsplanung. Sowohl die funktionale wie auch die produktbezogene Struktur werden als Lösungen für die Anordnungsplanung zugelassen. Die mit der Anordnungsplanung betrachteten räumlichen Aspekte dienen somit als wesentliche Punkte für die Entscheidungsfindung hinsichtlich der zu realisierenden Struktur. Im Gegensatz dazu wäre dieser strukturelle Freiheitsgrad für die Phase der Anordnungsplanung eliminiert, wenn die Entscheidung zwischen funktionaler und produktbezogener Struktur bereits in der vorgelagerten Phase Strukturierung bzw. Prinzipplanung erfolgt und die entsprechende Struktur für die Phase der Anordnungsplanung als feste Randbedingung vordefiniert ist.

8.2 Mikroablauf zur Nutzung des Verfahrens

Die Veränderungen des Mikroablaufs, des Planungsprozesses innerhalb der Anordnungsplanungsaufgabe selbst, leiten sich im Wesentlichen aus drei Quellen ab:

- Erhöhte Bedeutung der Abbildung des Beziehungssystems der flächenbehafteten Elemente
- Erhöhte Bedeutung der Abgrenzung und Strukturierung des Untersuchungsbereichs aufgrund der aus der Skalierbarkeit resultierenden Freiheitsgrade
- Erhöhte Bedeutung des experimentellen Aspektes der Anordnungsplanung

Die Möglichkeiten einen erweiterten Umfang des **Beziehungssystems** der flächenbehafteten Elemente abzubilden, erhöht die Bedeutung sämtlicher dem eigentlichen Modellaufbau vorausgehenden Aktivitäten. Dies betrifft die ganzheitliche Analyse des Ist- bzw. geplanten Zustandes ebenso wie die Festlegung der Vorgaben und die Bereitstellung der Eingangsdaten für den Schritt der Anordnungsplanung.

Aufgrund der Skalierbarkeit des Modellierungsverfahrens sind die prinzipiellen Grenzen der Abbildung und des Abbildungsumfangs wesentlich erweitert. Um diese umfangreicheren Abbildungsmöglichkeiten entsprechend zielorientiert nutzen zu können und die Durchgängigkeit der Modells zu gewährleisten, ist auf die exakte Abgrenzung und die grundlegende Strukturierung des **Untersuchungsbereiches** sehr viel mehr Wert zu legen als bei den herkömmlichen Verfahren. Die Durchgängigkeit des Modells ist dabei nicht ausschließlich unter dem Aspekt der verwendeten Flächenelemente sicherzustellen, sondern gerade auch hinsichtlich des zugrunde liegenden Zielsystems und der Restriktionen.

Weiterhin beruht das Grundkonzept des verbesserten Verfahrens im Gegensatz zu den algorithmischen Ansätzen der meisten herkömmlichen Verfahren auf einer **experimentellen Optimierung** der Anordnung. Die Anordnungsplanung unterliegt somit den grundlegenden Einflüssen einer experimentellen Planung [vgl. Warnecke 1999, S. 9-29f] und weist in der Anwendung eine sehr ähnliche Charakteristik wie z. B. die Simulation auf [vgl. Grundig 2000, S. 201-205; Wiendahl 2000, S. 81; Jünemann 1999, S. 16-11f]. Obwohl die zur Optimierung eingesetzten Algorithmen der herkömmlichen Verfahren prinzipiell auch für das verbesserte Modellierungsverfahren anwendbar wären, ist aufgrund der vorhandenen Unterschiede in der Problemstruktur der experimentellen Optimierung der Vorzug zu geben. Diese beiden Aussagen sollen im Folgenden anhand einer Analogiebetrachtung der in den Verfahren realisierten Grundstrukturen bewiesen werden.

Die **Grundstrukturen der Modellierungen** von herkömmlichen und verbessertem Verfahren sind in großen Teilen identisch (Abb. 8-2). Die anzuordnenden Elemente

Grundstruktur der Modellierung	
Herkömmliche Verfahren	Verbessertes Verfahren
Anzuordnende Elemente	Flächenelemente
Standortträger	Flächenelemente
Zuordnungsstruktur (fixe Randbedingungen)	Zuordnungsstruktur (variable Randbedingungen)
Beziehungen zwischen anzuordnenden Flächen	Beziehungen zwischen Flächenelementen
Einfache Ziele in 1-D-Logik	Komplexe Ziele in 1-D-Logik
Einfache Randbedingungen in 2-D-Logik	Komplexe Randbedingungen mit durchgängiger Logik
Fazit: Identische Grundstruktur der Modellierung, d.h. bekannte Optimierungsverfahren sind grundsätzlich geeignet	

Abb. 8-2: Gegenüberstellung von herkömmlichen und verbessertem Verfahren hinsichtlich Grundstruktur der Modellierung

und der Standortträger finden im verbesserten Verfahren ihre Entsprechung in den Flächenelementen. Das Grundverhalten beider Konstrukte lässt sich in Form einer mehrstufigen Zuordnungsstruktur nachbilden. Die Grundcharakteristik hinsichtlich der Dimensionen des Beziehungssystems ist ähnlich, auch wenn das verbesserte Verfahren hinsichtlich Mächtigkeit und Systematik gegenüber diesen erheblich weiterentwickelt wurde. Aufgrund nahezu identischer Grundstrukturen der Modellierung lässt sich von der grundsätzlichen Eignung der bekannten Algorithmen zur Optimierung auch für das verbesserte Verfahren ausgehen.

Auf der anderen Seite verbleiben hinsichtlich der **Grundstrukturen des Lösungsraumes**, letztlich also der zugrunde liegenden Problemstruktur, jedoch erhebliche Unterschiede (Abb. 8-3). Während herkömmliche Verfahren eine stetige Charakteristik des Lösungsraumes aufweisen, führen die 2-dimensionalen Ziele und Randbedingungen des verbesserten Verfahrens zu unstetigem Grundcharakter des Lösungsraumes. So kann sich bereits bei infinitesimal kleiner Verschiebung eines Elementes der resultierende Nutzwert der Gesamtanordnung aufgrund der mit der Verschiebung erreichbaren Erfüllung eines 2-dimensionalen Zieles sprunghaft verändern oder durch einen Verstoß gegen eine Randbedingung sogar eine nicht zulässige Anordnung ergeben. Ein derartiges Verhalten ist bei Abbildung ausschließlich 1-dimensionaler Ziele ausgeschlossen. Weiterhin lässt sich bei herkömmlichen Verfahren die Suche nach der besten Anordnungsposition eines noch nicht angeordneten Flächenelementes auf die Randzone des bestehenden Anordnungskernes eingrenzen. Die Einschränkung auf 1-dimensionale Ziele mit konvergierender Logik führt für sämtliche weiter entfernten Anordnungspositionen zu jeweils schlechteren Zielwerten. Von dieser Charakteristik lässt sich beim verbesserten Verfahren aufgrund der Möglichkeit zur Definition von Zielen mit alternativen Dimensionen und divergierender Logik

Grundstruktur des Lösungsraumes	
Herkömmliche Verfahren	Verbessertes Verfahren
Lösungsraum ist im Grundcharakter stetig	Lösungsraum weist aufgrund 2-dimensionaler Ziele und Randbedingungen eher unstetigen Grundcharakter auf
Zulässige Anordnungspositionen in Randzone bestehender Anordnungskern	Zulässige Anordnungspositionen nicht auf Randzone bestehender Anordnungskern einschränkbar
Fazit: Unterschiedliche Grundstruktur des Lösungsraumes, d.h. Optimierungsverfahren sind nicht performant und bedürfen einer Anpassung an die veränderte Logik der Modellierung	

Abb. 8-3: Gegenüberstellung von herkömmlichen und verbessertem Verfahren hinsichtlich Grundstruktur des Lösungsraums

definitiv nicht ausgehen. Abschließendes **Fazit** der Überlegungen ist so einerseits die grundsätzliche Eignung bekannter Optimierungsalgorithmen, andererseits jedoch die fehlende Praktikabilität deren Anwendung aufgrund ihrer zu erwartenden mangelhaften Performance. Das verbesserte Verfahren geht daher solange von einer experimentellen Optimierung durch probeweises manuelles Anordnen aus, wie noch keine den veränderten Anforderungen angepassten Algorithmen zur Verfügung stehen.

Den durch die erläuterten Ursachen resultierenden **Gesamtablauf** der Anordnungsplanung im Kontext des verbesserten Verfahrens zeigt Abb. 8-4. Der Ablauf gliedert sich in vier übergeordnete, mehr oder weniger sequenziell ablaufende Schritte:

- Analyse Ist-Zustand und Vorgaben der Planung
- Bereitstellung der Planungsgrundlagen (Vorstufe des Modellaufbaus)
- Vorbereitung der Experimente
- Durchführung der Experimente

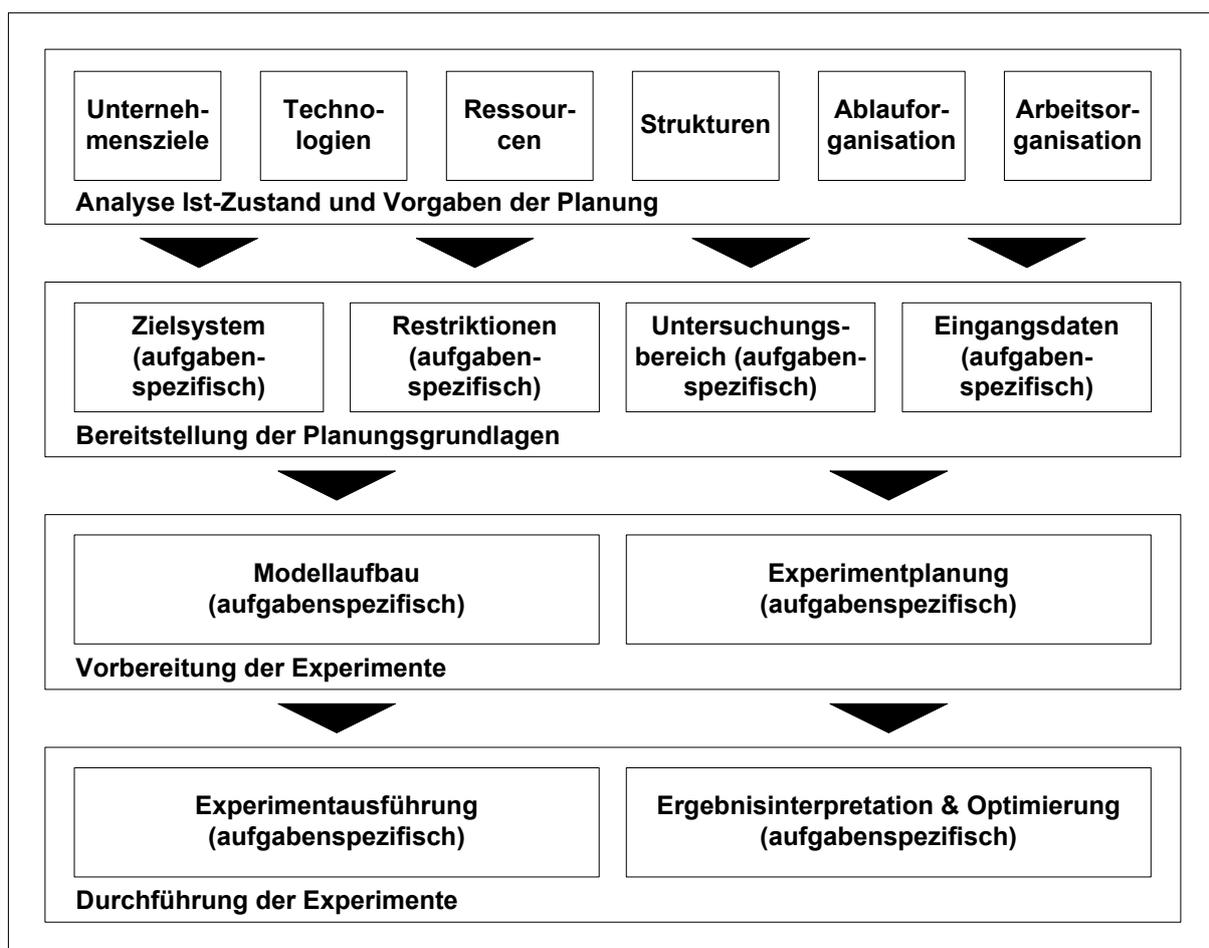


Abb. 8-4: Mikroablauf der Anordnungsplanung im Kontext des verbesserten Modellierungsverfahrens

Ein Schwerpunkt der **Analyse** [vgl. auch Jünemann 1999, S. 16-9f] sind aufgrund der Möglichkeiten des verbesserten Verfahrens vor allem die Unternehmensziele, die aufgrund erheblich vergrößerter Freiheitsgrade der Modellierung von Zielen in ein aufgabenspezifisches Zielsystem und letztlich einzelne Ziele in Form von Beziehungen zwischen Flächenelementen umzusetzen sind. Weiterer Analyseschwerpunkt ist die Betrachtung der verschiedenen Teilsysteme des Produktionsbetriebs unter der speziellen Zielsetzung, Zusammenhänge zu identifizieren, mit denen sich im Anschluss das Beziehungssystem zwischen den Flächenelementen beschreiben lässt. Dabei sind sowohl Zusammenhänge innerhalb als auch über die verschiedenen Teilsysteme hinweg relevant. Die Betrachtungen in dieser Phase können sich je nach Planungsaufgabe entweder auf einen real existierenden Zustand (Ist-Zustand) oder einen in den vorgelagerten Schritten ausgeplanten Zustand (Plan-Zustand) beziehen. Dieser Schritt bildet die Grundlage für die Definition sämtlicher **Planungsvorgaben**.

Die Phase der Bereitstellung der **Planungsgrundlagen** stellt die direkte Vorstufe des eigentlichen Modellaufbaus dar. Hier werden Analyseergebnisse aufgabenspezifisch aufbereitet und für den Modellaufbau bereitgestellt. Dies umfasst Ziele und Randbedingungen zu allen übrigen relevanten Aspekten des Beziehungssystems einerseits und die modellierungsrelevanten Elemente andererseits. Vor allem bei der Ausnutzung der Skalierbarkeit des Verfahrens in Form einer entsprechend großen Mächtigkeit des Modells ist aufgrund der resultierenden Komplexität besonderes Augenmerk auf die Abgrenzung und die aufgabenspezifische Strukturierung des Untersuchungsbereichs zu legen [vgl. auch Jünemann 1999, S. 16-10; Aggteleky 1990a, S. 588].

Die beiden anschließenden Phasen der Vorbereitung und Durchführung der Experimente bilden den eigentlichen Optimierungszyklus. Die **Experimentvorbereitung** umfasst den Modellaufbau, die eigentliche Modellierung. Hierbei wird das vorhandene bzw. geplante Realsystem mittels der vom verbesserten Verfahren bereitgestellten Modellierungskonstrukte abgebildet. Gleichzeitig wird die Bewertungslogik modelliert. In der Experimentplanung werden die durchzuführenden Einzelexperimente mit ihrer jeweiligen Zielsetzung definiert und in eine sinnvolle Reihenfolge gebracht. Intention ist es, durch Verfolgung unterschiedlicher Anordnungsstrategien und Ausplanung verschiedener, aufeinander abgestimmter Anordnungsvarianten systematisch zu einem Erkenntnisgewinn für die Gesamtanordnung zu kommen. Die Experi-

mentplanung steuert so den Ablauf der Einzelexperimente und versucht über Suchstrategien den vorhandenen Lösungsraum umfassend abzudecken. Sie gewährleistet eine formalisierte Experimentdurchführung [vgl. Jünemann 1999, S. 16-18f]. In den Szenarien lassen sich je nach Bedarf beispielsweise der Detaillierungsgrad der Planung im Sinne von Grob- und Feinplanung [vgl. Wirth 2000b, Kap. 3.2 und 3.3; Jünemann 1999, S. 16-10] oder der Umfang der zu berücksichtigenden Restriktionen im Sinne von Ideal- und Realplanung variieren [vgl. Wirth 2000b, Kap.2.2 und 2.3].

Die im Anschluss erfolgende **Experimentdurchführung** findet somit in zyklischer Form statt (Abb. 8-5) [vgl. Bischoff 2001, S. 238; Grundig 2000, S. 204]. Die aus der Experimentdurchführung resultierenden Ergebnisse werden vom Planungsteam interpretiert, d. h. entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und zugehörige Maßnahmen abgeleitet. Die Erkenntnisse können nach Bedarf entweder direkt wieder in das Modell bzw. weitere Experimente oder auch in die Experimentplanung einfließen. Dazu werden entweder das Modell, seine Parameter oder die weiterhin vorzusehenden Experimente variiert bzw. modifiziert oder ergänzt. Der beschriebene Zyklus kann dabei beliebig oft durchlaufen werden. Die aus den beschriebenen Einzelaspekten des verbesserten Verfahrens resultierenden Aufgabedetails, wie z. B. der zyklische Charakter der experimentellen Optimierung, sind in Anhang 13.5, in den übergeordneten Mikroablauf aus Abb. 8-4 eingeordnet, dargestellt.

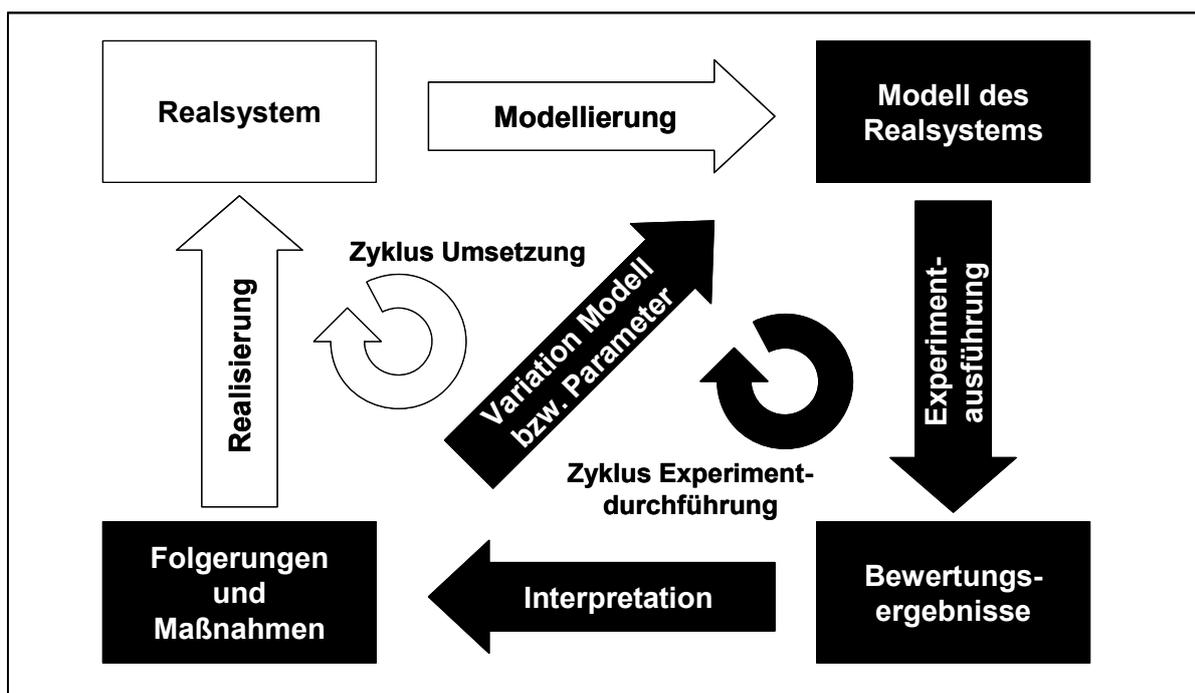


Abb. 8-5: Zyklus der experimentellen Optimierung bzw. Experimentdurchführung

9 Diskussion des verbesserten Verfahrens hinsichtlich der Erfahrungen seiner Anwendung in der industriellen Praxis

Das neu entwickelte Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung wurde zur Bestätigung seiner softwaretechnischen Realisierbarkeit, seiner Anwendbarkeit und seiner Leistungsfähigkeit als DV-gestützter Prototyp umgesetzt. Der **Nachweis der Verbesserung** für das Verfahren wird zweistufig geführt. Zunächst werden anhand von Testszenarien (Kapitel 9.1) die gegenüber herkömmlichen Verfahren vergrößerte Mächtigkeit und die verbesserten Abbildungsmöglichkeiten demonstriert. Diese sind Voraussetzung für die realitätsnähere und detailliertere Bewertung der interdisziplinären, partizipativen Planung. Die zweite Stufe führt darüber hinaus mit einem Anwendungsbeispiel (Kapitel 9.2) den Nachweis der Skalierbarkeit sowie der hieraus folgenden durchgängigen Unterstützung der beschriebenen, modifizierten Planungsabläufe. Den Abschluss der Diskussion bildet eine kritische Würdigung des verbesserten Verfahrens (Kapitel 9.3).

9.1 Erkenntnisse aus der Durchführung von Testszenarien

Ziel dieser Szenarienbetrachtung ist der Nachweis der vergrößerten Mächtigkeit des verbesserten Verfahrens, insbesondere der Komponente »Beziehungssystem«. Umfangreichere und detailliertere Abbildungsmöglichkeiten in diesem Bereich bilden die Grundvoraussetzung für die geforderte interdisziplinäre und partizipative Planungsdurchführung. Die interdisziplinäre Planung erfordert die Abbildung relevanter Aspekte zu v. a. drei wesentlichen, übergeordneten Teilsystemen des Produktionsbetriebs:

- Produktion inkl. Logistik
- Ausrüstungsseitige Infrastruktur (TGA)
- Bauliche Infrastruktur

Der **Abbildungsumfang** hinsichtlich dieser drei Teilsysteme ist im Wesentlichen den Möglichkeiten der Anordnungsbewertung unter besonderer Berücksichtigung der interdisziplinären Aspekte und Sichtweisen geschuldet. Die Möglichkeiten zur **Detaillierung der Bewertung** bedienen v. a. den partizipativen Planungsaspekt mit seinen hohen Anforderungen an den verstärkt operativen Charakter der zu modellierenden Ziele und Randbedingungen. Der Nachweis hinsichtlich verbesserter Abbildungs-

möglichkeiten des Beziehungssystems lässt sich anhand von Einzelfällen führen. Hierzu werden anordnungsrelevante Beziehungen möglichst vollumfänglich gesammelt (Abb. 9-1). Entscheidend sind entsprechend Kapitel 4 von den herkömmlichen Verfahren nicht abbildbare Beziehungen. In der anschließenden Szenarienbetrachtung wird aufgezeigt, in wiefern sich die zuvor gesammelten Beziehungen mit dem verbesserten Verfahren abbilden lassen. Ist dieser Nachweis für sämtliche Beziehungen möglich, auch und gerade für die mit den herkömmlichen Verfahren nicht abzubildenden Beziehungen, so lässt sich definitiv von der Verbesserung des neu entwickelten Verfahrens im Sinne eines größeren Abbildungsumfangs und erweiterter Bewertungsmöglichkeiten sowie dem daraus resultierenden Nutzen ausgehen. Der Nachweis zur Skalierbarkeit und durchgängigen Planungsunterstützung durch das Modellierungsverfahren wird im nächsten Kapitel mit einer vernetzten Sicht geführt.

Teilsysteme Beziehung	Ressource - Ressource	Ressource - In- Infrastruktur TGA	Ressource - In- Infrastruktur Bau	Infrastruk. TGA- Infrastruktur. TGA	Infrastruk. TGA- Infrastruktur. Bau	Infrastruk. Bau - Infrastruktur. Bau
Mehrmaschinen- bedienung	Gemeinsamer Bediener					
Erweiterungsfähigkeit			Ressource in Erweiter.bereich		TGA in Erweite- rungsbereich	
Einsehbarkeit	Transparenz Produktion		Transparente Struktur			
Orientierungen	Relative Orientierungen	Versorgungsbez. Orientierungen	Baubezogene Orientierungen			
Flussorientierung / Fließprinzip	Gerichtete Produktion					
Materialfluss	kurze Wege, Auf- kommen gering					
Medienfluss		Einfache Medienführung		Gestaltung Ver- sorgungsbereich	Gestaltung Ver- sorgungsbereich	
Ver- und Entsorgung	Einfache Ver- & Entsorgung	Anschlüsse Ver- & Entsorgung		Gestalt Ver-/Ent- sorgungsbereich	Gestalt Ver-/Ent- sorgungsbereich	
Personenfluss	Kurze Wege					
Informationsfluss	Einfache Steue- rung/Abstimmg.					
Sicherheitsabstände (Vorschriften)	Gefahren- vermeidung	Gefahren- vermeidung	Gefahren- vermeidung	Gefahren- vermeidung	Gefahren- vermeidung	Gefahren- vermeidung
Unverträglichkeiten/ Störungen (funktional und Vorschriften)	Ressourcen- einflüsse	Einflüsse der TGA	Bauliche Einflüsse		Wechselwirkun- gen zwischen TGA und Bau	Qualitative Unstimmigkeiten
Fluchtwege / Türen			Fluchtdistanzen			
Erschließung / Tore			Erschließungs- qualität			Erschließungs- qualität
Funktionale Fähigkei- ten / Ausstattungen	Technologien/ Funktionen	Spez. Produk- tionsbeding.	Spez. Produk- tionsbeding.			
Brandschutz			Brandabschnitte		Brandschutz- einrichtungen	
Fundamente			Maschinen- fundamente			
Stützen, Stützenraster			Behinderungen			
Organisatorische Einheiten	Strukturen/Prinzi- pien Aufbauorga.					
Arbeitsorganisation	Strukturen/Prinzi- pien Aufbauorga.					
Synergien	Konzentration Ressourcen	Konzentration Ressourcen	Konzentration Ressourcen		Konzentration der TGA	
Geschosse			Geschosszuord- nung Ressourcen			
Fixpunkte	Fixe Ressourcen			Fixe TGA- Einrichtungen		Fixe bauliche Einrichtungen

Abb. 9-1: Zusammenstellung anordnungsrelevanter Beziehungen

Eine Maximalübersicht der verschiedenen Arten von anordnungsrelevanten Beziehungen ist in Abb. 9-1 dargestellt. Die vertikal dargestellten Beziehungen sind dabei hinsichtlich der genannten Teilsysteme horizontal eingeordnet. Die Zusammenstellung bezieht sich auf vier unterschiedliche Quellen:

- Literatur zum Thema Fabrikplanung [vgl. Literatur Kapitel 3]
- Literatur zum Thema Anordnungsplanung [vgl. Literatur Kapitel 4]
- Durchgeführte Planungsprojekte mit Inhalten zu Fabrik- und Anordnungsplanung [vgl. IPA-FhG 2007a]
- Erfahrungen beim Einsatz von Werkzeugen zur Fabrik- und Anordnungsplanung [vgl. IPA-FhG 2007b]

Den Szenarien zum Nachweis der vollumfänglichen Modellierung der genannten Beziehungen mit dem verbesserten Verfahren wird jeweils ein thematischer Schwerpunkt zugrunde gelegt. Mit dieser Schwerpunktsetzung soll gleichzeitig aufgezeigt werden, wie sich die Beziehungen in ergänzender Weise integrieren lassen und so die komplette Abdeckung eines bestimmten Blickwinkels erlauben. Jedes Szenario adressiert dabei ein individuelles Profil hinsichtlich relevanter Beziehungsarten. Diese Profile werden nachfolgend in identischer Grundstruktur ausgehend von den zugehörigen, potenziell zu verfolgenden Zielen dargestellt. Zu den relevanten Beziehungen werden jeweils anwendbare Dimensionen und Typen referenziert.

Szenario »Produktionstechnische Sichtweise« (Abb. 9-2)

Die »Produktionstechnische Sichtweise« geht von den klassischen, vorwiegend qualitäts-, funktions- und technologiebezogenen Zielen der Produktion aus. Beziehungen

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Produktionstechnik	• Prozessqualität	Orientierungen	0-D	Randbedingungen, Ziele	Relativ zu anderen Ressourcen, Strömungen, Verläufen und baulichen Elementen
	• Prozessbeherrschung	Flussorientierung / Fließprinzip	0-, 1-D	Ziele, Randbedingungen	Gleiche Orientierung und Ausgang Vorgänger nahe beim Eingang Nachfolger
		Materialfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Konzentration bei identischem Bedarf hinsichtlich Materialart
	• Fähigkeitsbereitstellung	Medienfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Konzentration bei identischem Bedarf hinsichtlich Medien
	• Technologiebeherrschung	Unverträglichkeiten, Störungen (funktional, Vorschriften)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Maximale Distanzen bzw. Mindestabstände und Vermeidung unverträglicher Konzentrationen
	• Ausschussminimierung	Funktion. Fähigkeiten/ Ausstattungen	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Minimale Distanzen bzw. Maximalabstände und Erzielung förderlicher Konzentrationen
		Synergien	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Minimale Distanzen bzw. Maximalabstände und Erzielung förderlicher Konzentrationen
•					

Abb. 9-2: Abbildungsmöglichkeiten bei »Produktionstechnischer Sichtweise«

hinsichtlich spezifischer Orientierungen lassen sich v. a. durch 0-dimensionale Randbedingungen abbilden. Relative Orientierungen beziehen sich ebenso auf technische Ressourcen untereinander wie auch auf deren Orientierung innerhalb Strömungen (z. B. Luftströmungen), Verläufen (z. B. Temperatur- oder Sauberkeitsverläufe) oder hinsichtlich baulicher Elemente (z. B. Außenwände oder Fenster). Beziehungen hinsichtlich Fließprinzipien werden insbesondere mittels 1-dimensionaler Ziele umgesetzt, die den Ausgang des Vorgängers und den Eingang des Nachfolgers räumlich möglichst nahe zusammenführen. Ähnliches gilt für Material- und Medienfluss. Mittels 2-dimensionaler Ziele oder Randbedingungen lässt sich ein Nutzen durch Konzentration technischer Ressourcen mit gleichem Material- oder Medienbedarf modellieren. Produktionstechnische Unverträglichkeiten wie z. B. Erschütterungen, Lärm, Verschmutzungen oder andere Emissionen lassen sich mittels 2-dimensionaler Randbedingungen so abbilden, dass schädliche Zusammenführungen von Ressourcen vermieden werden. Umgekehrt lassen sich mit den gleichen Konstrukten Ressourcen zusammenführen, wenn hierdurch funktionale bzw. ausstattungsbezogene Vorteile oder sonstige Synergien erschlossen werden können.

Szenario »Logistische Sichtweise« (Abb. 9-3)

Die »Logistische Sichtweise« geht von den klassischen logistischen Zielgrößen wie Durchlaufzeit, Bestand, Flexibilitätszielen oder logistischem Aufwand aus. Eine gute Einsehbarkeit der Produktion, die transparente Strukturen erheblich unterstützt, wird

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Logistik	• Durchlaufzeiten	Einsehbarkeit	0-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Gleiche bzw. offene Ressourcenorientierung (relativ oder bzgl. baulicher Elemente) für Transparenz der Produktion bzw. Strukturen
	• Bestände	Flussorientierung/ Fließprinzip	0-, 1-D	Ziele, Randbedingungen	Gleiche Orientierung und Ausgang Vorgänger nahe beim Eingang Nachfolger
	• Logistische Aufwände	Materialfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Konzentration bei identischem Bedarf hinsichtlich Materialart
	• Reaktionsfähigkeit/Flexibilität	Medienfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Konzentration bei identischem Bedarf hinsichtlich Medien
	• Anpassungsfähigkeit	Ver- und Entsorgung	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Distanz zu Anschlüssen und Ver-/ Entsorgungseinheiten sowie Konzentration von Ressourcen mit gleichen Anforderungen
	•	Personenfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Min. Wege Personenaustausch, Konzentration ähnliche/komplementäre Qualifikation
		Informationsfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege für Informationsaustausch bzw. Abstimmungen und Konzentration für z. B. vereinfachte Steuerung
		Erschließung/ Tore	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Distanzen zu Toren, der Tore untereinander und "Einzugsbereich" je Tor
		Geschosse	2-D	Randbedingungen, Ziele	Zuweisung von Ressourcen zu Geschossen aufgrund logistischer Anforderungen

Abb. 9-3: Abbildungsmöglichkeiten bei »Logistischer Sichtweise«

vorwiegend mittels 0-dimensionaler Randbedingungen modelliert. Diese erzwingen z. B. einheitliche Orientierungen von Ressourcen. Beziehungen hinsichtlich der logistisch relevanten Anforderungen einer Flussorientierung bzw. eines Fließprinzips sowie von Material- und Medienfluss werden vergleichbar gehandhabt, wie bereits bei der produktionstechnischen Sichtweise beschrieben. Unter logistischen Aspekten sind ferner die Ver- und Entsorgung sowie Flüsse von Personen und Information relevant. Mittels 1-dimensionaler Ziele werden Distanzen zu Anschlüssen, Bahnhöfen oder Einheiten der Ver- und Entsorgungslogistik beeinflusst. Zu konzentrierende Ressourcen gleichartiger Anforderungen an Ver- und Entsorgung lassen sich mittels 2-dimensionaler Ziele oder Randbedingungen abbilden. Personen- und Informationsflüsse werden mit 1-dimensionalen Zielen, Aspekte die für eine räumliche Konzentration sprechen, durch 2-dimensionale Ziele oder Randbedingungen modelliert. Das Personal betreffend kann dies einen vereinfachten Austausch, verbesserte Abstimmungsprozesse oder die Konzentration ähnlicher oder komplementärer Qualifikationen bewirken. Bezüglich der Information ist der Hauptnutzen in einer verbesserten Abstimmung und einer vereinfachten Steuerung zu sehen.

Szenario »Organisatorische Sichtweise« (Abb. 9-4)

Die »Organisatorische Sichtweise« geht von den klassischen organisatorischen Zielgrößen zu bildender Organisationseinheiten aus, wie z. B. homogene Ziele, überschaubare Komplexität, organisatorischer Aufwand und Produktivität, Flexibilität und

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Organisation	• Zielhomogenität	Einsehbarkeit	0-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Gleiche bzw. offene Ressourcenorientierung (relativ oder bzgl. baulicher Elemente) für Transparenz der Produktion bzw. Strukturen
	• Komplexitätsreduktion	Flussorientierung/ Fließprinzip	0-, 1-D	Ziele, Randbedingungen	Gleiche Orientierung und Ausgang Vorgänger nahe beim Eingang Nachfolger
		Personenfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Min.Wege Personenaustausch, Konzentration ähnliche/komplementäre Qualifikation
	• Organisatorische Aufwände	Informationsfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege für Informationsaustausch bzw. Abstimmungen und Konzentration für z. B. vereinfachte Steuerung
		Reaktionsfähigkeit/Flexibilität	Unverträglichkeiten, Störungen (funktional, Vorschriften)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele
	• Prozessqualität	Funktion. Fähigkeiten/Ausstattungen	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Minimale Distanzen bzw. Maximalabstände und Erzielung förderlicher Konzentrationen
		• Produktivität	Organisatorische Einheiten	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele
	•		Arbeitsorganisation	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele
			Synergien	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele

Abb. 9-4: Abbildungsmöglichkeiten bei »Organisatorischer Sichtweise«

Qualität der organisatorischen Prozesse. Diese Ziele unterstützende Aspekte werden mittels Beziehungen hinsichtlich der Einsehbarkeit, der Flussorientierung sowie von Personen- und Informationsfluss beeinflusst und unterliegen ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie bereits in den oben beschriebenen Szenarien dargestellt. Für die organisatorische Strukturierung sind v. a. Beziehungen hinsichtlich Unverträglichkeiten, funktionalen Fähigkeiten, organisatorischen Zusammenfassungen und Synergien sowie hinsichtlich arbeitsorganisatorischer Aspekte von Bedeutung. Insbesondere 2-dimensionale Randbedingungen können der Abbildung unterschiedlichster Zusammenhänge dienen, die sich anschließend beispielsweise zur Bildung alternativer Strukturen bzw. Segmente sowie deren räumlich-organisatorischer Umsetzung nutzen lassen. In Frage kommende Aspekte können sich hierbei z. B. auf zugeordnete Produkte und deren Charakteristika, die relevanten Märkte und deren spezifische Erfolgsfaktoren oder auch auf produktionsbezogene Aspekte wie Technologien, Ablaufschritte, Produktionsanlagen oder eingesetztes Personal beziehen. Mit 1- oder 2-dimensionalen Zielen lassen sich Aspekte der Zusammenfassung wie Synergien oder anderen Vorteile, jedoch auch Negativpunkte und Nachteile abbilden und bewerten. 1-dimensionale Randbedingungen machen Anforderungen wie z. B. maximal zulässige Entfernungen der einem Verantwortungsbereich zugeordneten oder gemeinsam genutzten Ressourcen der Planung zugänglich.

Szenario »Arbeitsorganisatorische Sichtweise« (Abb. 9-5)

Die für die »Arbeitsorganisatorische Sichtweise« relevanten Abbildungsmöglichkeiten von Beziehungen sind ähnlich wie die organisatorischen. Sie gehen von den klassischen arbeitsorganisatorischen Zielen aus, wie z. B. geschlossener Komplettverantwortung, klaren Aufgabenfestlegungen und -zuordnungen, Personaleinsatzflexibilität,

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Arbeitsorganisation	<ul style="list-style-type: none"> • Komplettverantwortung • Personaleffizienz • Personaleinsatzflexibilität • Reaktionsfähigkeit/Flexibilität • Selbstorganisation • Prozessüberwachung • 	Mehrmaschinenbedienung	0-, 1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Gleiche bzw. definierte Ausrichtung und benachbarte bzw. zusammengefasste Anordnung definierter Ressourcen
		Personenfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Transparenz bzgl. Personenaustausch, Konzentration ähnliche/komplementäre Qualifikationen
		Organisatorische Einheiten	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Minimale Distanzen bzw. Maximalabstände und Erzielung förderlicher Konzentrationen
		Arbeitsorganisation	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Minimale Distanzen bzw. Maximalabstände und Erzielung förderlicher Konzentrationen

Abb. 9-5: Abbildungsmöglichkeiten bei »Arbeitsorganisatorischer Sichtweise«

Selbstorganisation bezüglich Arbeitsaufgabe und -ergebnis. Mittels 0- und 1-dimensionalen Zielen und Randbedingungen lassen sich Aspekte der Mehrmaschinenbedienung und des flexiblen Personaleinsatzes abbilden. Anforderungen bezüglich der Konzentration von Ressourcen, Aufgabenbereichen oder organisatorischen Einheiten im Sinne einer Kompletverantwortung werden z. B. mit 2-dimensionalen Randbedingungen modelliert. Die Handhabung der Beziehungen bezüglich des Personenflusses, der organisatorischen Einheiten und Arbeitsorganisation entspricht abgesehen von Anwendung und Interpretation aus dem arbeitsorganisatorischen Kontext heraus im Wesentlichen derjenigen des Szenarios »Organisatorische Sichtweise«.

Szenario »Infrastrukturbezogene Sichtweise« (Abb. 9-6)

Die »Infrastrukturbezogene Sichtweise« geht von den klassischen gebäude- und TGA-bezogenen Zielen aus, wie z. B. einer adäquaten Nutzung von Gebäuden und Flächen bzw. deren Qualitäten, den erforderlichen Investitionen in bauliche Maßnahmen und TGA sowie Flexibilität in Nutzung und Erweiterung. Der Aspekt der Erweiterungsfähigkeit findet in Form meist 2-dimensionaler Randbedingungen bei der Abbildung Berücksichtigung, so dass sich erweiterungsrelevante Ressourcen und Einrichtungen möglichst in erweiterungsfähigen Bereichen konzentrieren lassen. Über die bereits erläuterten Aspekte der Beziehungen Medienfluss und Ver- bzw. Entsorgung hinaus dienen 1- und 2-dimensionale Ziele einer Abbildung wesentlicher

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Infrastruktur	• Angemessene Gebäudenutzung	Erweiterungsfähigkeit	2-D	Randbedingungen, Ziele	Konzentration relevanter Ressourcen und Einrichtungen in geeigneten Bereichen
		Medienfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege und Konzentration bei identischem Bedarf hinsichtlich Medien
	• Angemessene Flächennutzung	Ver- und Entsorgung	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Distanz zu Anschlüssen und Ver-/ Entsorgungseinheiten, Konzentration von Ressourcen gleicher Anforderungen
		Unverträglichkeiten, Störungen (funktional, Vorschriften)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Maximale Distanzen bzw. Mindestabstände und Vermeidung unverträglicher Konzentrationen und Anordnungen
	• Baulicher Invest	Brandschutz	2-D	Randbedingungen, Ziele	Konzentration relevanter Ressourcen und Einrichtungen in geeigneten Bereichen
	• Invest TGA	Fundamente	2-D	Randbedingungen, Ziele	Konzentration fundamenterelevanter Ressourcen und Einrichtungen in geeigneten Bereichen und Fixierungen
		Stützen(-raster)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Einhaltung Mindest- / Sicherheitsabstände sowie Vermeidung Anordnungskollisionen
	• Erweiterungsflexibilität	Geschosse	2-D	Randbedingungen, Ziele	Zuweisung Ressourcen / Einrichtungen zu Geschossen aufgrd. spez. Anforderungen
	• Anpassungsfähigkeit	Fixpunkte	2-D	Randbedingungen, Ziele	Fixierung nicht oder schwierig umziehbarer Ressourcen und Einrichtungen sowie Bewertung des Umzugsaufwands
	•				

Abb. 9-6: Abbildungsmöglichkeiten bei »Infrastrukturbezogener Sichtweise«

Kosten bestimmender Anforderungen hinsichtlich der Anordnung der entsprechenden Versorgungseinrichtungen. Die Modellierung von Unverträglichkeiten repräsentierenden 1- und 2-dimensionalen Beziehungen dient der Vermeidung qualitativer Widersprüche in der Flächenbelegung. Dies können beispielsweise klimatisierte Zonen in Bereichen starker Sonneneinstrahlung, z. B. in Fensternähe, oder Konvektionsheizungen in zugigen Bereichen sein, für die Strahlungsheizungen zu priorisieren sind. Hinsichtlich Brandschutz und Fundamenten bilden 2-dimensionale Randbedingungen die Grundlage zur Konzentration von Ressourcen und Einrichtungen in geeigneten Bereichen. Mit 2-dimensionalen Randbedingungen lassen sich nicht verschiebbare Fixpunkte definieren. Mit 1-dimensionalen Zielen werden relevante Umzugsaufwände in Ansatz gebracht, falls schwierig umzuziehende Einheiten aus zwingenden Gründen doch an anderer Stelle angeordnet werden müssen. Mit Modellierung 2-dimensionaler Randbedingungen lassen sich, falls sinnvoll und gewünscht, Anordnungskollisionen zwischen allen Arten von Einrichtungen und baulichen Konstruktionselementen, wie z. B. Stützen, berücksichtigen bzw. verhindern. Sicherheitsabstände zu Stützen lassen sich mittels 1-dimensionaler Randbedingungen repräsentieren. Mit 2-dimensionalen Randbedingungen oder Zielen werden bei Bedarf bestimmte Ressourcen und Einrichtungen an spezifische Geschosse gebunden respektive die Vor- bzw. Nachteile einer entsprechenden Stockwerkszuordnung bewertet.

Szenario »Sicherheitsbezogene Sichtweise« (Abb. 9-7)

Die »Sicherheitsbezogene Sichtweise« geht von sicherheitsrelevanten Zielen aus, wie z. B. Einhaltung einschlägiger Vorschriften, Abwendung oder antizipierende Vorbereitung von Unglücksfällen sowie sicherheitsrelevante Investitionen. Mit 1-dimensionalen Randbedingungen lassen sich die in Vorschriften geforderten Sicherheitsabstände abbilden, z. B. minimale Durchgangsbreiten, Abstände baulicher Elemente von Verkehrswegen etc. [vgl. ArbStätt 1988]. Mit 1- und 2-dimensionalen Randbe-

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung einschlägiger Vorschriften • Vorkehrungen für Unglücksfälle • Investitionen • 	Sicherheitsabstände	1-D	Randbedingungen	Minimale Durchgangsbreiten, Einhaltung min. Abstände (z.B. Sicherheitsabstände)
		Unverträglichkeiten, Störungen (funktional, Vorschriften)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Max. Distanzen bzw. Mindestabstände und Vermeidung unverträglicher Konzentrationen und Anordnungen
		Fluchtwege / Türen	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Maximale Distanzen von Arbeitsplätzen zu Türen / Toren und deren Einzugsbereichen
		Brandschutz	2-D	Randbedingungen, Ziele	Konzentration relevanter Ressourcen und Einrichtungen in geeigneten Bereichen

Abb. 9-7: Abbildungsmöglichkeiten bei »Sicherheitsbezogener Sichtweise«

dingungen werden sicherheitskritische Unverträglichkeiten abgebildet, wie z. B. zwischen Farblager bzw. Lackierungen und Schweißbereichen. Mittels 1-dimensionaler Randbedingungen können maximale Distanzen zwischen Arbeitsplätzen und Türen bzw. Toren modelliert werden. Anforderungen bezüglich Konzentration und Anordnung brandschutzrelevanter Ressourcen bzw. Einrichtungen in geschützten Bereichen lassen sich mit 2-dimensionalen Randbedingungen repräsentieren.

Szenario »Ästhetikbezogene Sichtweise« (Abb. 9-8)

Die »Ästhetikbezogene Sichtweise« geht von gestalterischen Zielen der Produktion und Fabrik aus, wie z. B. Anmutung, Erscheinungsbild, Transparenz, Umweltverträglichkeit und ästhetikbasierte Investitionen. Mit 0- und 2-dimensionalen Randbedingungen lassen sich Beziehungen definieren, die offene, transparente Strukturen und gerichtete Anordnungen gewährleisten. Durch 0-, 1- und 2-dimensionale Ziele lassen sich Beziehungen modellieren, die Flussorientierungen und materialflussbezogene Zusammenhänge abbilden. Mit 1-dimensionalen Randbedingungen lassen sich alle Formen von Mindest- bzw. Minimalabständen erreichen, die eine aufgelockerte und transparente Anordnung sicherstellen. Durch 1- und 2-dimensionale Ziele und vor allem Randbedingungen hinsichtlich Stützenraster, organisatorischen Einheiten und Arbeitsorganisation lassen sich Anordnungen generieren, die stützenrasteradäquate Anordnungen bzw. Mindestabstände aufweisen, die die gewählten Organisationsprinzipien in der räumlichen Struktur widerspiegeln sowie auf eine ansprechende Arbeitsgestaltung und eine ergonomische Auslegung der Arbeitsplätze abzielen.

Szenario	Ziele (Beispiele)	Schwerpunkte Beziehungen	Dim. Beziehung	Typ Beziehung	Anmerkungen
Ästhetik	• Anmutung	Einhelligkeit	0-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Offene bzw. gerichtete Orientierung der Ressourcen, transparente Strukturen
	• Erscheinungsbild	Orientierungen	0-D	Randbedingungen, Ziele	Ausgerichtete Ressourcen, ausgerichtete bauliche Elemente
	• Transparenz	Flussorientierung/ Fließprinzip	0-, 1-D	Ziele, Randbedingungen	Transparenz durch gleiche Orientierung und Ausgang Vorgänger nahe beim Eingang Nachfolger
	• Umweltverträglichkeit	Materialfluss	1-, 2-D	Ziele, Randbedingungen	Minimale Wege, eindeutige Fließrichtungen, Konzentration bei inhaltlicher Ähnlichkeit
	• Investitionen	Sicherheitsabstände	1-D	Randbedingungen	Minimale Durchgangsbreiten und Abstände (aufgelockerte, transparente Anordnung)
	•	Stützen(-raster)	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Einhaltung Mindestabstände, gegebenem Stützenraster angemessene Anordnung
		Organisatorische Einheiten	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Widerspiegelung bzw. Abbildung der Organisation in der räumlichen Struktur
		Arbeitsorganisation	1-, 2-D	Randbedingungen, Ziele	Ansprechende Arbeitsgestaltung und ergonomische Auslegung der Arbeitsplätze

Abb. 9-8: Abbildungsmöglichkeiten bei »Ästhetikbezogener Sichtweise«

Mit den anhand der verschiedenen Szenarien demonstrierten, vollumfänglichen Abbildungs- bzw. den erweiterten Bewertungsmöglichkeiten des verbesserten Verfahrens konnte die vergrößerte Mächtigkeit der Modellierung in der Praxisanwendung nachgewiesen werden. Dies impliziert gleichzeitig direkt eine erheblich verbesserte Ausgangsbasis für die in der Praxis geforderte, verstärkt interdisziplinäre und partizipative Planungsdurchführung bei Einsatz des neuen Modellierungsverfahrens. Das detaillierte Profil der unterschiedlichen behandelten Testszenarien ist in Anhang 13.6 mit den jeweils tangierten Beziehungsarten noch einmal im Überblick dargestellt.

9.2 Erkenntnisse aus der Durchführung eines Anwendungsbeispiels

In diesem Kapitel wird anhand eines Anwendungsbeispiels aus der betrieblichen Praxis der Nachweis für die Skalierbarkeit des verbesserten Verfahrens und die hierdurch mögliche, durchgängige Unterstützung der Planung geführt. Die Durchgängigkeit der Unterstützung soll dabei insbesondere im Kontext mehrerer unterschiedlicher Teilaufgaben der Planung gezeigt werden. Die Teilaufgaben betreffen jeweils verschiedene Planungsebenen innerhalb der Anordnungshierarchie.

Im Rahmen eines in mehreren Stufen durchgeführten Projektes bei einem **mittelständischen Maschinenhersteller** wurde ausgehend von der strategischen Positionierung des Unternehmens und den zukünftig zu erwartenden, veränderten Anforderungen zunächst eine neue **Generalstruktur** zur umfassenden Neuordnung des zentralen Produktionsstandorts ausgestaltet. Wesentlicher Punkt dieser Planung war die Entwicklung einer neuen, zukunftsgerichteten Anordnung. Im Rahmen der gesamten planerischen Aufgabe wurden auch bereits erste Überlegungen hinsichtlich Weiterentwicklungen von im Planungsnetz benachbarten Aspekten wie beispielsweise Organisation und Gebäudestruktur angestellt. Das entwickelte, übergeordnete Gesamtkonzept wurde anschließend in verschiedenen detaillierenden Planungsschritten weiter ausgestaltet. Das Vorgehen dieser **Detailplanungsschritte** war geprägt von regelmäßigen Iterationen hinsichtlich der Ergebnisse der Generalstrukturplanung. Motivation im Rahmen dieser iterativen Betrachtungen war sowohl die Absicherung von zunächst auf gröberer Ebene getroffenen Entscheidungen als auch eine entsprechende Anpassung bereits vorliegender Ergebnisse an sich aus der Detailplanung neu ergebende Anforderungen. Die Generalstrukturplanung mit ihrem vor allem stra-

tegisch-taktischen Hintergrund deckte dabei schwerpunktmäßig die Phase der Konzeptplanung ab, die Detailplanung mit verstärkt taktisch-operativer Ausrichtung dagegen bildete den Übergang von der Struktur- bzw. Konzeptplanung zur Systemplanung [vgl. Günther 2005, S. 7; Schulte 2001, S. 26, 83f].

Das gefertigte **Produktspektrum** gliedert sich in die Segmente Standardmaschinen klein und groß, Maschinen mit fluss- bzw. nichtflussrelevanten Anpassungen, Peripheriegeräte sowie komplexe Anlagen (siehe Abb. 9-9). Anlagen beinhalten wiederum Maschinen und Peripheriegeräte. Dazu kommt der Bereich Handelsware. **Zielsetzung** der Planung war v. a. die Weiterentwicklung der gewachsenen Struktur bei gleichzeitiger konsequenter Ausrichtung auf zukünftige Anforderungen und das erwartete Volumenwachstum. Resultierende Ziele von wesentlicher Bedeutung waren insbesondere die Umgestaltung der Montage, eine adäquate Nutzung der Bausubstanz inklusive Vorschläge für das Ersetzen nicht mehr sinnvoll nutzbarer Gebäude sowie die Konzentration der Energieversorgung in Form einer Energiezentrale.

Grundlage der gesamten Planung sollte die definierte **strategische Positionierung** des Unternehmens sein. Aus dieser waren die jeweiligen Teilziele der einzelnen Planungsaufgaben systematisch abzuleiten. Als Weltmarktführer positioniert man sich sehr nahe zu seinen Kunden und offeriert diesen maßgeschneiderte Problemlösungen. Operative Strategie zur Umsetzung ist insbesondere die Stärkung des Integrations- und Anlagengeschäftes. Produktseitig bedingt dies eine steigende Komplexität der Maschinen mit resultierender großer Variantenbreite und ein erwartetes Wachstum vorwiegend innerhalb der Segmente der komplexen Anlagen und der darin ver-



Abb. 9-9: Produktbeispiel komplexe Anlage

bauten Peripheriegeräte. Für die Abwicklung der Kundenaufträge inklusive der Produktion erfordert dies ein hohes Maß an Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Prozesse. Für die Planung folgern daraus abgeleitete Ziele wie ein leistungsfähiger unterstützender Informationsfluss, offene und transparente Strukturen, flexible Prozesse in überschaubaren Segmenten, kurze Durchlaufzeiten durch konsequentes Fließprinzip, leistungsfähige Logistikstrukturen zur Gewährleistung marktfähiger Preise sowie Möglichkeiten einer zielgerichteten Erweiterung der Produktion. Input für die Planung war eine auf Basis dieser Positionierung prognostizierte, auf die einzelnen Produktsegmente herunter gebrochene, zukünftig erwartete Mengenentwicklung.

Als erster Schritt im Rahmen der Planung wurde eine sämtliche relevante Teilaspekte umfassende **Analyse** durchgeführt. Diese hatte sowohl die Erfassung des Ist-Zustandes wie auch die Aufbereitung der benötigten Planungsgrundlagen zum Gegenstand. Dabei zeigten sich gerade hinsichtlich dieser Grundlagen erheblich gestiegene Anforderungen im Kontext einer kontinuierlichen Planung mit erweiterten Abbildungsmöglichkeiten der Modellierung und der hieraus resultierenden Erhöhung der Anzahl zu betrachtender Varianten und Szenarien. Ohne Verfügbarkeit entsprechender DV-Systeme zum Generieren bzw. Halten sowie von Werkzeugen zum Aufbereiten der Daten des Produktionsbetriebs können die neuen Möglichkeiten verbesserter Modellierungsverfahren lediglich unvollkommen genutzt werden. Für das Flusssystem »Material« wurden als Grundlage der Generalstrukturplanung die Austauschbeziehungen der verschiedenen Einheiten des Produktionsbetriebs ermittelt und quantifiziert. Abb. 9-10 zeigt schematisch den Belegungsgrad der entsprechende Materialflussmatrix. Er beträgt knapp 15% bzw. 17% der möglichen Flüsse, in Abhängig davon, ob lediglich Materialflüsse aufweisende oder sämtliche Einheiten zugrunde gelegt werden. Die zugehörige quantifizierte Matrix findet sich in Anhang 13.7. Die Langbezeichnungen für die in den beiden Darstellungen mit Kurznamen belegten Einheiten bzw. Flächenelemente sind in Anhang 13.8 aufgeführt. Die Beziehungen beinhalten neben den verschiedenen produktbezogenen Materialien auch die Flüsse von Werkzeugen, Vorrichtungen, Prüfmitteln, Hilfsstoffen sowie der Ver- und Entsorgung. Auf Basis der Analyseergebnisse erfolgte anschließend die für diesen Planungsschritt erforderliche erste grobe **Dimensionierung** der verschiedenen Teilsysteme.

OE-Kürzel \ OE-Kürzel	BGM Maschine	BGM Peripherie	B_BGM Maschine	B_BGM Peripherie	B_EM Maschine	B_EM Peripherie	B_Teilefertigung	Blechbearbeitung	Elektrofertigung	EM Anlagen	EM Maschinen	EM Peripherie	Ersatzteillager	Ersatzteilversand	Gruppenfertigung	Kleinteilelager	Kommissionen BGM	Kommissionen EM	Lackierung	Maschinenversand	Palettenlager	Rohmateriallager	Sägen	Schrottlager	Sonderlager	Verpackungslager	Wareneingang	Werkstättenfertigung	SUMME
BGM Maschine	■																												
BGM Peripherie		■																											
B_BGM Maschine			■																										
B_BGM Peripherie				■																									
B_EM Maschine					■																								
B_EM Peripherie						■																							
B Teilefertigung							■																						
Blechbearbeitung								■																					
Elektrofertigung									■																				
EM Anlagen										■																			
EM Maschinen											■																		
EM Peripherie												■																	
Ersatzteillager													■																
Ersatzteilversand														■															
Gruppenfertigung															■														
Kleinteilelager																■													
Kommissionen BGM																	■												
Kommissionen EM																		■											
Lackierung																			■										
Maschinenversand																				■									
Palettenlager																					■								
Rohmateriallager																						■							
Sägen																							■						
Schrottlager																								■					
Sonderlager																									■				
Verpackungslager																										■			
Wareneingang																											■		
Werkstättenfertigung																												■	
SUMME																													

Abb. 9-10: Austauschbeziehungen Flusssystem »Material« (qualitativ)

Im Rahmen der Generalstrukturplanung waren vier **Teilaufgaben** des Planungsnetzes von besonderer Bedeutung:

- Technologie- bzw. Prozessplanung
- Ressourcenplanung
- Organisationsplanung
- Gebäudestrukturplanung

Die beiden erstgenannten Aufgaben wurden nicht aktiv ausgeplant, jedoch flossen kleinere Optimierungen und Anpassungen, wie zum Beispiel erforderliche Ersatz- bzw. Erweiterungsinvestitionen im Bereich Ressourcen oder auch Verbesserungen der logistischen Prozesse und Systeme sehr wohl mit in die Planung ein. Die gesamte Auslegung beinhaltet also die kapazitive Anpassung der Ressourcen- und Prozesswelt. Um den oben erläuterten Unternehmens- und Projektzielen Rechnung zu tragen, wurde für die beiden letztgenannten Aufgaben jeweils eine eigene Planung mit Ermittlung und Vorselektion von verschiedenen Alternativen durchgeführt. Die Vorselektion fand anschließend im Rahmen der Ausgestaltung der Anordnung Ein-

gang in die Generalstrukturplanung. Ergebnis der **Organisationsplanung** war für den Bereich der Teilefertigung die Aufteilung des Maschinenparks in eine dem Gruppenprinzip und eine dem Werkstättenprinzip folgende Einheit. Ergebnis der Montageplanung war eine Gliederung anhand zweier unterschiedlicher Kriterien, die letztlich zu vier entsprechenden Einheiten führte. Während für die Maschinen sowohl eine Fließmontage für den Grundaufbau wie auch eine Standplatzmontage für Kundenanpassungen und Inbetriebnahme vorgesehen wurde, sollte die Montage der Peripheriegeräte ausschließlich im Fließprinzip und die der Anlagen ausschließlich im Standplatzprinzip erfolgen.

Im Rahmen der **Gebäudestrukturplanung** wurden aufgrund der Qualität und der daraus resultierenden zukünftigen Nutzbarkeit der vorhandenen Gebäude Varianten zur zukünftigen Gebäudestruktur ausgestaltet. Nicht mehr sinnvoll nutzbare Gebäude wurden zur Disposition gestellt und planerisch durch entsprechend neue ersetzt. Eine der vorselektierten Varianten für die Generalstrukturplanung ist in Abb. 9-11 dargestellt. Sowohl für die Ergebnisse der Organisations- wie auch der Gebäudestrukturplanung wurde von vorne herein die Notwendigkeit gesehen, die in der Generalstrukturplanung vorselektierten Varianten in der sich anschließenden Betrachtung im detaillierteren Kontext nochmals zu überprüfen und so die getroffenen Entscheidungen zu verifizieren bzw. gegebenenfalls an die veränderten Anforderungen und Rahmenbedingungen anzupassen.

Bereits in der **Generalstrukturplanung** wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte betrachtet und in Form entsprechender Beziehungen modelliert. Die Abbildung bezog sich hierbei in aller Regel auf eine grobe Betrachtung der relevanten Aspekte.

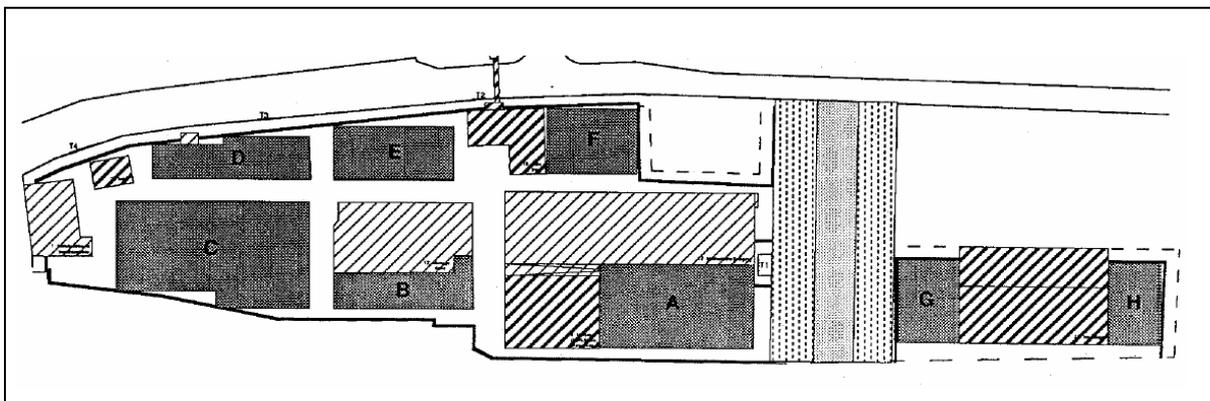


Abb. 9-11: Beispiel einer vorselektierten Struktur aus der Gebäudestrukturplanung

In der Generalstrukturplanung definiert nicht betrachtet wurden aus dem Bereich Materialfluss die Aspekte Transportmittel, Transporthilfsmittel und die exakte Lage der An- und Abdienungen innerhalb der Flächenelemente. Weitere definiert vernachlässigte Aspekte waren die gegebenen Stützenraster und die Qualität der Fußböden. Für diese Aspekte wurde es als ausreichend angesehen, sie erst im Rahmen der Detailplanung in die Betrachtungen zu integrieren. Für alle anderen Aspekte, wie z. B. Dimensionierung, Materialflusstruktur und -aufkommen, Gebäudequalitäten, versorgungstechnische und bauliche Infrastruktur mit Toren und Fundamenten sowie die Arbeitsorganisation wurden wesentliche Rahmenbedingungen beim Aufbau des zu modellierenden Beziehungssystems berücksichtigt. Hinsichtlich der Aspekte Gebäudestruktur und Organisation wurde die Abbildung so gestaltet, dass die vorselektierten Alternativen aus Anordnungssicht im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung bewertet werden konnten. Für die vordefinierten Technologien und Prozesse sowie die festgelegten Ersatzinvestitionen erfolgte ebenfalls eine abschließende Bewertung unter Berücksichtigung der Anordnungsergebnisse. In Abb. 9-12 sind die Abbildungsumfänge der Generalstrukturplanung nochmals im Überblick dargestellt.

Aufgabe	Generalstrukturplanung	Bereichsplanung BM-Aufstellung, Montage etc.)	Planerische Iterationen
Inhalt			
Strategie	Übergeordnete Ziele betrachtet	Übergeordnete Ziele heruntergebrochen	Bedarfsorientiert
Analyse	Details vernachlässigt	Details ermittelt	Bedarfsorientiert
Dimensionierung	Details vernachlässigt	Details ermittelt	Anpassung an Veränderung
Materialfluss	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Transport(hilfs)mittel	Aspekt vernachlässigt	Aspekt berücksichtigt	Bedarfsorientiert
Lage An-/Abdienung	Aspekt vernachlässigt	Aspekt berücksichtigt	Bedarfsorientiert
Verkehrswege	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Gebäudestruktur	Alternativen vorselektiert	Alternativen auszuwählen	Alternative Gebäudestruktur
Gebäudequalität	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Fördertechnik (Kran, Aufzug etc.)	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Stützenraster	Aspekt vernachlässigt	Aspekt berücksichtigt	Bedarfsorientiert
Fußbodenqualität	Aspekt vernachlässigt	Aspekt berücksichtigt	Bedarfsorientiert
Infrastruktur	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Tore	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Fundamente	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Bedarfsorientiert
Technologien/Prozesse	Abläufe grob definiert	Abläufe detaillierter überprüft	Anpassung an Organisation
Ressourcen	Ersatzinvestitionen berücksichtigt	Ersatzinvestitionen berücksichtigt	Alternative Ersatzinvestition
Elementarflächen	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Anpassung an Ersatzinvest
Organisation	Alternativen vorselektiert	Alternativen auszuwählen	Alternative Organisation
Arbeitsorganisation	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Anpassung an Organisation
Meisterbereiche	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Anpassung an Organisation
Mehrmaschinenbedienung	Details vernachlässigt	Details betrachtet	Anpassung an Organisation

Abb. 9-12: Abbildungsumfänge von Planungsaufgaben und Iterationen

In den **Detailplanungen** zur Betriebsmittelaufstellung und Montagegestaltung wurden für die relevanten Bereiche innerhalb des bestehenden Modells Abbildungsumfang und Abbildungsgenauigkeit hinsichtlich der definierten Aspekte vergrößert. Zur Modellierung entsprechender Details musste bereits aus der Analyse heraus ein wesentlich differenzierteres Abbild der vorhandenen bzw. geplanten Realität generiert werden. Die aufgrund der Ergebnisse der Generalstrukturplanung durchgeführte Dimensionierung musste nochmals im Detail angepasst werden. Bezüglich des Materialflusses wurden vor allem für die Struktureinheiten Gruppen- und Werkstättenfertigung sowie die vorgesehenen Montagen die bisher vernachlässigten Aspekte Transportmittel und Transporthilfsmittel in das Modell eingearbeitet. Die Materialflussbetrachtung fand hierdurch Übergang von einer aufwands- zu einer kostenmäßigen Bewertung unter Berücksichtigung spezifischer Kostensätze für die jeweiligen Transportmittel und -hilfsmittel. In dieser Stufe machte auch bereits die Abbildung einer definierten Führung der Materialflüsse über die Verkehrswege Sinn. Diese Führung berücksichtigt, soweit erforderlich und sinnvoll, eine spezifische Lage der An- und Abdienungen innerhalb der Flächenelemente. Durch die Abbildung weiterer Beziehungen vor allem aus den Bereichen Gebäudequalität, Infrastruktur und Arbeitsorganisation (vgl. Abb. 9-12) konnte die Aussagequalität des Modells bzw. der Partialmodelle der für die Detailplanung relevanten Einheiten weiter gesteigert werden.

Ergebnis der Detailplanung war die räumlich-organisatorische Ausgestaltung der beiden Struktureinheiten Gruppen- und Werkstättenfertigung in der Teilefertigung. In der Gruppenfertigung entstanden vier Fertigungsinseln, die sich durch minimale Materialflüsse über ihre Grenzen hinweg auszeichnen. Alle vier Inseln wurden mit den ihnen zugeordneten Betriebsmitteln innerhalb des vorgesehenen bzw. des aus der Generalstrukturplanung vordefinierten Bereiches angeordnet. Unter räumlich-organisatorischer Optimierung erfolgte dann die Anordnung der Betriebsmittel Werkstättenfertigung. Hierbei wurden für sämtliche Betriebsmittel die diesen zugeordneten Elementarflächen für z. B. Bedienung, Instandhaltung, Bereitstellung etc. sowie deren spezifische Anforderungen berücksichtigt. In der Detailplanung der Montagen wurden vier Struktureinheiten gebildet und entsprechend der räumlich-organisatorischen Anforderungen im Detail optimiert angeordnet. Resultierende Einheiten waren:

- Standplatzmontage für Großmaschinen (kompletter Montageablauf) und kleine Standardmaschinen (Komplettierung und Inbetriebnahme)

- Fließmontage Grundaufbau kleine Standardmaschinen
- Fließmontage Peripheriegeräte
- Standplatzmontage komplexe Anlagen

Durch Abbildung beider Teilaufgaben, Generalstruktur- und Detailplanung, innerhalb eines Modells konnte der **Nachweis** für die **Integrationsfähigkeit** von Fragestellungen bezüglich mehrerer unterschiedlicher Hierarchieebenen der Anordnungsplanung mittels des verbesserten Modellierungsverfahrens entsprechend Abb. 9-13 geführt werden. Die im Anwendungsbeispiel behandelten Aufgaben der Generalstruktur- und Detailplanung beziehen sich dabei auf drei verschiedenen hierarchischen Ebenen der Planung, die der Hallen- bzw. Gebäudestruktur, der Hauptnutzungen innerhalb der Hallen und Gebäude sowie der Betriebsmittel und Nutzflächen innerhalb der Hauptnutzungen. Mit dieser Betrachtung konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass das verbesserte Verfahren alle aufgrund der Skalierbarkeit gegebenen Anforderungen abbilden kann, die aus der Integration der beiden planerischen Teilaufgaben und den beiden zugehörigen, unterschiedlichen Planungspunkten resultieren.

Als letzte Stufe des Verbesserungsnachweises für das neu entwickelte Verfahren soll anhand ausgewählter **Iterationsszenarien** (vgl. Abb. 9-12) aufgezeigt werden, dass nicht nur, wie gerade dargestellt, eine Variation des Planungspunktes im Sinne einer Top-down-Planung möglich ist. Auch nach dem Durchlaufen der Detailplanung ist es

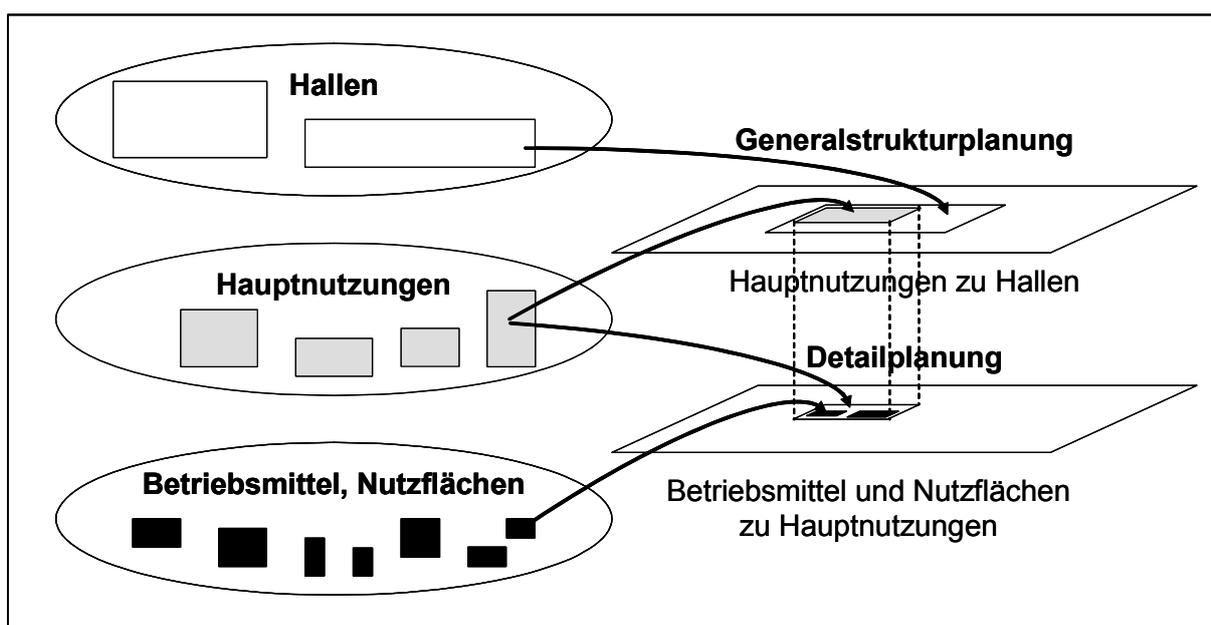


Abb. 9-13: Integration Teilaufgaben und Hierarchieebenen der Anordnungsplanung

bei z. B. neuen Erkenntnissen oder Rahmenbedingungen möglich, den Planungspunkt wieder in Bottom-up-Richtung zu variieren. Das heißt, es lassen sich sowohl vorliegende Ergebnisse der Generalstruktur- wie auch der Detailplanung veränderten Rahmenbedingungen anpassen, ohne dass hinsichtlich des verwendeten Modells Inkonsistenzen entstehen oder die durchgängige Unterstützung des Planers in Frage gestellt wäre.

Szenario »Anpassung Gebäudestruktur«

Aufgrund einer Veränderung der Planungsvorgaben in Zusammenhang mit der Verlegung einer benachbarten Bundesstraße musste die vorgesehene Gebäudestruktur nachträglich modifiziert werden. Ein geplantes Gebäude konnte nicht an ursprünglich vorgesehener, zentraler Stelle realisiert werden. Dies zog verschiedene Veränderungen der gesamten Gebäudestruktur nach sich, so dass die Generalstrukturplanung an die veränderte Ausgangssituation hinsichtlich der vorgegebenen Gebäudestruktur anzupassen war. Bezüglich der Änderungen im Modell sind zwei unterschiedliche Strategien relevant. Zum einen lässt sich die Modifikation der Gebäudestruktur direkt auf der Ebene der Detailplanung abfangen. Hierzu ist das Beziehungssystem insbesondere in seinen definierten Randbedingungen zu überprüfen. Schwerpunkt sind all diejenigen Randbedingungen, mit denen die Ergebnisse der Generalstrukturplanung innerhalb der Detailplanung abgebildet werden. Dies sind beispielsweise Bindungen von Betriebsmitteln oder Nutzflächen an einzelne Gebäude bzw. Hallen, sofern solche definiert sind. Darüber hinaus sind sämtliche Anordnungen im veränderungsrelevanten Bereich auf ihre Haltbarkeit hin zu überprüfen. Dies bezieht sich einerseits auf die Dimensionen des neu vorgesehenen Gebäudes sowie auf alle dieses Gebäude betreffenden Beziehungen. In dieser ersten Strategie ist lediglich von einer bedingten Variation des Planungspunktes auszugehen. Vielmehr erfolgt die Wiederherstellung der konsistenten Durchgängigkeit im Modell im Wesentlichen aus Sicht der Detailplanung und somit ohne echte Variation des Planungspunktes. Als zweite Strategie der Anpassung an die veränderten Gegebenheiten wurde eine echte Iteration zurück in die Aufgabenstellung der Generalstrukturplanung vorgenommen. Unter Anpassung des Flächenangebotes des neu vorgesehenen Gebäudes erfolgte zunächst die Überprüfung für den relevanten Bereich der ursprünglichen Anordnung aus der Generalstrukturplanung. Aufgrund der veränderten Positionierung, des veränderten Flächenangebotes und des neuen Flächenzuschnitts wurden weitere Anordnungsvari-

anten generiert. Zuvor erfolgte, soweit erforderlich, die Anpassung des Beziehungssystems der Generalstrukturplanung an die veränderte Situation. Die resultierenden Ergebnisse wurden wiederum in das Beziehungssystem der Detailplanung überführt. Die untergeordneten Flächenelemente aus der Detailplanung wurden so mittels Randbedingungen an die zugehörigen Struktureinheiten aus der Generalstrukturplanung gebunden.

Als Planungsergebnis ergab sich so eine Anordnung auf Detailebene, welche die veränderte Gebäudestruktur berücksichtigt. Die Hauptnutzungen innerhalb der Hallen wurden leicht modifiziert. Um dem etwas geringeren Flächenangebot des neuen Gebäudes Rechnung zu tragen, erfolgte ein Tausch von zwei Flächenelementen hinsichtlich ihrer Gebäudezuordnung. Die Detailanordnungen innerhalb der Hauptnutzungen wurden der neuen Gebäudebelegung angepasst. Durch veränderte Flächenzuschnitte waren leichte Modifikationen der Anordnung und Ausrichtung der einzelnen Maschinen, Arbeitsplätze und logistischen Flächen bzw. Systeme erforderlich.

Szenario »Anpassung Struktur Teilefertigung«

Durch konstruktive Änderung einer wesentlichen Teilefamilie und eine entsprechende Anpassung der Bearbeitungsfolge konnte aus der ursprünglich geplanten Werkstättenfertigung eine weitere Gruppe für die Gruppenfertigung herausgelöst werden. Statt vier waren dort nun fünf Inseln vorzusehen. Wesentliche Auswirkungen hatte dies bereits hinsichtlich der vorzusehenden Dimensionen der beiden Bereiche. Der Flächenbedarf der Werkstättenfertigung war rückläufig, derjenige der Gruppenfertigung wuchs um die zur Anordnung der fünften Insel erforderliche Fläche an. Im Modell erfolgte zunächst die aus der Dimensionierung resultierende Anpassung der Flächenbedarfe. Auf der Ebene Generalstrukturplanung wurden die Größenänderungen der beiden Fertigungsbereiche realisiert und das zugrunde liegende Beziehungssystem auf eventuelle Anpassungsnotwendigkeiten hin überprüft. Das resultierende Ergebnis wurde anschließend in Form der Betriebsmittelaufstellung detailliert. Als Voraussetzung hierzu erfolgte die Anpassung des Beziehungssystems der Detailplanung. Wesentliche Änderung war dabei die strukturelle Einbindung der zur fünften Insel gehörigen Betriebsmittel in die Gruppenfertigung anstatt in die Werkstättenfertigung durch entsprechende Randbedingungen.

Das **Planungsergebnis** wies lediglich bedingte Modifikationen auf. Da beide betroffenen Fertigungsbereiche im Bereich eines Gebäudes direkt aneinandergrenzten, war die erforderliche Größenanpassung relativ unproblematisch zu realisieren. Wesentliche Herausforderung der Betriebsmittelaufstellungsplanung war die Anpassung der Detailanordnung in der Werkstättenfertigung an die entfallene Teilefamilie sowie in der Gruppenfertigung an die fünfte Insel. Für die Werkstättenfertigung führte der Entfall der Teilefamilie zu einer Vertauschung bezüglich der Reihenfolge der in Anspruch genommenen Werkstätten bzw. Technologien für das Gros des verbliebenen Restprogramms. Dieser Situation wurde durch eine veränderte relative Anordnung der einzelnen Technologien bzw. Werkstätten Rechnung getragen. In der Gruppenfertigung konnte durch die fünfte Insel und die erforderliche Anpassung der Detailanordnung sogar ein vorhandenes, in der ursprünglichen Planung nicht mehr nutzbares Fundament neu genutzt werden. Die erforderlichen baulichen Investitionen ließen sich so gegenüber der ursprünglich geplanten Variante sogar noch senken. Aufgrund dieser Einsparung wurde beschlossen, eine zusätzliche Ersatzinvestition im Bereich der Maschinen zu tätigen. Diese wurde in die Detailanordnung eingepasst.

Szenario »Anpassung Montagestruktur«

Durch eine Verbesserung bzw. Modifikation bezüglich des Maschinentransports in der Montage (Abb. 9-14) bot sich die Möglichkeit, auch die großen Maschinen in die geplante Fließlinie zu integrieren. Die vorgesehene Standplatzmontage konnte daher von sämtlichen Tätigkeiten, den Grundaufbau der Maschinen betreffend, entlastet



Abb. 9-14: Blick in die Fließlinie zur Maschinenmontage

und somit auf die Montage von kundenspezifischen Umfängen und die Inbetriebnahme mit ihren naturgemäß höheren Zeitspreizungen konzentriert werden. Auch aus dieser Veränderung resultierten modifizierte Flächenbedarfe der beiden beteiligten Flächenelemente. Auf der Ebene Generalstrukturplanung wurden die Größenänderungen beider Montagebereiche umgesetzt und das Beziehungssystem auf Änderungsbedarf hin untersucht. Unter Maßgabe des entstehenden Ergebnisses wurde anschließend das Beziehungssystem für die Detailplanung angepasst. Im Rahmen dieser Planungsaufgabe wurde die Anordnung der veränderten Situation entsprechend modifiziert.

Als **Planungsergebnis** konnte die Realisierung des veränderten Flächenbedarfs auch hier aufgrund der direkt aneinander angrenzenden Montagebereiche unproblematisch realisiert werden. Die Integration der größeren Maschinen in die Fließlinie und die hiermit verbundene Reduzierung der Durchlaufzeit führte in Summe über Montagelinie und Standplätze sogar zu einem reduzierten Flächenbedarf. Die eingesparte Fläche konnte zur weitergehenden flächenmäßigen Entzerrung der ursprünglich noch ziemlich flächenknapp ausgestalteten Materialbereitstellung genutzt werden. Dies kam insbesondere dem Bereich bzw. der Fläche zur Bereitstellung der weitgehend kommissionsbezogen beschafften größeren Schlüsselteile der Maschinen zugute.

Mit den drei beschriebenen Szenarien konnte als letzter Schritt des Verbesserungsnachweises die Durchgängigkeit und die Skalierbarkeit des neu entwickelten Verfahrens aufgezeigt werden. Diese Charakteristik erlaubt eine durchgängige Unterstützung des Planungsteams. Unabhängig von Planungspunkt und Planungsrichtung ist das im Rahmen der Planung verwendete Modell durch den Planer bzw. das Planungsteam jederzeit konsistent, widerspruchsfrei und durchgängig zu halten.

9.3 Kritische Würdigung des Verfahrens

Das verbesserte Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung liefert aufgrund der deutlich erweiterten Abbildungs- und Bewertungsmöglichkeiten eine wesentlich verbesserte Entscheidungsunterstützung. Diese Verbesserung bezieht sich auf die durch eine sowohl interdisziplinäre

näre wie auch partizipative Planungsdurchführung veränderten Anforderungen. Darüber hinaus wird den Anforderungen einer durchgängigen und iterativen Planung mit der Möglichkeit zur jederzeitigen Variation des Planungspunktes Rechnung getragen. Die kritische Bewertung der Ergebnisse geht auf die folgenden Punkte ein:

- Konstrukte der Modellierung
- Bewertung der räumlichen Anordnungen
- Anordnungsverhalten der Flächenelemente

Konstrukte der Modellierung:

- Das verbesserte Verfahren grenzt sich bewusst auf die 2-dimensionale Planung ein, 3-dimensionale Fragestellungen sind ausgeschlossen. Trotz der Vorteile, die eine durchgängig 3-dimensionale Visualisierung der Planungsergebnisse heute bereits in vielen Fällen bietet, ist der essenzielle planerische Beitrag der dritten Dimension für die meisten Anwendungen und Produktionsbetriebe eher begrenzt. Der gewählte Ansatz rechtfertigt sich somit aufgrund der Erschließung zahlreicher veränderter Anforderungen bei gleichzeitiger Begrenzung der durch die 3. Dimension getriebenen planerischen Komplexität. Wesentliche Aspekte des neu entwickelten Modellierungsverfahrens sind jedoch durchaus auch bei 3-dimensionalen Fragestellungen gültig.
- Die erheblich erweiterten Abbildungsmöglichkeiten des verbesserten Verfahrens bedingen bei entsprechender Ausnutzung zusätzliche Komplexität hinsichtlich der verwendeten Flächenelemente und insbesondere der modellierten Beziehungen. Aufgrund des Ansatzes der experimentellen Optimierung ist ein gewisses Mindestmaß an intellektueller Beherrschung auch eines komplexen Modells durch den Planer bzw. das Planungsteam erforderlich und somit die Komplexität der zu realisierenden Modelle sinnvoller Weise zu begrenzen.
- Aufgrund der Anforderung der Skalierbarkeit wurde für das verbesserte Verfahren der Ansatz einer möglichst generischen Flächenmodellierung mit einheitlicher Logik gewählt. Dies gewährleistet insbesondere die Überwindung einer grundsätzlichen Trennung von anzuordnenden Elementen und Standortträger. In der weiterführenden Detaillierung der Planung in den sich an die Anordnungsplanung anschließenden Planungsschritten können die Vorteile einer differenzierteren Flächenabbildung die Vorteile einer generischen Modellierung gegebenenfalls überwiegen.

- Die Abbildung der Flächenelemente unter Zugrundelegung der anordnungsspezifischen Sicht unterliegt hinsichtlich anderer Schritte im Planungsnetz naturgemäß entsprechenden Einschränkungen. Zur Überführung der spezifischen Abbildungslogik der Anordnungsplanung in die anderer Planungsschritte und umgekehrt ist eine entsprechende Transformation vorzusehen.

Bewertung der räumlichen Anordnungen:

- Unabhängig von den deutlich erweiterten Möglichkeiten der Bewertung bleibt die objektive Quantifizierbarkeit von Beziehungen respektive des Gesamtzielwertes einer Anordnung bzw. Anordnungsvariante eine der wesentlichen Herausforderungen für die Bewertung insgesamt. Aufgrund rudimentärer Bewertungsmöglichkeiten bei herkömmlichen Verfahren kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Möglichkeiten einer differenzierteren quantitativen Bewertung bei weitem noch nicht ausgereizt sind.
- Die Zusammenführung unterschiedlicher und oft schwierig vergleichbarer Kriterien lässt sich meist lediglich auf dem Niveau einer kostenmäßigen Bewertung realisieren. Der kostenmäßigen Bewertung selbst sind jedoch gewisse Grenzen gesetzt. Wesentliche Herausforderungen der kostenmäßigen Quantifizierung sind somit meist die der Bewertung zugrunde liegenden Annahmen.
- Mit den erweiterten Abbildungs- und Bewertungsmöglichkeiten einher geht die Fragestellung der sinnvollen Grenzen des Umfangs der abzubildenden Beziehungen. Die Vollständigkeit der abzubildenden Beziehungen kann im Normalfall nicht sinnvolle Zielsetzung sein, treibt sie den Modellierungsaufwand doch erheblich. Andererseits konnte der Nutzen eines gegenüber herkömmlichen Verfahren größeren Modellumfangs unzweifelhaft nachgewiesen werden.
- Die zur Entfernungsmessung entlang Verkehrswegen erforderliche deterministische Festlegung der Fahrstrecke anhand von Konnektorpunkten stellt in Bezug auf die tatsächliche Transportabwicklung im Produktionsbetrieb naturgemäß lediglich eine abstrahierende Annahme dar. Die Grenzen dieser Festlegung bzw. Annahme sind entsprechend zu berücksichtigen.
- Die Bewertung des neu entwickelten Verfahrens basiert im Grundsatz lediglich auf statischen Betrachtungen. Diesen sind naturgemäß Grenzen hinsichtlich ihrer Aussagekraft gesetzt. Für bestimmte weitergehende Fragestellungen kann eine dynamische Bewertung, z. B. mittels Simulation, durchaus sinnvoll

sein. Die Flexibilität der Bewertungsmethode ermöglicht und unterstützt für diesen Fall die Verzahnung von statischer und dynamischer Bewertung.

Anordnungsverhalten der Flächenelemente:

- Der experimentellen Optimierung einer Anordnung sind naturgemäß entsprechende Grenzen gesetzt. Dies gilt v. a. dann, wenn das zugrunde liegende Modell eine beherrschbare Komplexität übersteigt. Die Leistungsfähigkeit der experimentellen Optimierung, die aufgrund ihrer Herangehensweise und Logik durchaus nachweisbare Vorzüge aufweist, kann jedoch erst mit dem Vorliegen von für das neue Modellierungsverfahren maßgeschneiderten Optimierungsverfahren bzw. -algorithmen abschließend beurteilt werden.
- Die verbesserten, erweiterten Abbildungsmöglichkeiten im Bereich des Beziehungssystems sowie die vor diesem Hintergrund wesentlich größere Komplexität der realisierbaren Modelle macht die dauerhafte Gewährleistung der Konsistenz eines Modells im Rahmen verschiedener planerischer Sichten und Aufgaben zu einer Herausforderung für Planer bzw. Planungsteam.
- Abschließend soll noch die bei Anwendung des verbesserten Verfahrens gegebene Herausforderung hinsichtlich der Vermeidung einer aufgrund der definierten Beziehungen überbestimmten Situation genannt werden. Hierbei gehen die erforderlichen Freiheitsgrade der Planung verloren und es entsteht eine gegenseitige Blockade von Flächen, ein planerischer »Deadlock«, der sich lediglich durch modifizierende Eingriffe an den Parametern der Flächenelemente bzw. der zugeordneten Beziehungen wieder auflösen lässt. Ein einfaches Beispiel hierfür ist die deckungsgleiche Anordnung zweier identischer Flächenelemente, bei der jeweils ein formuliertes Angebot eines Flächenelementes aufgrund der jeweils formulierten Bedarfe die zwingende Voraussetzung für die Anordnung des jeweils anderen Flächenelementes im Sinne einer Randbedingung darstellt. Nach Definition der entsprechenden Logik lässt sich somit keines der beiden Flächenelemente mehr entfernen oder verschieben, ohne direkt zu einer Unzulässigkeit der gesamten Anordnung zu führen. Auch dieser Aspekt stellt letztlich ein spezifisches Derivat der bereits im vorigen Punkt behandelten Konsistenzfrage dar.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung entwickelt, in wesentlichen Details ausgestaltet und abschließend anhand einer industriellen Anwendung dessen Verbesserungen im Vergleich zu herkömmlichen, heute verfügbaren Modellierungsverfahren nachgewiesen. Ausgangspunkt der Entwicklung war die Zurückführung von in Zusammenhang mit der räumlichen Anordnung und der Anordnungsplanung stehenden Defiziten der betrieblichen Praxis auf vorwiegend Mängel bezüglich der der Planung zugrunde liegenden Modellierungsverfahren (Kapitel 1.2).

Die zukünftigen Anforderungen an Modellierungsverfahren zur Anordnungsplanung wurden dazu ausgehend von den Wandlungstreibern in den Märkten abgeleitet. Diese Wandlungstreiber zwingen die Unternehmen zu gänzlich neuen Dimensionen der eigenen, internen Wandlungsfähigkeit. Eine wesentliche Instanz zur Beherrschung der internen Wandlungsfähigkeit stellt die Fabrikplanung dar. Sie steht so gegenüber der Vergangenheit in einem wesentlich veränderten Kontext, der gänzlich neue Möglichkeiten offeriert, jedoch auch komplett neue Anforderungen stellt. Wesentliche Trends in der Fabrikplanung sind eine Abkehr vom Charakter der Einmalplanung hin zur kontinuierlichen Planung, ein Zusammenwachsen von technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten sowie eine ganzheitliche Betrachtung aus den Blickwinkeln Ressourcen und Prozesse, jedoch zunehmend auch unter dem Aspekt von Produktdetails (Abb. 2-5). Für die Anordnungsplanung als eine der, wenn nicht sogar die zentralste Aufgabe der Fabrikplanung, gilt dies entsprechend und in besonderer Weise. Zukünftige allgemeine Anforderungen an die Anordnungsplanung wie verkürzte Planungsauern, höhere Planungsqualität und bessere Entscheidungssicherheit werden für den Bereich der zugehörigen Modellierungen durch spezifische Anforderungen ergänzt (Kapitel 2):

- Unterstützung einer kontinuierlichen Planung
- Unterstützung einer interdisziplinären Planung
- Unterstützung einer partizipativen Planung
- Unterstützung einer iterativen Planung

Hinsichtlich dieser Anforderungen kristallisieren sich für die Modellierungsverfahren neue, zukünftig wesentliche Erfolgsfaktoren heraus (Kapitel 3). Zu nennen sind hier insbesondere eine realitätsnahe Abbildung der Planungsaufgabe, eine skalierbare Modellierung mit der Möglichkeit zur freien Variation des Planungspunktes sowie die Durchgängigkeit und Konsistenz von Modell und planerischer Unterstützung. Auf Basis dieser veränderten Anforderungen wurde der Stand der Technik für den relevanten Bereich untersucht und die herkömmlichen, heute bekannten Modellierungsverfahren zur Anordnungsplanung vertiefend analysiert (Kapitel 4). Dabei konnten sowohl durch Untersuchung der einzelnen Verfahren als auch der Entwicklungslinien für Verfahrensfamilien eindeutige und bisher nicht überwundene Defizite identifiziert werden. Eines der kritischsten Defizite in Bezug auf die geforderte Skalierbarkeit stellt die grundsätzliche Trennung der Realobjekte im Modell hinsichtlich ihrer Eigenschaften »anzuordnende Elemente« und »Elemente des Standortträgers« dar. Diese Trennung verhindert nicht nur die Skalierbarkeit sondern definitiv auch bereits eine einfache Integration von zwei unterschiedlichen Teilaufgaben der Anordnungsplanung innerhalb ein und desselben Modells. Dazu kommen mehr oder weniger große Einschränkungen hinsichtlich der Abbildungsmöglichkeiten von insbesondere Beziehungen zwischen diesen Elementen und direkt hieraus resultierend auch Einschränkungen hinsichtlich der Bewertungsmöglichkeiten. Dritte wesentliche Einschränkungsquelle ist ein starres und somit vielen anordnungsrelevanten Teilaufgaben nicht angemessenes bzw. ein sogar ungeeignetes Anordnungsverhalten.

Zur Überwindung dieser Defizite wurde auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ein neues Modellierungsverfahren entwickelt. Der Lösungsansatz zielt dabei insbesondere auf vier Verbesserungsfelder ab (Kapitel 5):

- Realitätsnähere Abbildung der Flächenelemente
- Wesentlich umfassendere und realitätsnähere Abbildung der Beziehungen zwischen den Flächenelementen
- Erweiterte und flexiblere Bewertungslogik
- Variables und abhängig von den Anforderungen der Planungsteilaufgabe steuerbares Anordnungsverhalten

Zum definierten Lösungsansatz wurden dann innerhalb der vier Verbesserungsfelder erfolgskritische Details für das verbesserte Verfahren ausgestaltet (Kapitel 6 und 7):

Flächenelemente:

- Zulässige Geometrien
- Logik der Konnektorpunkte zur Führung flussbasierter Beziehungen
- Stellung innerhalb der planerischen Hierarchie
- Logik der freien Attribute

Beziehungen:

- Logik von Zielen und Randbedingungen
- 0-, 1- und 2-dimensionale Beziehungen
- Logik der expliziten und impliziten Beziehungsformulierung
- Alternative Auswertungslogiken
- Methoden zur alternativen Entfernungsmessung

Bewertungslogik:

- Elemente der Methodensprache
- Zugriffsmöglichkeiten durch die Methodensprache
- Methoden zur Beziehungsbewertung
- Methoden zur Beziehungsverknüpfung bzw. zur Anordnungsbewertung

Anordnungsverhalten:

- Strukturbezug des Anordnungsverhaltens
- Verhaltensbezug des Anordnungsverhaltens
- Kontextbezug des Anordnungsverhaltens
- Kontextabhängige Steuerbarkeit des Anordnungsverhaltens

Als letzter Entwicklungsschritt wurde das verbesserte Verfahren hinsichtlich seiner ablaufmäßigen Einbindung untersucht und die bisherigen Planungsabläufe so gestaltet, dass sie das neue Verfahren optimal unterstützen (Kapitel 8). Gestand der Gestaltung war dabei einerseits der übergeordnete Ablauf im gesamten Planungsnetz (Makroablauf), andererseits der Ablauf der Verfahrensnutzung im Bereich der Anordnungsplanung selbst (Mikroablauf). Die wesentlichen Änderungen gegenüber dem Einsatz herkömmlicher Verfahren resultieren für den Makroablauf aus den erheblich erweiterten Abbildungsmöglichkeiten des neu entwickelten Verfahrens. Somit erhält zum einen der Ziel- und Strategiebezug eine deutlich größere Bedeutung. Zum ande-

ren lassen sich alle vorgelagerten Planungsschritte innerhalb des Planungsnetzes wesentlich weitergehend hinsichtlich abbildungsrelevanter Aspekte für die verschiedenen Aufgaben der Anordnungsplanung interpretieren. Für den Mikroablauf sind aufgrund der detaillierteren Bewertungsmöglichkeiten der Bezug zu den aufgabenspezifischen Zielssystemen und deren systematische Ableitung aus den übergeordneten Zielen und Strategien entscheidend. Darüber hinaus kommt der gesamten Abbildung des Beziehungssystems und deren Verankerung im Planungsablauf eine gesteigerte Bedeutung zu. Aufgrund der Charakteristik des verbesserten Verfahrens erfolgt die Anordnungsoptimierung in experimenteller Form, ähnlich des von der Simulation bzw. der Durchführung von Simulationsexperimenten bekannten Ablaufs.

Das neue entwickelte Verfahren wurde abschließend anhand eines industriellen Beispiels getestet. Mit der industriellen Anwendung wurde der Verbesserungsnachweis für das Verfahren in drei aufeinander aufbauenden Stufen geführt (Kapitel 9). Zunächst wurden anhand von unvernetzten Einzelszenarien die gegenüber herkömmlichen Verfahren erhöhte Mächtigkeit und die verbesserten Abbildungsmöglichkeiten nachgewiesen. Alle Szenarien konnten mit einer großen Durchgängigkeit betrachtet und abgebildet werden (Kapitel 9.1). Die Integrierbarkeit der aus zwei unterschiedlichen Planungspunkten bzw. Teilaufgaben resultierenden Fragestellungen und Aspekte in einem einzigen Modell wurde anschließend unter Vernetzung von zwei anordnungsrelevanten Teilaufgaben nachgewiesen. Als Aufgaben herangezogen wurden hierbei einerseits die Generalstrukturplanung mit Zuordnung der Hauptnutzungen zu den vorhandenen bzw. geplanten Gebäuden und andererseits die auf deren Ergebnissen aufbauende Detailplanung mit Zuordnung der Betriebsmittel und Nutzflächen zu den definierten Hauptnutzungen. Der dritte Schritt des Nachweises, die freie Variierbarkeit des Planungspunktes im Sinne einer skalierbaren Modellierung bzw. Planung, erfolgte anhand verschiedener Iterationen bzw. Iterationsszenarien. Danach kann von einer durchgängigen Unterstützung des Planers bzw. Planungsteams mittels eines jederzeit konsistenten Modells ausgegangen werden.

Als **Ausblick** konnten insbesondere aufgrund einer kritischen Würdigung der industriellen Anwendung (Kapitel 9.3) weitergehende, über den Kern des in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsverfahrens hinausgehende Entwicklungsbedarfe identifiziert werden. Solange das Verfahren eine experimentelle Optimierung nutzt, ist zu er-

warten, dass die Lösungsqualität der Anordnungsaufgabe in hohem Maße von der Qualität der Suchstrategie abhängt. Die Entwicklung leistungsfähiger und standardisierter Suchstrategien ist somit ein potenzialträchtiges zukünftiges Forschungsfeld. Der Übergang von experimenteller Optimierung zu algorithmischer oder zumindest teilalgorithmischer Optimierung setzt die Entwicklung maßgeschneiderter Algorithmen voraus. Die zu entwickelten Algorithmen sind insbesondere vor dem Hintergrund der Grundstruktur von Modellierung und resultierendem Lösungsraum hinsichtlich ihrer Performance und Leistungsfähigkeit zu optimieren. Die erweiterten Bewertungsmöglichkeiten und die meist lediglich auf monetärer Ebene erreichbare Vergleichbarkeit unterschiedlicher Bewertungskriterien lässt eine Verbesserung der Abbildung sowie der Planungsergebnisse durch die Absicherung und Verbesserung der kostenmäßigen Bewertungsmöglichkeiten der Beziehungen erwarten.

Neben dem genannten, sich direkt aus dem verbesserten Verfahren ableitenden Entwicklungsbedarf, sollen beispielhaft für weiterführende Handlungsfelder mit strategischem Potenzial hier lediglich die Übertragbarkeit der 2-dimensionalen Logik auf eine 3-dimensionale Sichtweise sowie die Verzahnung von Verfahren der statischen mit denen einer dynamischen Bewertung wie z. B. der Simulation, genannt sein.

Das entwickelte Verfahren zur skalierbaren Modellierung von Produktionsbetrieben zum Zwecke der Anordnungsplanung beschreibt somit nicht nur einen systematischen Weg zur Überwindung der in Zusammenhang mit der räumlichen Anordnung und der Anordnungsplanung stehenden klassischen Defizite der betrieblichen Praxis und der Erschließung der hieraus resultierenden Potenziale. Es bietet durch seine Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der unterschiedlichen relevanten Planungsskalen darüber hinaus die Möglichkeit zur kontinuierlichen Fortschreibung der Planung und zur dauerhaften Gewährleistung eines stets nahe am Optimum liegenden Betriebspunktes des Produktionsbetriebs. Als forscherscher Kondensationskeim bietet das verbesserte Verfahren gleichzeitig eine Vielzahl an über diese Arbeit hinausgehenden Anregungen zur zukunftsgerichteten Weiterentwicklung.

11 Summary

In this research, a new approach is developed for modeling manufacturing plants for the purpose of layout planning. To meet the requirements of a continuous, interdisciplinary, participative, and iterative execution of planning, special emphasis was placed on the scalability of the model and the associated modeling approach.

Scalable models usually provide two major advantages. On the one hand, they enable a realistic and high-quality representation of the physical plant environment. On the other hand, they considerably reduce the modeling effort by allowing previously separate models for different planning levels or planning subtasks to be presented in an integrated model. This helps to overcome the fundamental separation into »area elements to be arranged« and »elements of the location«. This separation is an essential feature of the »Quadratic Assignment Problem«, a standard formulation used in Operations Research for modeling facility layout problems. This most widely used type of problem formulation and the models derived from it can principally not be scaled. It is therefore definitely impossible to integrate the partial models originating from the different planning subtasks (such as the planning of the general structure and of the equipment layout) to a complete model.

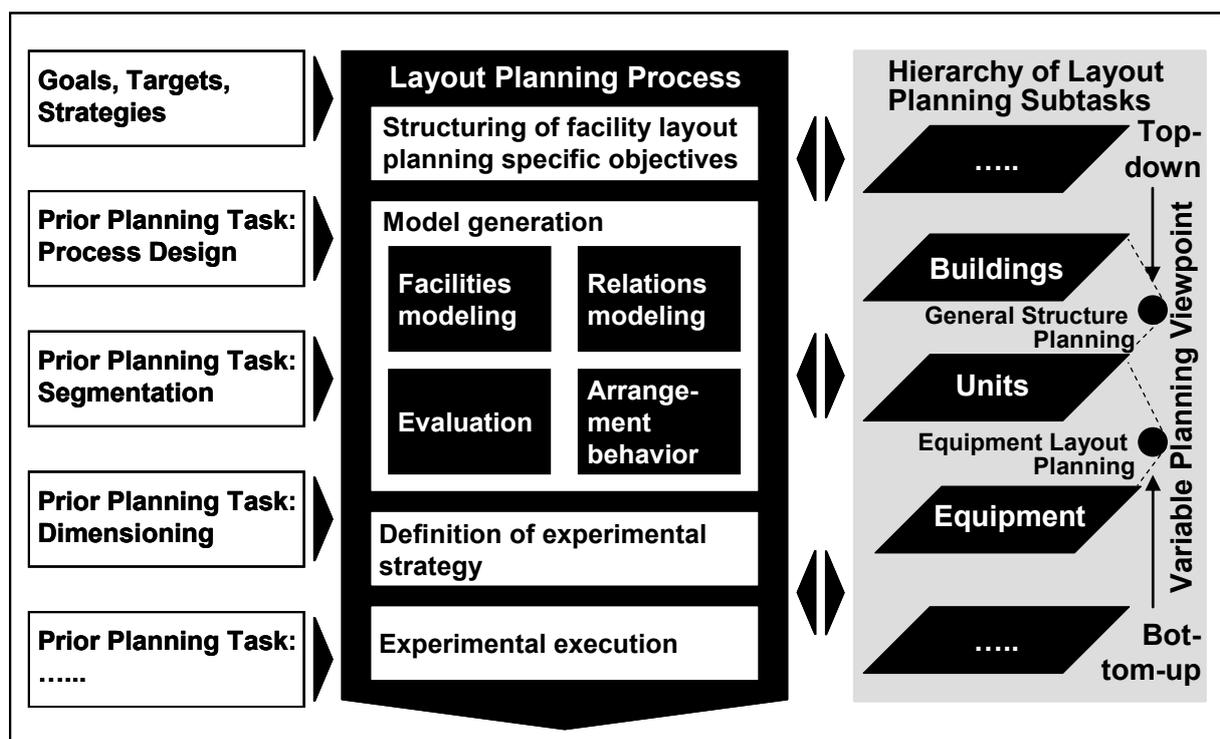


Fig.: 11-1: New modeling approach and layout planning process

Within the framework of this study, a method was developed providing an objective and comprehensible basis for all layout decisions, making use of improved correctness and greater representation accuracy, an extended scope of modeling, systematic design, and a high degree of comparability of the examined variants. This provides high-quality decision support that ensures the competitiveness of manufacturing companies.

This new approach enhances the following aspects:

- Better representation of area-related elements
- Expanded options for representing relationships between area-related elements
- Expanded and improved evaluation logic
- Controllable arrangement behavior to suit the specific requirements of the relevant planning subtask

The **representation of the area-related elements** is strictly in line with the requirements of systems engineering and the »Stuttgart enterprise model«, covering several hierarchical levels. In principle, the two functions of »area element to be arranged« and »element of location« are no longer fundamentally differentiated but only regarded as temporary states of the area elements. The current state changes when the planning viewpoint changes, i.e. with the next planning task. So, the planning viewpoint can be freely modified in both directions, top-down or bottom-up. A prerequisite is a uniform set of attributes for all area elements. Both geometrical and logical attributes are added to the set of attributes. The latter is distinguished into primary attributes that are not connected to the layout position and layout parameters which result from the current layout position. A crucial part in the set of attributes play the free attributes. They allow modeling specific requirements or properties of the area elements. By using the free attributes, the requirements and properties can be harmonized across all levels of the subsequent layout planning. This enables, for instance, an arrangement behavior comparable to that of the »Quadratic Assignment Problem«, but now extending across multiple levels and therefore complying with the requirements of scalability.

The newly developed approach was considerably improved in several respects as compared to the previous method to better **represent the relationships** between the area elements. On the one hand, it supports the modeling of three basically different types of relationships, namely exchange relationships (e.g. material or information exchange), requirements relationships (e.g. requirements of specific area characteristics such as safe floor load or indoor climate) and assignment relationships (structural or organizational interdependencies). Since planning the layout of the modeled area elements requires to define the orientation (0-dimensional), the distances or clearances (1-dimensional), as well as the areas or cutting areas (2-dimensional), specific relationships are built for each of the three different dimensions. These relationship constructs can be modeled either as targets or as constraints. The targets are usually incorporated in a target value that characterizes the overall layout and describes the quality of the layout. The constraints, however, are individually checked to ensure that they are met. The non-fulfillment of a single constraint is sufficient to produce an invalid overall layout. For modeling the targets and constraints either a converging respectively centralizing or a diverging respectively decentralizing logic can be used. The relationships can be modeled either in 1:1 logic or in 1:m and/or n:m logic. The 1:1 logic is explicitly used for the relationship between two specific area elements. With 1:m and/or n:m logic this is different. Here, the logic of the free attributes is used to establish the relationship between multiple area elements. For instance, it might be necessary to install a machine inside a crane area with sufficient load capacity. However, in which of the available crane areas the machine is actually installed, does not matter (1:m logic). The complete relationship system is the key parameter influencing the relative arrangement of the area elements within the framework of layout planning. Even the relationships have their own comprehensive set of attributes that apply across all levels, comparable to the area elements. This attribute set comprises specific methods to determine the geometric layout parameters in the arrangement, evaluate the individual relationships, and combine them to the superior target value. Even the attribute set of the relationships includes free attributes to be accessed by the different methods.

All the different constructs and logics associated with the targets and constraints can be accessed by the **expanded and improved evaluation logic**. It is comprised of the different types of relationships (exchange, requirement, assignment), the dimen-

sions (0-, 1- and 2-dimensional), the convergence behavior (centralized or decentralized), and the logic of the relationships (1:1, 1:m, or n:m). Alternative methods can be used to calculate the relevant layout parameters (e.g. measuring the direct Euclidean distances, the rectangular distances, or along aisles). The main feature of the improved evaluation logic, however, is that it applies a free method language (comparable to a programming language) which allows to freely define extremely individual and problem-specific evaluation methods. The method language allows to freely access all attributes and layout parameters of each model and their individual links and also takes into account, for instance, conditions defined for specific planning cases. Thus, all aspects relevant to the layout are accessible for evaluation.

The logic of the newly developed approach allows controlling the **arrangement behavior** to suit the specific requirements of the planning task. The arrangement behavior is mainly controlled by the two-dimensional relationship constructs which, above all, adapt it to the requirements of the currently processed subtask of layout planning. For example, if the task set out in planning the general structure is to arrange high-level functional areas within a factory building with a given grid of supports, it is usually not taken into account if these area elements overlap with any of the supports. In other words, the overlapping of functional areas with individual supports does not lead to an invalid layout. This procedure definitely makes sense, assuming that potential collisions with supports can be avoided in the next more detailed planning step. However, in the next step, where the equipment layout is planned, the overlapping of production equipment and supports is usually not permissible. Such a differentiated arrangement behavior can be accomplished either by two-dimensional constraints or with the attribute logic. The planner can adapt the basic characteristics of the arrangement behavior at any time.

The procedure adopted in this research helped to demonstrate that the shortcomings of the plants associated with the spatial layout are primarily due to deficiencies in the modeling method underlying the layout planning (chap. 1.2).

To ensure that - despite changing overall success factors - future requirements are met in a continuous and sustainable way, it was first looked into the drivers of change. The internal drivers of change in the manufacturing plants were derived from

the drivers of change in the markets. Here, special attention was paid to factory and layout planning as it plays a crucial role in ensuring the maximum possible adaptability. Major planning trends were taken into account, for instance the move away from one-off planning towards continuous planning, the merging of technical and economic aspects, and the holistic view from a resource and process perspective, but also the consideration of details of the relevant products. Hence, the modeling method plays an important part in layout planning as it is expected to provide a sound basis for decision-making by contributing the best possible support (chap. 2).

In the next section, the specified requirements of the layout planning task and the resulting planning objectives of the modeling approach were integrated with the general guidelines of modeling (GoM). To those were added the requirements derived from the scalability of the modeling approach (chap. 3). The complete set of requirements served as a basis for analyzing and describing the state-of-the-art and for developing the new approach.

To review the state-of-the-art in the literature, about 100 modeling methods were analyzed. To this end, the methods were grouped into different classes considered as sufficiently homogeneous regarding the specified requirements. It could be proved that all classes of methods display substantial deficiencies with regard to the specified requirements (chap. 4).

The next chapter provides a general description of the solution. It focuses especially on the above-mentioned improvements introduced by the new approach (chap. 5). Then, the improvements are described in greater detail from a structural point of view (chap. 6) and in terms of the logic resulting from this structure (chap. 7). The last development step analyzed how the improved approach integrates with the planning workflow, before modifying the previous planning processes in a way that supports the new approach in the best possible way (chap. 8).

The newly developed approach was finally tested in an industrial case study to confirm the improvements (chap. 9). The proof was carried out in three steps. Firstly, independent disjoint scenarios were used to prove the increased cardinality of the approach. Secondly, it was proven that the different planning subtasks can be inte-

grated across all hierarchical levels into one model. The third and last step demonstrated that the planning viewpoint can be freely modified as required by scalable modeling or planning.

Finally, a critical appraisal of the new approach for modeling manufacturing facilities for the purpose of layout planning was undertaken. The aspects explained in this context also showed that future developments are required that go beyond this work. The newly developed approach can therefore serve as the research condensation nucleus for future scientific work.

12 Literaturverzeichnis

- Abdinnour-Helm 2000 Abdinnour-Helm, S.; Hadley, S. W.:
Tabu Search Based Heuristics for Multiple-Floor Layout.
In: International Journal of Production Research 38
(2000), Nr. 2, S. 365-383.
- Aggteleky 1987 Aggteleky, B.:
Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisie-
rung, Band 1. 2., durchges. Aufl.
München, Wien: Hanser, 1987.
- Aggteleky 1990a Aggteleky, B.:
Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisie-
rung, Band 2. 2., vollst. überarb. und erw. Neuaufl.
München; Wien: Hanser, 1990.
- Aggteleky 1990b Aggteleky, B.:
Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisie-
rung, Band 3. Neuauflage.
München; Wien: Hanser, 1990.
- Ahlers 2002 Ahlers, R.-J.; u. a.:
Veränderungen zum Erfolg führen – Qualitätsgerechte
Gestaltung strategischer Veränderungsprozesse.
In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Per-
spektiven, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium,
6.-7.6.2002. Eversheim, W.; u. a. (Hrsg.). Aachen: Shaker,
2002, S. 41-72.
- Ahmad 2006 Ahmad, A.-R.; u. a.:
An Efficient, Effective, and Robust Decoding Heuristic for
Metaheuristics-Based Layout Optimization.
In: International Journal of Production Research 44
(2006), Nr. 8, S. 1545-1567.
- Aiello 2001 Aiello, G.; Enea, M.:
Fuzzy Approach to the Robust Facility Layout in Uncertain
Production Environments.
In: International Journal of Production Research 39
(2001), Nr. 18, S. 4089-4101.

- Aiello 2002 Aiello, G.; Enea, M.; Galante, G.:
An integrated Approach to the Facilities and Material Handling Design.
In: International Journal of Production Research 40 (2002), Nr. 15, S. 4007-4017.
- Al-Araidah 2006 Al-Araidah, O.; Krishnamurthy; A.; Malmborg, C. J.:
A Two-Stage Simulated Annealing Procedure for Block Layout Problems.
In: International Journal of Production Research 44 (2006), Nr. 20, S. 4417-4429.
- Al-Hakim 2000 Al-Hakim, L.:
On Solving Facility Layout Problems Using Genetic Algorithms.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 11, S. 2573-2582.
- Al-Hakim 2001 Al-Hakim, L.:
A Note on "Efficient Facility Layout Planning in a Maximally Planar Graph Model".
In: International Journal of Production Research 39 (2001), Nr. 7, S. 1549-1556.
- Anjos 2006 Anjos, M. F.; Vannelli, A.:
A New Mathematical-Programming Framework for Facility-Layout Design.
In: INFORMS Journal on Computing 18 (2006), Nr. 1, S. 111-118.
- ArbStätt 1988 ArbStätt 5.017.1,2; Arbeitsstättenrichtlinie ASR 17/1,2; Verkehrswege; Ausgabe Januar 1988.
http://www.gaa.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16486/5_017_1_2.pdf
(15.08.2008).
- Arthur D. Little 2000 Arthur D. Little International Inc.:
Chancen für Bayern. Bayern 2020. Megatrends und deren Bedeutung für die Wirtschaftsentwicklung des Freistaates Bayern. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie.
Erschienen am 21.02.2000.
<http://www.stmwvt.bayern.de/index.html?target=/wirtschaft/gesamt.html>
(02.05.2002).

- Asef-Vaziri 2000 Asef-Vaziri, A.:
The Block Layout Shortest Loop Design Problem.
In: IIE Transactions 32 (2000), Nr. 8, S. 727-734.
- Azadivar 2000 Azadivar, F.; Wang, J.:
Facility Layout Optimization Using Simulation and Genetic Algorithms.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 17, S. 4369-4383.
- Balakrishnan 1998 Balakrishnan, J.; Cheng, C. H.:
Dynamic Layout Algorithms: A State-of-the-art Survey.
In: OMEGA International Journal of Management Science 26 (1998), Nr. 4, S. 507-521.
- Balakrishnan 2000 Balakrishnan, J.; Cheng, C. H.; Conway, D. G.:
An Improved Pair-wise Exchange Heuristic for the Dynamic Plant Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 13, S. 3067-3078.
- Barbosa-Póvoa 2001 Barbosa-Póvoa, A. P.; Mateus, R.; Novais, A. Q.:
Optimal Two-dimensional Layout of Industrial Facilities.
In: International Journal of Production Research 39 (2001), Nr. 12, S. 2567-2593.
- Barbosa-Póvoa 2002 Barbosa-Póvoa, A. P.; Mateus, R.; Novais, A. Q.:
Optimal 3D Layout of Industrial Facilities.
In: International Journal of Production Research 40 (2002), Nr. 7, S. 1669-1698.
- Bartolomei-Suárez 2000 Bartolomei-Suárez, S. M.; Egbelu, P. J.:
Quadratic Assignment Problem QAP with Adaptable Material Handling Devices.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 4, S. 855-873.
- Baykasoglu 2003 Baykasoglu, A.:
Capability-Based Distributed Layout Approach for Virtual Manufacturing Cells.
In: International Journal of Production Research 41 (2003), Nr. 11, S. 2597-2618.

- Bazargan-Lari 1997 Bazargan-Lari, M.; Kaebernick, H.:
An Approach to the Machine Layout Problem in a Cellular
Manufacturing Environment.
In: Production Planning & Control 8 (1997), Nr. 1,
S. 41-55.
- Bazargan-Lari 2000 Bazargan-Lari, M.; Kaebernick, H.; Harraf, A.:
Cell Formation and Layout Design in a Cellular Manufac-
turing Environment - a Case Study.
In: International Journal of Production Research 38
(2000), Nr. 7, S. 1689-1709.
- Bea 1992 Bea, F. X.; Dichtl, E.; Schweitzer, M. (Hrsg.):
Allgemeine Betriebswirtschaftslehre.
Band 1: Grundfragen. 6., neu bearb. Aufl.
Stuttgart; Jena: G. Fischer, 1992.
- Bea 1993 Bea, F. X.; Dichtl, E.; Schweitzer, M. (Hrsg.):
Allgemeine Betriebswirtschaftslehre.
Band 2: Führung. 6., neu bearb. Aufl.
Stuttgart; Jena: G. Fischer, 1993.
- Bea 1994 Bea, F. X.; Dichtl, E.; Schweitzer, M. (Hrsg.):
Allgemeine Betriebswirtschaftslehre.
Band 3: Leistungsprozess. 6., neu bearb. Aufl.
Stuttgart; Jena: G. Fischer, 1994.
- Becker 1991 Becker, B.-D.:
Ein gegenstandsorientiertes Simulationssystem mit para-
metrisierter Netzwerkmodellierung für Fertigungsprozesse
mit Stückgutcharakter.
Berlin, u. a.: Springer, 1991.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 154).
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 1990.
- Becker 1998 Becker, J.; Ehlers, L.; Schütte, R.:
Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Konzeption,
Vorgehensmodell, technische Realisierung, Nutzen.
In: Softwaretechnologie: Statusseminar des BMBF,
23./24.3.1998 in Bonn / Projektträger Informationstechnik
des BMBF beim DLR e.V.
Berlin, 1998, S. 63-98.

- Becker 2000
 Becker, J.; u. a.:
 Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM).
 Sachbericht zum Abschluss des Projektes 01 IS 604 # des
 BMBF vom 23. März 2000.
http://www-wi.uni-muenster.de/is/projekte/gom/Abschlussbericht/GOM_Schlussbericht.pdf
 (05.08.2006).
- Benjaafar 2000a
 Benjaafar, S.; Sheikhzadeh, M.:
 Design of Flexible Plant Layout.
 In: IIE Transactions 32 (2000), Nr. 4, S.309-322.
- Benjaafar 2000b
 Benjaafar, S.; Irani, S. A.; Heragu, S. S.:
 Next Generation Factory Layouts: Research Challenges
 and Recent Progress.
 In: Technical Report No. 38-00-482 Decision Sciences
 and Engineering Systems Department (DSES),
 Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- Benjaafar 2002
 Benjaafar, S.; Heragu, S. S.; Irani, S. A.:
 Next Generation Factory Layouts: Research Challenges
 and Recent Progress.
 In: Interfaces 32 (2002), Nr. 6, S. 58-76.
- Berg 1999
 Berg, I.; Hanff, R.:
 "Visuell-interaktive Fabrikplanung durch Nutzung der vir-
 tuellen Realität".
 In: Logistik im Unternehmen 13 (1999), Nr. 3, S. 40-41.
- Bergholz 2002
 Bergholz, M.; u. a.:
 Die Fabrik von morgen: vernetzt und wandlungsfähig !
 In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Per-
 spektiven, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium,
 6.-7-6.2002. Eversheim, W.; u. a. (Hrsg.). Aachen: Shaker,
 2002, S. 73-96.
- Beumelburg 2005
 Beumelburg, K.:
 Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direk-
 ten Mensch-Roboter-Kooperation.
 Heimsheim: Jost-Jetter, 2005
 (IPA-IAO Forschung und Praxis; 413).
 Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 2005.

- Bischoff 2001 Bischoff, J.:
Die Fabrik: Planung, Betrieb und Wandlungsfähigkeit.
In: Das große Handbuch Produktion / Burckhardt, W.
(Hrsg.). Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 2001, S. 201-
249.
- Bley 2001 Bley, H.; Franke, C.:
Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe
der Digitalen Fabrik.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 4,
S. 214-220.
- BMBF 2006 Bundesministerium für Bildung und Forschung:
Glossar zum Förderprogramm IT-Forschung 2006, S. 64-
69;
http://www.bmbf.de/pub/it-forschung_2006.pdf (14.10.2008).
- Bölte 1994 Bölte, A.:
Modelle und Verfahren zur innerbetrieblichen Standortpla-
nung.
Heidelberg: Physica, 1994.
(Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft; 48).
Zugl. Paderborn, Univ., Diss., 1994.
- Bogatzki 1998 Bogatzki, A.:
Fabrikplanung: Verfahren zur Optimierung der Maschi-
nenaufstellung.
Regensburg: Roderer, 1998.
(Theorie und Forschung; 534, Wirtschaftswissenschaften;
52).
Zugl. Wuppertal, Univ., Diss., 1998.
- Bozer 1997 Bozer, Y. A.; Meller, R. D.:
A Re-examination of the Distance-Based Facility Layout
Problem.
In: IIE Transactions 29 (1997), Nr. 7, S. 549-560.
- Braglia 1997 Braglia, M.:
Heuristics for Single-Row Layout Problems in Flexible
Manufacturing Systems.
In: Production Planning & Control 8 (1997), Nr. 6,
S. 558-567.

- Braglia 2005 Braglia, M.; Zanoni, S.; Zavanella, L.:
Robust versus Stable Layout Design in Stochastic Environment.
In: Production Planning & Control 16 (2005), Nr. 1,
S. 71-80.
- Briel 2002 Briel, R. von:
Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen.
Heimsheim: Jost-Jetter, 2002.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 352).
Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 2002.
- Brockhaus 1999 Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 24 Bänden.
20., neu bearb. Aufl.
Leipzig, Mannheim: F.A. Brockhaus 1999.
- Brusco 2004 Brusco, M. J.:
Optimal Solution Methods for the Minimum-Backtracking Row Layout Problem.
In: IIE Transactions 36 (2004), Nr. 2, S. 181-189.
- Bukchin 2006 Bukchin, Y.; Meller, R. D.; Liu, Q.:
Assembly System Facility Design.
In: IIE Transactions 38 (2006), Nr. 1, S. 67-79.
- Castillo 2002a Castillo, I.; Peters, B. A.:
Unit Load and Material-Handling Considerations in Facility Layout Design.
In: International Journal of Production Research 40 (2002), Nr. 13, S. 2955-2990.
- Castillo 2002b Castillo, I.; Sim, T.:
A Spring-Embedding Approach for the Facility Layout Problem.
http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2002/12/577.pdf (14.10.2008)
- Castillo 2002c Castillo, I.; Peters, B. A.:
Integrating Design and Production Planning Considerations in Multi-Bay Manufacturing Facility Layout.
http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2002/12/576.pdf (14.10.2008)

- Castillo 2003 Castillo, I.; Peters, B. A.:
An Extended Distance-Based Facility Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 41
(2003), Nr. 11, S. 2451-2479.
- Chae 2006 Chae, J.; Peters, B. A.:
A Simulated Annealing Algorithm Based on a Closed Loop
for Facility Layout Design in Flexible Manufacturing Sys-
tems.
In: International Journal of Production Research 44
(2006), Nr. 13, S. 2561-2572.
- Chan 2004 Chan, W. M.; Chan, C. Y.; Kwong, C. K.:
Development of the MAIN Algorithm for a Cellular Manu-
facturing Machine Layout.
In: International Journal of Production Research 42
(2004), Nr. 1, S. 51-65.
- Chen, C.-W. 1999 Chen, C.-W.; Sha, D. Y.:
A Design Approach to the Multi-Objective Facility Layout
Problem.
In: International Journal of Production Research 37
(1999), Nr. 5, S. 1175-1196.
- Chen, C.-W. 2005 Chen, C.-W.; Sha, D. Y.:
Heuristic Approach for Solving the Multi-Objective Facility
Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 43
(2005), Nr. 21, S. 4493-4507.
- Chen, D.-S. 2001 Chen, D.-S.; Wang, Q.; Chen, H. C.:
Linear Sequencing for Machine Layouts by a Modified
Simulated Annealing.
In: International Journal of Production Research 39
(2001), Nr. 8, S. 1721-1732.
- Chiang 2001 Chiang, W.-C.:
Visual Facility Layout Design System.
In: International Journal of Production Research 39
(2001), Nr. 9, S. 1811-1836.

- Dangelmaier 1986 Dangelmaier, W.:
Algorithmen und Verfahren zur Erstellung innerbetrieblicher Anordnungspläne.
Berlin, u. a.: Springer, 1986.
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 89)
Zugl. Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1985.
- Deb 2003 Deb, S. K.; Bhattacharyya, B.:
Facilities Layout Planning Based on Fuzzy Multiple Criteria Decision-Making Methodology.
In: International Journal of Production Research 41 (2003), Nr. 18, S. 4487-4504.
- Deb 2005 Deb, S. K.; Bhattacharyya, B.:
Solution of Facility Layout Problems with Pickup / Drop-Off Locations Using Random Search Techniques.
In: International Journal of Production Research 43 (2005) Nr. 22, S. 4787-4812.
- Delmia 2006 Dassault / Delmia: PPR Hub, Process Engineer, Layout Planner bzw. Plant Layout.
Fellbach, 2006 – Produktbroschüren.
<http://www.delmia.de/> (27.07.2006).
- Djellab 2001 Djellab, H.; Gourgand, M.:
A New Heuristic Procedure for the Single-Row Facility Layout Problem.
In: Computer Integrated Manufacturing Systems 14 (2001), Nr. 3, S. 270-280.
- Dimopoulos 2000 Dimopoulos, C.; Zalzala, A. M. S.:
Recent Developments in Evolutionary Computation for Manufacturing Optimization: Problems, Solutions and Comparisons.
In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation 4 (2000), Nr. 2, S. 93-113.
- Dombrowski 2001 Dombrowski, U.; Tiedemann, H.; Bothe, T.:
Auf dem Weg zur Digitalen Fabrik.
In: Virtualisierung und Virtualität: Sonderheft der TU Braunschweig (2001), S. 44-51.

- Domschke 1993 Domschke, W.:
Standortplanung, innerbetriebliche.
In: Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre: Band 2
Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Teilband 3; R-Z.
Wittmann, W. (Hrsg.). 5., völlig neu gestalt. Aufl.
Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993, S. 3950-3962.
- Domschke 1997 Domschke, W.; Krispin, G.:
Location and Layout Planning – A Survey.
In: OR Spektrum 19 (1997), Nr. 3, S. 181-194.
- Dowidat 2001 Dowidat, A.; Honsack, D.; Zeeb, H.:
Anwendungserfahrungen zur Digitalen Fabrik.
In: FB/IE 50 (2001), Nr. 4, S. 185-187.
- Drira 2006 Drira, A.; Pierreval, H.; Hajri-Gabouj, S.:
Facility Layout Problems: A Literature Analysis.
In: Proceedings of the 12th IFAC / IFIP / IFORS / IEEE /
IMS Symposium Information Control Problems in Manu-
facturing - INCOM 2006, 17.-19. Mai 2006, St.-Etienne,
Frankreich, S. 389-400.
- Dürschmidt 1997 Dürschmidt, S.; Dohmen, W.:
Schnittstellenplanung: Wandlungsfähig im Layout.
In: Logistik Heute 19 (1997), Nr. 11, S. 61-63.
- Duden 2003a Duden - Deutsches Universalwörterbuch A-Z.
5., überarb. Aufl.
Mannheim, u. a.: Dudenverlag, 2003.
- Duden 2003b Duden - Das Große Fremdwörterbuch.
Mannheim, u. a.: Dudenverlag 2003.
- Dunker 2003 Dunker, T.; Radons, G.; Westkämper, E.:
A Co evolutionary Algorithm for a Facility Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 41
(2003), Nr. 15, S. 3479-3500.
- Eversheim 2001 Eversheim, W.:
Die Einmalaufgabe mausert sich zum Dauerprozess.
In: Industrieanzeiger 123 (2001), Nr. 40, S. 76.

- Fauser 2006 Fauser AG: JobDISPO FAP: Fabrik-, Materialfluss- und Layoutplanung parallel zum Betrieb Ihrer Produktion. Gilching – Produktinformation.
http://www.fauser-ag.com/downloads/prospekte/jobdispo_fap-flyer.pdf (05.08.2006).
- Ferrari 2003 Ferrari, E.; u. a.:
Plant Layout Computerised Design: Logistic and Relayot Program (LRP).
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 21 (2003), Nr. 12, S. 917-922.
- Förster 2001 Förster, A.; Wirth, S.; Gäse, Th.:
Integrative modulare Produktionssystemplanung – Ein neuer methodischer Ansatz der rechnergestützten Planung.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001) Nr. 4, S. 221-228.
- Foulds 1997 Foulds, L. R.:
LayoutManager: A Microcomputer-Based Decision Support System for Facilities Layout.
In: Decision Support Systems 20 (1997), Nr. 3, S. 199-213.
- Foulds 1998 Foulds, L. R.; Hamacher, H. W.; Wilson, J. M.:
Integer Programming Approaches to Facilities Layout Models with Forbidden Areas.
In: Annals of Operations Research 81 (1998), Nr. 0, S. 405-417.
- Gabler 1993 Gabler-Wirtschafts-Lexikon.
Taschenbuch-Kassette mit 8 Bd.
13., vollst. überarb. Aufl.
Wiesbaden: Gabler, 1993.
- Gäse 2005 Gäse, T.; u. a.:
Kooperative Planung in Netzwerken mit visTABLE.
In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Nr. 4, S. 205-209.

- Gäse 2006 Gäse, T.; Günther, U.; Krauß, A.:
Integrierte Struktur- und Layoutplanung.
In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006) Nr. 5,
S. 314-320.
- Gau 1999 Gau, K.-Y.; Meller, R. D.:
An Iterative Facility Layout Algorithm.
In: International Journal of Production Research 37
(1999), Nr. 16, S. 3739-3758.
- Grundig 2000 Grundig, C.-G.:
Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwen-
dungen.
München; Wien: Hanser, 2000.
- Günther 2005 Günther, U.:
Methodik zur Struktur- und Layoutplanung wandlungsfähiger
Produktionssysteme.
Chemnitz: IBF, 2005
(Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Chemnitz; 50).
Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005.
- Hamamoto 1999 Hamamoto, S.; Yih, Y; Salvendy, G.:
Development and Validation of Genetic Algorithm-Based
Facility Layout - a Case Study in the Pharmaceutical In-
dustry.
In: International Journal of Production Research 37
(1999), Nr. 4, S. 749-768.
- Hardin 2005 Hardin, C. T.; Usher, J. S.:
Facility Layout Using Swarm Intelligence.
In: 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium SIS-05 Pro-
ceedings, 8.-10.06.2005 in Pasadena/CA, USA,
S. 424-427.
- Hassan 1987 Hassan, M. M. D.; Hoog, G. L.:
A Review of Graph Theory Application to the Facilities
Layout Problem.
In: OMEGA: The International Journal of Management Sci-
ence 15 (1987), Nr. 4, S. 291-300.

- Hassan 2000 Hassan, M. M. D.:
Towards Re-Engineering Models and Algorithms of Facility Layout.
In: OMEGA: The International Journal of Management Science 28 (2000) Nr. 6, S. 711-723.
- Heragu 2001 Heragu, S. S.; u. a.:
Design and Analysis of Reconfigurable Layout Systems.
In: Memorandum, Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente (2001) Nr. 1604, 24 S.
- Hicks 2006 Hicks, C.:
A Genetic Algorithm Tool for Optimising Cellular or Functional Layouts in the Capital Goods Industry.
In: International Journal of Production Economics 104 (2006) Nr. 2, S. 598-614.
- Hnida 2001 Hnida, U.:
Die digitale Fabrik schafft Mehrwert.
In: Handelsblatt (2001) Nr. 075 vom 18.4.2001, Beilage Hannover Messe , S.6.
- Ho 2000 Ho, Y.-C.; Moodie, C. L.:
A Hybrid Approach for Concurrent Layout Design of Cells and their Flow Paths in a Tree Configuration.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 4, S. 895-928.
- Hoitsch 1993 Hoitsch, H.-J.:
Produktionsplanung.
In: Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre: Band 2 Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Teilband 2; I-Q. Wittmann, W. (Hrsg.). 5., völlig neu gestalt. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993, S. 3450-3467.
- Hu 2004 Hu, M. H.; Wang, M.-J.:
Using Genetic Algorithms on Facilities Layout Problems.
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 23 (2004), Nr. 3/4, S. 301-310.
- Huang 2003 Huang, S.; Batta, R.; Nagi, R.:
Variable Capacity Sizing and Selection of Connections.
In: IIE Transactions 35 (2003), Nr. 1, S. 49-59.

- IAF 2008
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Arbeitswissenschaft ... IAF: FACTOTUM – Factory Tool and Tuning Master.
 Magdeburg – Produktinformation.
http://www.uni-magdeburg.de/iaf/kuehnle/documents/factotum_flyer.pdf
 (12.09.2008).
- IBAB 2006
 IBAB der Technische Universität Wien: FALOP – Fabrik-Layout-Optimierung.
 Wien - Produktinformation.
http://www.matyas.at/f_layoutpl.html (04.08.2006).
- IFP 2006
 IFP GmbH: MATFLOW – Fabrik- und Logistikplanung.
 München – Leistungsbeschreibung.
<http://www.ifp-gmbh.de/deutsch/produktionsplanung.htm> (04.08.2006).
- IPA-FhG 2007a
 Fraunhofer IPA: Referenzprojekte Abteilung Fabrikplanung und Produktionsmanagement (2007).
<http://www.ipa.fhg.de/Arbeitsgebiete/fabrik-produktionsmanagement/ref/>
 (08.03.2007).
- IPA-FhG 2007b
 Fraunhofer IPA: i-Plant Referenzen (2007).
<http://www.i-plant.de/> (08.03.2007).
- Irvine 1997
 Irvine, S. A.; Rinsma-Melchert, I.:
 A new approach to the block layout problem.
 In: International Journal of Production Research 35
 (1997), Nr. 8, S. 2359-2376.
- Islier 1998
 Islier, A. A.:
 A Genetic Algorithm Approach for Multiple Criteria Facility Layout Design.
 In: International Journal of Production Research 36
 (1998), Nr. 6, S. 1549-1569.
- Jaramillo 2004
 Jaramillo, J. R.; McKendall, A. R.:
 Dynamic Extended Facility Layout Problem.
 In: IIE Annual Conference and Exhibition Houston, TX,
 May 15-19. Norcross: IIE, 2004, S. 1391-1396.

- John 2000 John, E. G.; Hammond, J.:
Maximally Weighted Graph Theoretic Facilities Design
Planning.
In: International Journal of Production Research 38
(2000), Nr. 16, S. 3845-3860.
- Jünemann 1999 Jünemann, R.:
Logistiksysteme.
In: Betriebshütte – Produktion und Management;
3. Gestaltung von Produktionssystemen.
Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.).
Berlin, u. a.: Springer, 1999, S. 16-1 bis 16-117.
- Kapp 2003 Kapp, R.; u. a.:
Der Logistik-Prüfstand - Skalierbare Logistiksimulation von
der Lieferkette bis zum Arbeitsgang.
In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003), Nr. 1/2,
S. 31-38.
- Kettner 1984 Kettner, H; Schmidt, J.; Greim, H.-R.:
Leitfaden der systematischen Fabrikplanung.
München; Wien: Hanser, 1984.
- Kim 2000 Kim, J.-G.; Kim, Y.-D.:
Layout Planning for Facilities with Fixed Shapes and Input
and Output Points.
In: International Journal of Production Research 38
(2000), Nr. 18, S. 4635-4654.
- Kim 2005 Kim, J.-G.; Goetschalckx, M.:
An Integrated Approach for the Concurrent Determination
of the Block Layout and the Input and Output Point Loca-
tions Based on Contour Distance.
In: International Journal of Production Research 43
(2005), Nr. 10, S. 2027-2047.
- Kobayashi 2001 Kobayashi, M.; u. a.:
Floor Layout Planning Method Based on Self-
Organization.
In: 2001 IEEE International Symposium on Semiconductor
Manufacturing Conference Proceedings, 8.-10.10.2001 in
San Jose California, USA. Piscataway, N.J.: IEEE, 2001
S. 381-384.

- Kochhar 1999 Kochhar, J.; Heragu, S. S.:
Facility Layout Design in a Changing Environment.
In: International Journal of Production Research 37
(1999), Nr. 11, S. 2429-2446.
- Koren 1999 Koren, Y.; u. a.:
Reconfigurable Manufacturing Systems.
In: Annals of CIRP 48 (1999) Nr.2, S. 527-540.
- Kouvelis 1992 Kouvelis, P.; Chiang, W.-C.; Fitzsimmons, J.:
Simulated Annealing for Machine Layout Problems in the
Presence of Zoning Constraints.
In: European Journal of Operational Research 57 (1992),
Nr. 2, S. 203-223.
- Kulturel-Konak 2004 Kulturel-Konak, S.; Smith, A. E.; Norman, B. A.:
Layout Optimization Considering Production Uncertainty
and Routing Flexibility.
In: International Journal of Production Research 42
(2004), Nr. 21, S. 4475-4493.
- Kusiak 1987 Kusiak, A.; Heragu, S. S.:
The Facility Layout Problem.
In: European Journal of Operational Research 29 (1987),
Nr. 3, S. 229-251.
- Lacksonen 1997 Lacksonen, T. A.:
Pre-processing for Static and Dynamic Facility Layout
Problems.
In: International Journal of Production Research 35
(1997), Nr. 4, S. 1095-1106.
- Lahmar 2005 Lahmar, M.; Benjaafar, S.:
Design of Distributed Layouts.
In: IIE Transactions 37 (2005), Nr. 4, S. 303-318.
- Lee, G. H. 2001 Lee, G. H.:
Design of Components and Layout of Machines for Mate-
rial Handling.
In: International Journal of Advanced Manufacturing Tech-
nology 17 (2001), Nr. 5, S. 371-382.

- Lee, S.-D. 2001 Lee, S.-D.; Huang, K.-H.; Chiang, C.-P.:
Configuring Layout in Unidirectional Loop Manufacturing
Systems.
In: International Journal of Production Research 39
(2001), Nr. 6, S. 1183-1202.
- Liggett 2000 Liggett, R. S.:
Automated Facilities Layout: Past, Present and Future.
In: Automation in Construction 9 (2000), Nr. 2, S. 197-215.
- Linner 1999 Linner, S.; Geyer, M.; Wunsch, A.:
Optimierte Prozesse durch Digital Factory Tools.
In: Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik,
Tagung Berlin, 9. und 10. September 1999 (VDI-Berichte;
1489), S. 187-198.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1999.
- Logendran 2006 Logendran, R.; Kriausakul, T.:
A Methodology for Solving the Unequal Area Facility Lay-
out Problem Using Distance and Shape-Based Measures.
In: International Journal of Production Research 44
(2006), Nr. 7, S. 1243-1272.
- Mak 1998 Mak, K. L.; Wong, Y. S.; Chan, F. T. S.:
A Genetic Algorithm for Facility Layout Problems.
In: Computer Integrated Manufacturing Systems 11
(1998), Nr. 1/2, S. 113-127.
- Matyas 1999 Matyas, K.:
Fabriklayoutplanung aus dem PC.
In: io Management 68 (1999), Nr. 7/8, S. 65-68.
- McKendall 1999 McKendall, A. R.; Noble, J. S.; Klein, C. M.:
Facility Layout of Irregular-Shaped Departments Using a
Nested Approach.
In: International Journal of Production Research 37
(1999), Nr. 13, S. 2895-2914.
- Meier 2007 Meier, H.; Quade, N.:
Planungsunterstützung durch Integration hierarchischer
Modelle in das System der »Digitalen Fabrik«.
In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr. 1/2,
S. 25-29.

- Meller 1996a Meller, R. D.; Gau, K.-Y.:
The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives.
In: Journal of Manufacturing Systems 15 (1996), Nr. 5, S. 351-366.
- Meller 1996b Meller, R. D.; Gau, K.-Y.:
Facility Layout Objective Functions and Robust Layouts.
In: International Journal of Production Research 34 (1996), Nr. 10, S. 2727-2742.
- Meller 1997a Meller, R. D.:
The Multi-Bay Manufacturing Facility Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 35 (1997), Nr. 5, S. 1229-1237.
- Meller 1997b Meller, R. D.; Bozer, Y. A.:
Alternative Approaches to Solve the Multi-Floor Facility Layout Problem.
In: Journal of Manufacturing Systems 16 (1997), Nr. 5, S. 351-366.
- Meller 2004 Meller, R. D.; Kleiner, B. M.; Nussbaum, M. A.:
The Facility Layout Problem: A New Model to Support a Bottom-Up Approach to Facility Design.
In: Material Handling Institute (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Material Handling Research Colloquium, Graz/A, 13.-17. Juni 2004 (Progress in Material Handling Research 2004). Charlotte/USA: 2004, S. 285-299.
- Meller 2006 Meller, R. D.; Chen, W.; Sherali, H. D.:
Enhancing the Solution of Optimal Facility Layout Design Problems through a Sequence-Pair Representation.
Unveröffentlichtes Arbeitspapier des Verfassers (inhaltlich ähnlich zur Präsentation: A New Facility Layout Formulati-on auf der Informs 2005, San Francisco/USA, 13.-16. November 2005).
- Meng 2004 Meng, G.; Heragu, S. S.; Zijm, H.:
Reconfigurable Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 42 (2004), Nr. 22, S. 4709-4729.

- Meyr 2002 Meyr, C.:
 Marktstudie zur generativen-automatisierten Fabrikplanung.
 Hamburg: Diplomica, 2002.
 Zugl. Ulm, FH, Dipl.-Arbeit, 2002.
- Montreuil 2004a Montreuil, B.; u. a.:
 Antzone Layout Metaheuristic: Coupling Zone-Based Layout Optimization, Ant Colony System and Domain Knowledge.
 In: Material Handling Institute (Hrsg.): Progress in Material Handling Research 2004: 8th International Material Handling Research Colloquium, Graz, A, 13.-17. Juni 2004. Charlotte/USA, 2004, S. 301-331.
- Montreuil 2004b Montreuil, B.; u. a.:
 Exploring the Potential of an Ant Colony Metaheuristics for Facility Layout Optimization.
 Präsentations-Folien INFORMS 2004, Denver/USA, 24.-27. Oktober 2004.
- Moscoso 1999 Moscoso, P. G.:
 Managementsysteme für die Shop-Floor Logistik: Eine modellbasierte Gestaltungsmethodik.
 Zürich, ETH, Diss. Nr. 13295, 1999.
- Müller 2003 Müller, E.; Gäse, T.; Riegel, J.:
 Layoutplanung partizipativ und vernetzt.
 In: wt Werkstattstechnik online 93 (2003) Nr. 4, S. 266-270.
- Müller-Merbach 1976 Müller-Merbach, H.:
 Einführung in die Betriebswirtschaftslehre für Erstsemester.
 Vorlesungsmanuskript Technische Universität München; 2., Aufl.
 München: 1976.
- Özdemir 2003 Özdemir, G.; Smith, A. E.; Norman, B. A.:
 Incorporating Heterogeneous Distance Metrics within Block Layout Design.
 In: International Journal of Production Research 41 (2003), Nr. 5, S. 1045-1056.

- Paul 2006 Paul, R. C.; Asokan, P.; Prabhakar, V. I.:
A Solution to the Facility Layout Problem Having Passages and Inner Structure Walls Using Particle Swarm Optimization.
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 29 (2006) Nr. 7/8, S. 766-771.
- Pesch 1999 Pesch, E.; u. a.:
Efficient Facility Layout Planning in a Maximally Planar Graph Model.
In: International Journal of Production Research 37 (1999), Nr. 2, S. 263-283.
- Ponnambalam 2001 Ponnambalam, S. G.; Ramkumar, V.:
A Genetic Algorithm for the Design of a Single-Row Layout in Automated Manufacturing Systems.
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 18 (2001), Nr. 7, S. 512-519.
- Projecteam 2000 Projecteam GmbH & Co. KG:
FASTDESIGN Fabrikplanung.
Hattingen, o. J. – Produktinformation.
Automatisch anzufordern unter:
<http://www.projecteam.de/d/html/software/fastdesign.html> (15.9.2008).
- Rabe 2003 Rabe, M.:
Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation.
Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2003. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).
Zugl. Berlin, Univ., Diss., 2003.
- Reichardt 2001 Reichardt, J.:
Kommunikationsorientierte Fabrikstrukturen.
In: Fabrik 2005+: Agilität und Produktivität im Fokus.
3. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, am 3./4. April 2001 in Stuttgart.
Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 2001.
- Reinhart 2002 Reinhart, G.; u. a.:
Wandlungsfähige Fabrikgestaltung.
In: ZWF 97 (2002), Nr. 1/2, S. 18-23.

- Saad 2004 Saad, S. M.; Lassila, A. M.:
Layout Design in Fractal Organizations.
In: International Journal of Production Research 42
(2004), Nr. 17, S. 3529-3550.
- Sallaba 2000 Sallaba, G.; Gröpke, S.:
Fabrikplanung – eine permanente Managementfunktion.
In: ZWF 95 (2000), Nr. 7/8, S. 358-360.
- Salum 2000 Salum, L.:
The Cellular Manufacturing Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 38
(2000), Nr. 5, S. 1053-1069.
- Sarkar 2005 Sarkar, A.; Batta, R.; Nagi, R.:
Planar Area Location / Layout Problem in the Presence of
Generalized Congested Regions with the Rectilinear Dis-
tance Metric.
In: IIE Transactions 37 (2005), Nr. 1, S. 35-50.
- Scharf 2001 Scharf, P.:
Umfrage zu am Markt befindlichen Softwaretools für die
Fabrikplanung.
Universität-GH, Institut für Fertigungstechnik - Arbeits-
gruppe Fertigungsautomatisierung, Siegen: 2001.
<http://www.mb.uni-siegen.de/d/ift3/fabrikplanung/UmfrageFP.pdf>
(27.07.2006).
- Scheer 2003 Scheer, A.-W.; Thomas, O.; Wagner, D.:
Verfahren und Werkzeuge zur Unternehmensmodellie-
rung.
In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.
(Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen.
2., neu bearb. und erw. Aufl.
Berlin, u. a.: Springer, 2003.
- Schleyer 2006 Schleyer, M.:
Greedy Genetic Algorithm für das Quadratische Zuord-
nungsproblem.
In: Dokumentation Seminar Layoutplanung; Institut für
Anwendungen des Operations Research der Universität
Karlsruhe (Prof. Hammer / Schröder), erhalten 2006.

- Schmidt 2000 Schmidt, B. C.:
Produktionssysteme ganzheitlich gestalten.
In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert 1 (2000),
Nr. 1, S. 4-7.
- Schütte 1998 Schütte, R.:
Vergleich alternativer Ansätze zur Bewertung der Informationsmodellqualität.
In: Proceedings der Fachtagung GI-Fachgruppe 5.2.1 Modellierung betrieblicher Informationssysteme MobIS,
15./16. Oktober 1998 in Koblenz / Sinz, E. (Hrsg.), 16 S.
<http://www.wi-inf.uni-duisburg-essen.de/MobisPortal/pages/rundbrief/pdf/Schu98.pdf>
(16.9.2008).
- Schulte 2001 Schulte, H.:
Planung von Fabrikanlagen 1.
Vorlesungsmanuskript WS 2001/02: Universität / TH,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik
(wbk), Karlsruhe, 2001.
http://www-wbk.mach.uni-karlsruhe.de/index_de.html (20.05.2002).
- SFB 467 2006 Universität Stuttgart, IFF: Sonderforschungsbereich 467 -
Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen; Teilprojekt B2
– Dynamische Fabrikstrukturen.
<http://www.sfb467.uni-stuttgart.de/projekte/b2/tb2.html>
(07.08.2006).
- Sha 2001 Sha, D. Y.; Chen, C.-W.:
A New Approach to the Multiple Objective Facility Layout
Problem.
In: Integrated Manufacturing Systems 12 (2001), Nr. 1, S.
59-66.
- Shayan 2004 Shayan, E.; Chittilappilly, A.:
Genetic Algorithm for Facility Layout Problems Based on
Slicing Tree Structure.
In: International Journal of Production Research 42
(2004), Nr. 19, S. 4055-4067.
- Sherali 2003 Sherali, H. D.; Fraticelli, B. M. P.; Meller, R. D.:
Enhanced Model Formulations for Optimal Facility Layout.
In: INFORMS Operations Research 51 (2003), Nr. 4,
S. 629-644.

- Tavares 2002b Tavares, J.; Ramos, C.; Neves, J.:
A Constraint Programming and Evolutionary Hybrid Method for Facilities Layout Generation.
In: Proceedings of the 1st CIRP (UK) International Seminar on Digital Enterprise Technology, 16. / 17. September 2002 in Durham, S. 211-214.
<http://www.dur.ac.uk/det2002/proceedings/part3.pdf> (14.10.2008)
- Tecnomatix 2008a SIEMENS/Tecnomatix: FactoryFLOW.
Köln, 2008 – Produktinformation.
http://www.ugsplm.de/pdf/ueber_uns/material/tecomatix/FactoryFlow.pdf
(14.10.2008).
- Tecnomatix 2008b SIEMENS/Tecnomatix: Modellierung und Simulation von Menschen mit Jack.
Köln, 2008 – Produktinformation.
http://www.ugsplm.de/pdf/ueber_uns/material/tecomatix/Jack_Human.pdf
(14.10.2008).
- Tecnomatix 2008c SIEMENS/Tecnomatix: FactoryCAD.
Köln, 2008 – Produktinformation.
http://www.ugsplm.de/pdf/ueber_uns/material/tecomatix/FactoryCAD.pdf
(14.10.2008).
- TFB 059 2006 Universität Stuttgart, IFF: Transferbereich 059 - Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung; Teilprojekt TP2.
<http://www.tfb059.uni-stuttgart.de/teilprojekte/tp2/> (07.08.2006).
- Urban 2000 Urban, T. L.; Chiang, W.-C.; Russell, R. A.:
The Integrated Machine Allocation and Layout Problem.
In: International Journal of Production Research 38 (2000), Nr. 13, S. 2911-2930.
- VDI 3633 VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 Entwurf 2000-03:
Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen.
- Vollmer 2001 Vollmer, L.:
Logistik- und Strukturkonzepte für wandlungsfähige Fabriken.
In: Fördertechnik 70 (2001), Nr. 8, S. 24-25.

- Vollmer 2002 Vollmer, L.:
Virtualisierung und Digitalisierung bei der Fabrikplanung.
In: ZWF 97 (2002), Nr. 1/2, S. 24-27.
- Wäscher 1982 Wäscher, G.:
Innerbetriebliche Standortplanung bei einfacher und mehr-
facher Zielsetzung.
Wiesbaden: Gabler, 1982.
(Bochumer Beiträge zur Unternehmensführung und Un-
ternehmensforschung; 25).
- Warnecke 1992 Warnecke, H.-J.:
Das Fraktale Unternehmen.
2. Aufl.
Berlin, u. a.: Springer, 1992.
- Warnecke 1999 Warnecke, J. (Hrsg.):
Fabrikplanung.
In: Betriebshütte – Produktion und Management;
3. Gestaltung von Produktionssystemen / Eversheim, W.;
Schuh, G. (Hrsg.).
Berlin, u. a.: Springer, 1999, S. 9-1 bis 9-117.
- Welgama 1995 Welgama, P. S.; Gibson, P. R.:
Computer-Aided Facility Layout - A Status Report.
In: International Journal of Advanced Manufacturing Tech-
nology 10 (1995), Nr. 10, S. 66-77.
- Westkämper 1995 Westkämper, E.:
Learning Manufacturing Systems: The Second Generation
of CIM.
In: Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Fifth
International FAIM Conference, 28-30. Juni 1995 in Stutt-
gart / Schraft, R.-D. u. a. (Hrsg.).
New York, u. a.: Begell House, 1995, S. 153-164.
- Westkämper 1999a Westkämper, E.:
Die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen.
In: wt Werkstattstechnik 89 (1999), Nr. 4, S. 131-140.
- Westkämper 1999b Westkämper, E.:
Zukunftsweisende Fabrikstrukturen.
In: wt Werkstattstechnik 89 (1999), Nr. 1/2, S. 1.

- Westkämper 2000a Westkämper, E.:
Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung.
In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), Nr. 3, S. 92-95.
- Westkämper 2000b Westkämper, E.; u. a.:
Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen.
In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), Nr. 1/2, S. 22-26.
- Westkämper 2001a Westkämper, E.; Briel, R. von:
Continuous Improvement and Participative Factory Planning by Computer Systems.
In: CIRP Annals 50 (2001), Nr. 1, S. 347-352.
- Westkämper 2001b Westkämper, E.; u. a.:
Fabrikdigitalisierung.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 6, S. 304-307.
- Westkämper 2002a Westkämper, E.; Winkler, R.:
Praxisbeispiel und Nutzen der objektorientierten Konzeption für die Fabriksimulation.
In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 3, S. 52-56.
- Westkämper 2002b Westkämper, E.; Briel, R. von; Dürr, M.:
Methoden und Werkzeuge für eine zukünftige Planung von Fabriken und Produktionssystemen.
Unveröffentlichtes Arbeitspapier des Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2002
- Westkämper 2003a Westkämper, E.; Jovanoski, D.; Rist, T.:
New Framework for Digital Factory Planning.
In: Progress in Virtual Manufacturing Systems, Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 3.-5. Juni 2003, Saarbrücken / Bley, H. (Hrsg.).
Saarbrücken, 2003, S. 191-198.

- Westkämper 2003b Westkämper, E.:
Die Digitale Fabrik.
In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen. 2., neu bearb. und erw. Aufl.
Berlin, u. a.: Springer, 2003, S. 788-797.
- Westkämper 2004a Westkämper, E.:
Schneller und häufiger planen.
In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 3, S. 42.
- Westkämper 2004b Westkämper, E.; Pfeffer, M.; Dürr, M.:
i-plant – Die multifunktionale Integrationsplattform.
In: ZWF 99 (2004), Nr. 1/2, S. 14-17.
- Westkämper 2004c Westkämper, E.; Pfeffer, M.; Dürr, M.:
Partizipative Fabrikplanung mit skalierbarem Modell.
In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004), Nr. 3, S. 48-51.
- Westkämper 2006a Westkämper, E.; Decker, M.; Jendoubi, L.:
Einführung in die Organisation der Produktion.
Berlin; Heidelberg: Springer, 2006.
(Springer Lehrbuch).
- Westkämper 2006b Westkämper, E.:
Wirtschaftliche Wandlungsfähigkeit im produzierenden Mittelstand TF2.
Präsentationsfolien Teilprojekt T2 des Transferbereichs TFB 059 »Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung«:
<http://www.tfb059.uni-stuttgart.de/teilprojekte/tp2/tfb059-tp2.pdf> (07.08.2006)
- Wiendahl 2000 Wiendahl, H.-P.:
Partizipative Fabrikplanung: Methoden zur erfolgreichen Mitarbeiterbeteiligung.
München: TCW Transfer-Centrum, 2000.
(TCW-Report; 23).
- Wiendahl 2001a Wiendahl, H.-P.; Reichhardt, J.; Hernández, R.:
Kooperative Fabrikplanung – Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 4, S. 186-191.

- Wiendahl 2001b Wiendahl, H.-P.; u. a.:
 »Grüne-Wiese-Planung« – Alles ist möglich !
 In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 4,
 S. 197-201.
- Wiendahl 2001c Wiendahl, H.-P.:
 Fabriken – Standorte in Produktionsnetzwerken.
 In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 4, S. 179.
- Wiendahl 2002a Wiendahl, H.-P.:
 Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen
 Fabrik.
 In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 4,
 S. 122-127.
- Wiendahl 2002b Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.:
 Fabrikplanung im Blickpunkt – Herausforderung Wand-
 lungsfähigkeit.
 In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 4,
 S. 133-138.
- Wiendahl 2002c Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Grienitz, V.:
 Planung wandlungsfähiger Fabriken – Erschließung von
 Potentialen mit Hilfe des Szenario-Managements.
 In: ZWF 97 (2002), Nr. 1/2, S. 12-16.
- Wikipedia 2007 Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite> (20.02.2007).
- Wildemann 1999 Wildemann, H.:
 Produktionslogistik.
 In: Betriebshütte – Produktion und Management;
 4. Betrieb von Produktionssystemen / Eversheim, W.;
 Schuh, G. (Hrsg.).
 Berlin, u. a.: Springer, 1999, S. 15-52 bis 15-69.
- Wirth 2000a Wirth, S.; Enderlein, H.; Hildebrand, T.:
 Visionen zur wandlungsfähigen Fabrik.
 In: ZWF 95 (2000), Nr. 10, S. 456-462.

- Wirth 2000b Wirth, S.; Mann, H.; Otto, R.:
Layoutplanung betrieblicher Funktionseinheiten: Leitfaden.
(Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (IBF) der Universität Chemnitz; Heft 25).
Chemnitz: IBF, 2000.
- Wirth 2001a Wirth, S.; Hildebrand, T.; Redelstab, P.:
Die wandlungsfähige Fabrik in logistikorientierten Produktionsnetzwerken.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 4,
S. 184-185.
- Wirth 2001b Wirth, S.; Gäse, T.; Günther, U.:
Partizipative simulationsgestützte Layoutplanung.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001) Nr. 6,
S. 328-332.
- Wöhe 2008 Wöhe, G.; Döring, U.:
Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre.
23., vollst. Neu bearb. Und erw. Aufl.
München: Vahlen, 2008
- Woenckhaus 1994 Woenckhaus, C.:
Rechnergestütztes System zur automatisierten
3D-Layoutoptimierung.
Berlin, Heidelberg u. a.: Springer-Verlag, 1994.
(IWB Forschungsberichte; 65).
Zugl.: München, Techn. Univ., Diss. 1993.
- Wu 2002a Wu, Y.; Appleton, E.:
Integrated Design of the Block Layout and Aisle Structure
by Simulated Annealing.
In: International Journal of Production Research 40
(2002), Nr. 10, S. 2353-2365.
- Wu 2002b Wu, Y.; Appleton, E.:
The Optimisation of Block Layout and Aisle Structure by a
Genetic Algorithm.
In: Computers & Industrial Engineering 41 (2002), Nr. 4,
S. 371-388.

Zuber 2001

Zuber, E.; Kress, M.; Wagner, W.:
Virtuelle Produktion – Partner der digitalen Produktentstehung.
In: wt Werkstattstechnik online 91 (2001), Nr. 6,
S. 308-314.

13 ANHANG

13.1 Anforderungskriterien an die Modellierungsverfahren in Langfassung

Allgemeine Anforderungen			Spezifische Anforderungen durch die Modellierungsziele		
Richtigkeit	Bezug Modell zu Realität	Semantische Richtigkeit	Vollständigkeit	Flächen-behaftete Elemente	Flächeninhaltsspezifische Abbildung
					Geometriespezifische Abbildung
					Parametrisierbarkeit bzgl. gegebenen Attributen
					Parametrisierbarkeit bzgl. frei definierb. Attribute
		Beschreibungslogik für Bedarfe und Angebote			
		Einheitlichkeit	Flächen-behaftete Elemente	Spezifische Punkte z. Anknüpfung Beziehungen	
Beschreibbarkeit hierarchischer Systeme					
Möglichkeit der Mehrgeschossplanung					
Auflösung Planungsfläche bzw. Lösungsraum					
Klassifizierbarkeit über Attributsausprägungen					
Relevanz	Bezug Modell	Relevanz der Beziehungen zwischen Modellelementen	Beziehungen	Abbildung von Beziehungen	
				Abbildung zentralisierender Wechselwirkungen	
				Abbildung dezentralisierender Wechselwirkungen	
				Parametrisierbarkeit bzgl. gegebenen Attributen	
				Parametrisierbarkeit bzgl. frei definierb. Attribute	
				Bezugs-Geometrien (z.B. Punkte)	
			Beziehungen (Zielbedingungen)	Abbildung von Zielbedingungen	
				Explizite Abbildung von Zielbedingungen (1:1)	
				Implizite Abbildung von Zielbedingungen (n:m)	
				Abbildung 0-dim Zielbedingungen	
				Abbildung 1-dim Zielbedingungen	
			Beziehungen (Randbedingungen)	Abbildung 2-dim Zielbedingungen	
				Abbildung von Randbedingungen	
				Explizite Abbildung von Randbedingungen (1:1)	
				Implizite Abbildung von Randbedingungen (n:m)	
Abbildung 0-dim Randbedingungen					
Abbildung 1-dim Randbedingungen					
Abbildung 2-dim Randbedingungen					
Vergleichbarkeit	Bezug Modell zu Realität	Vergleichbarkeit von Modell und Realität	Bewertung	Alternative Messmethoden Bestimmungsgrößen	
				Beziehungsbewertung (vordefinierte Methoden)	
				Beziehungsbewertung (alternative Methoden)	
				Beziehungsbewertung parametrisierbar	
				Beziehungsbewertung frei definierbar	
				Freie Nutzbarkeit der Bestimmungsgrößen	
				Freie Nutzbarkeit obligatorischer Objektattribute	
				Freie Nutzbarkeit freier Objektattribute	
				Anordnungsbewertung (vordefinierte Methoden)	
				Anordnungsbewertung (alternative Methoden)	
				Anordnungsbewertung parametrisierbar	
				Anordnungsbewertung frei definierbar	
				Systematischer Aufbau	Bezug Modell
Beziehungen	Durchgängig identischer Attributsatz				
Anordnungsverhalten	Durchgängige Logik Auswirkungen Beziehungen				
	Durchgängige Logik des Anordnungsverhaltens				
Freie / kontinuierliche Variation Planungspunkt					
Integration unterschiedlicher Sichten	Flächenbeh. Elemente	Abbildung spez. Hierarchien (Subsysteme)			
	Beziehungen	Planungspunktspez. Adaptierbarkeit Attribute			
	Anordnungsverhalten	Planungspunktspez. Adaptierbarkeit Attribute			
		Planungspunktspezifische Adaptierbarkeit			
		Adaptierbarkeit durch Parametrisierung			
Adaptierbarkeit auf Basis Objektattribute					

13.2 Übersicht der für den Stand der Technik ausgewerteten Literatur

Klassen der Modellierungsverfahren	Quellen für eingeführte Verfahren		Art der Quelle	
			Übersichtsdarstellung mit genereller Beschreibung der Verfahrensklasse	Typische Vertreter der Verfahrensklasse
Klassische Modellierungen	Quadratisches Zuordnungs-Problem	QAP	Drira 2006; Singh 2006; Liggett 2000; Bogatzki 1998; Domschke 1997; Meller 1996a; Welgama 1995; Domschke 1993; Bölte 1994; Kusiak 1987.	Lahmar 2005; Hu 2004; Solimanpur 2004; Sha 2001; Bartolomei-Suárez 2000; Chen, C.-W. 1999; Mak 1998; Bozer 1997; Schleyer 2006.
	Quadratisches Set Covering Problem	QSCP	Liggett 2000; Bogatzki 1998; Welgama 1995; Kusiak 1987.	Paul 2006; Hardin 2005; Lahmar 2005; Hu 2004; Kulturel-Konak 2004; Al-Hakim 2000; Kochhar 1999; Bozer 1997.
	Generalisiertes Facility Layout Problem	GFLP	Kusiak 1987.	Benjaafar 2000a.
	Space Partitioning bzw. Slicing Tree Modellierungen	SPM bzw. STM	Liggett 2000; Domschke 1997; Kusiak 1987.	Shayan 2004; Wu 2002a; 2002b; Ho 2000; Al-Hakim 2000; Azadivar 2000.
	(Gemischt) ganzzahlige (lineare) Programmierung	MIP bzw. MILP	Drira 2006; Singh 2006; Meller 1996a; Welgama 1995; Kusiak 1987.	Bukchin 2006; Meller 2006; Kim 2005; Dunker 2003; Tavares 2002a; Barbosa-Póvoa 2001; Kim 2000; McKendall 1999; Gau 1999; Lacksonen 1997.
	Graphentheoretische Modellierungen	GTM	Drira 2006; Singh 2006; Hassan 2000; Liggett 2000; Bogatzki 1998; Domschke 1997; Meller 1996a; Welgama 1995; Domschke 1993; Kusiak 1987; Hassan 1987.	Al-Hakim 2001; John 2000; Pesch 1999; Irvine 1997.
Erweiterungen der klassischen Modellierungen	Erweiterte Logik bzgl. Modellelementen		Drira 2006; Singh 2006; Liggett 2000; Balakrishnan 1998; Bogatzki 1998; Domschke 1997; Meller 1996a; Bölte 1994; Domschke 1993.	Ahmad 2006; Bukchin 2006; Chae 2006; Hicks 2006; Logendran 2006; Paul 2006; Sarkar 2005; Kim 2005; Deb 2005; Hu 2004; Montreuil 2004a, 2004b; Solimanpur 2004; Baykasoglu 2003; Deb 2003; Ferrari 2003; Aiello 2002; Benjaafar 2002; Castillo 2002c; Tavares 2002a; Wu 2002a, 2002b; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Chiang 2001; Lee, G.H. 2001; Abdinnour-Helm 2000; Bazargan-Lari 2000; Ho 2000; Kim 2000; Hamamoto 1999; McKendall 1999; Mak 1998; Meller 1997b, 1996a.
	Erweiterte Logik bzgl. Zielfunktion		Drira 2006; Singh 2006; Bogatzki 1998; Meller 1996a; Bölte 1994; Domschke 1993; Hassan 1987.	Ahmad 2006; Al-Araidah 2006; Logendran 2006; Chen, C.-W. 2005; Kim 2005; Lahmar 2005; Sarkar 2005; Hu 2004; Jaramillo 2004; Meller 2004; Meng 2004; Shayan 2004; Deb 2003; Dunker 2003; Ferrari 2003; Huang 2003; Ozdemir 2003; Barbosa-Póvoa 2002; Wu 2002a; Heragu 2001; Sha 2001; Azadivar 2000; Bartolomei-Suárez 2000; Benjaafar 2000b; Kim 2000; Chen, C.-W. 1999; Hamamoto 1999; Islier 1998; Mak 1998; Meller 1996b.
	Erweiterte Logik bzgl. Auftragslast		Drira 2006; Singh 2006; Benjaafar 2000b; Balakrishnan 1998; Meller 1996a.	Braglia 2005; Lahmar 2005; Chan 2004; Jaramillo 2004; Kulturel-Konak 2004; Meng 2004; Baykasoglu 2003; Aiello 2001; Heragu 2001; Balakrishnan 2000; Benjaafar 2000a; Kochhar 1999; Mak 1998; Lacksonen 1997.
	Erweiterte Logik bzgl. Randbedingungen		Drira 2006; Singh 2006; Liggett 2000; Bogatzki 1998; Meller 1996a; Welgama 1995; Bölte 1994.	Anjos 2006; Bukchin 2006; Chae 2006; Hicks 2006; Logendran 2006; Paul 2006; Kim 2005; Dunker 2003; Tavares 2002a, 2002b; Wu 2002a, 2002b; Barbosa-Póvoa 2002, 2001; Chiang 2001; Bazargan-Lari 2000; McKendall 1999; Foulds 1998; Islier 1998; Mak 1998; Bazargan-Lari 1997; Lacksonen 1997; Kouvelis 1992.
	Hybride Erweiterungen der Modellierungslogik		Drira 2006; Bölte 1994.	Castillo 2003, 2002a; Wu 2002a, 2002b; Mak 1998; Foulds 1997.
	Modellierungen in Software-Produkten	Digitale Fabrik		Meyr 2002; Scharf 2001.
	Kommerzielle Software		Meyr 2002; Scharf 2001; Liggett 2000.	Projecteam 2000.; IAF 2008; IBAB 2006; IFP 2006; Fauser 2006; Sudhoff 2006, Tecnomatix 2008b.
	Wissenschaftliche Software		Meyr 2002; Liggett 2000; Welgama 1995.	SFB 467 2006; Hicks 2006; Gäse 2005; Müller 2003; Wirth 2001b; Förster 2001; Westkämper 2004c, 2001a, 2000a; Sihm 2000; Foulds 1997.
Modellierungen für Spezialfälle	bzgl. Betrachtungsgegenstand		Dimopoulos 2000.	Bukchin 2006; Chae 2006; Hicks 2006; Brusco 2004; Chan 2004; Saad 2004; Solimanpur 2004; Baykasoglu 2003; Castillo 2003; Chen, D.-S. 2001; Djellab 2001; Lee, S.-D. 2001; Ponnambalam 2001; Asef-Vaziri 2000; Bazargan-Lari 2000, 1997; Ho 2000; Salum 2000; Urban 2000; Braglia 1997.
	bzgl. Modellierungsansatz		-	Meller 2006; Logendran 2006; Ozdemir 2003; Montreuil 2004a, 2004b; Castillo 2002b, 2002c; Kobayashi 2001; McKendall 1999; Meller 1997a.

13.3 Ergebnisse Anforderungsabgleich implizit formulierte Beziehungen mit Ausprägungslogik »Zeichenfolge« am Beispiel

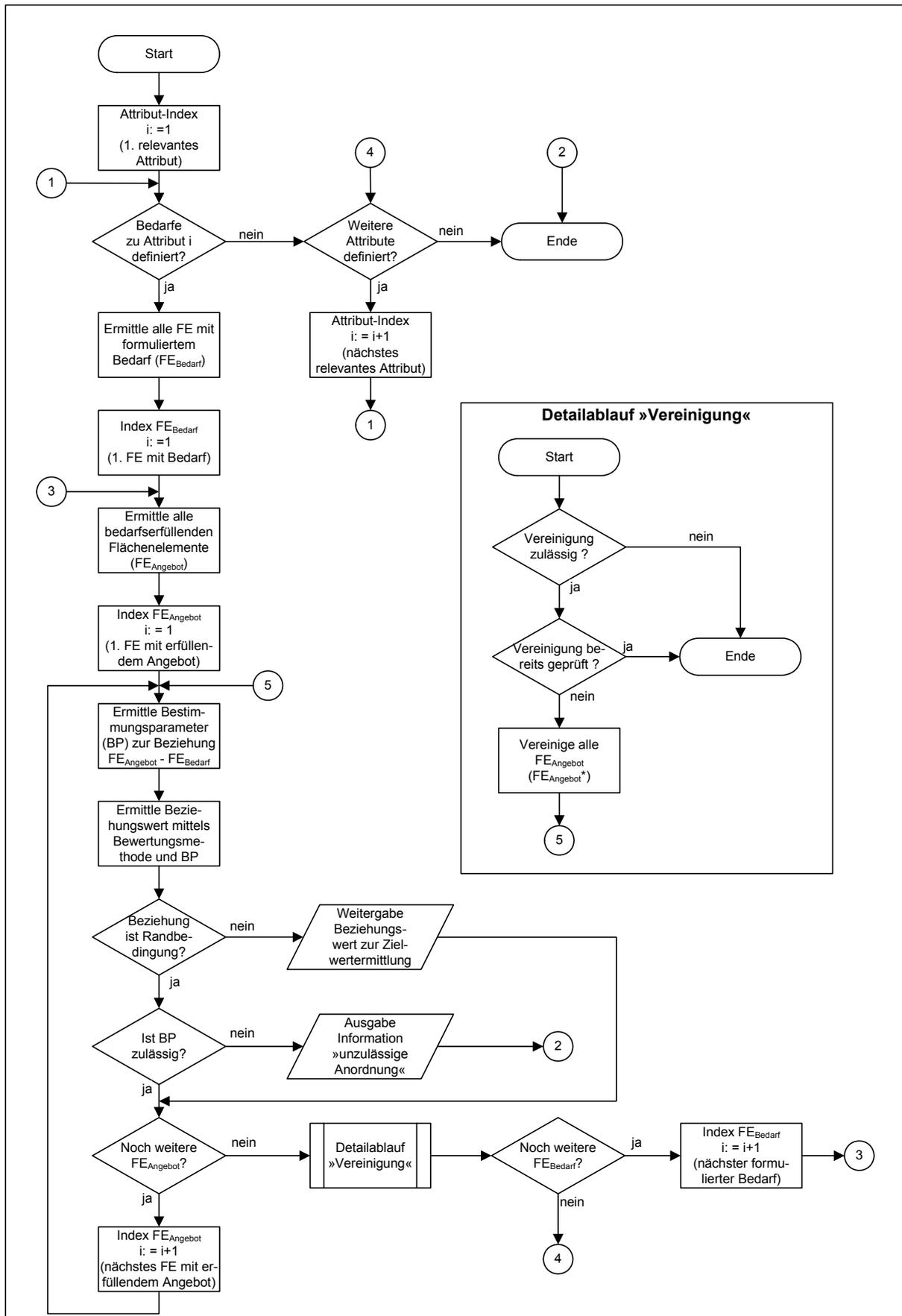
Beispielsituation für ein freies Attribut der Flächenelemente

Angebote / Bedarf: Zeichenfolge (auch »String«), konkrete Ausprägungen »ABC«, »BCD« (alternativ Bedarf bzw. Angebot), »XYZ« (nur Bedarf, nicht Angebot)

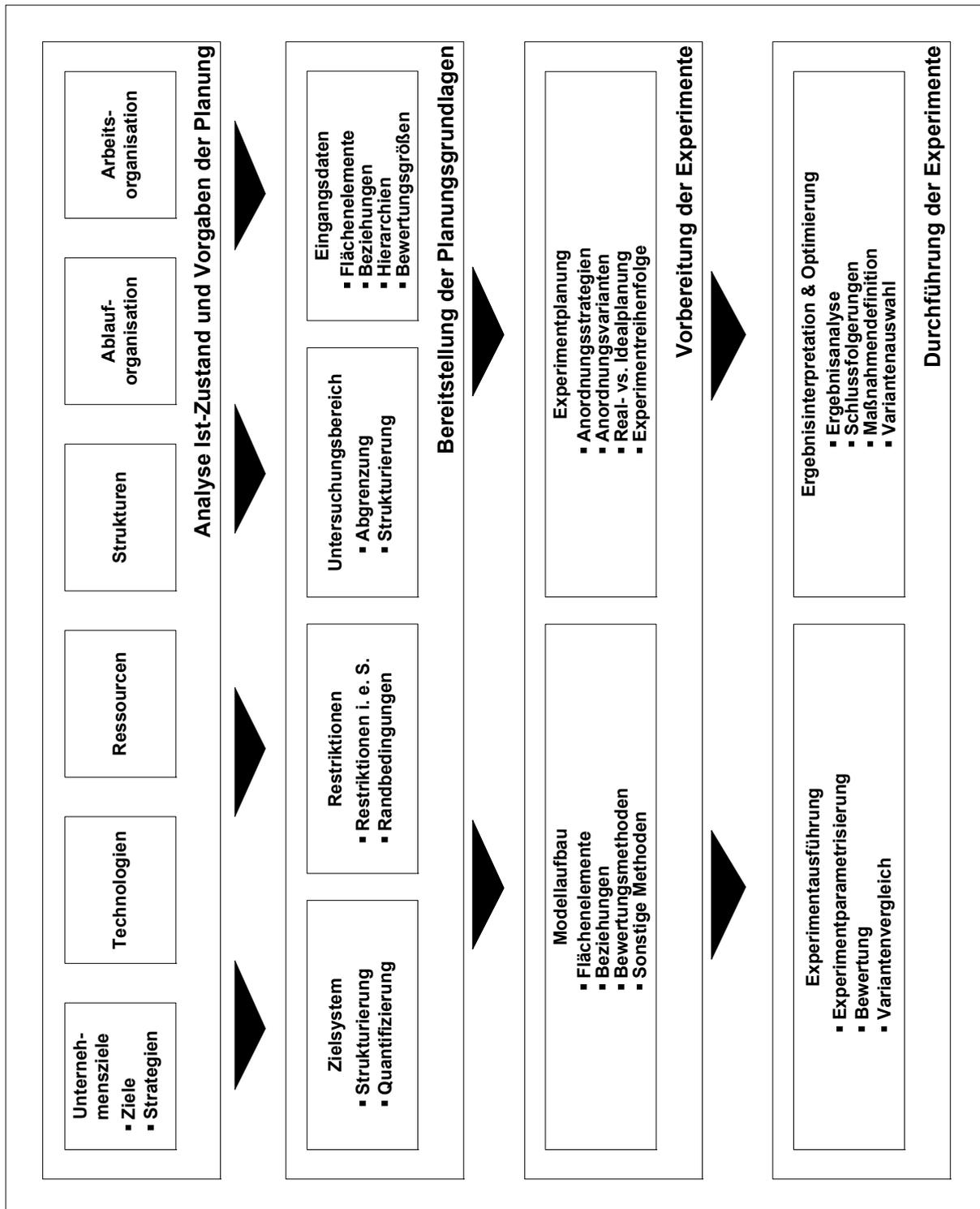
Logiken: UND sowie ODER

Multi-String	Angebot	Bedarf	Ergebnis ODER	Ergebnis UND	Bemerkung
ABC BCD XYZ	x x 0	x x 1	Unzulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. XYZ ist in keinem Falle gedeckt
ABC BCD XYZ	x x 0	0 0 0	Zulässig	Zulässig	Kein Bedarf formuliert
ABC BCD XYZ	0 0 0	1 0 0	Unzulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. ABC nicht gedeckt
ABC BCD XYZ	0 0 0	0 1 0	Unzulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD nicht gedeckt
ABC BCD XYZ	0 0 0	1 1 0	Unzulässig	Unzulässig	Formulierte Bedarfe bzgl. ABC und BCD nicht gedeckt
ABC BCD XYZ	1 0 0	1 0 0	Zulässig	Zulässig	Formulierter Bedarf bzgl. ABC gedeckt
ABC BCD XYZ	1 0 0	0 1 0	Unzulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD nicht gedeckt
ABC BCD XYZ	1 0 0	1 1 0	Zulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD bei ODER-Logik gedeckt, bei UND-Logik nicht
ABC BCD XYZ	0 1 0	1 0 0	Unzulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. ABC nicht gedeckt
ABC BCD XYZ	0 1 0	0 1 0	Zulässig	Zulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD gedeckt
ABC BCD XYZ	0 1 0	1 1 0	Zulässig	Unzulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD bei ODER-Logik gedeckt, bei UND-Logik nicht
ABC BCD XYZ	1 1 0	1 0 0	Zulässig	Zulässig	Formulierter Bedarf bzgl. ABC gedeckt
ABC BCD XYZ	1 1 0	1 1 0	Zulässig	Zulässig	Formulierter Bedarf bzgl. BCD gedeckt
ABC BCD XYZ	1 1 0	1 1 0	Zulässig	Zulässig	Formulierte Bedarfe bzgl. ABC und BCD gedeckt
Legende:	0 nicht ausgeprägt 1 ausgeprägt x neutral, d.h. kein Einfluss, ob als »0« oder »1« ausgeprägt				

13.4 Ablauf zur Auswertung implizit formulierter Beziehungen



13.5 Mikroablauf der Anordnungsplanung mit Aufgabendetails



13.6 Beziehungsprofile der Testszenarien zum Mächtigenachweis für das verbesserte Verfahren im Rahmen des Praxistests

Szenario	Produktions- technisch	Logistisch	Organisa- torisch	Arbeitsorga- nimatorisch	Infrastruktur- bezogen	Sicherheits- bezogen	Ästhetisch
Art der Beziehung							
Mehrmaschinenbedienung							
Erweiterungsfähigkeit							
Einsehbarkeit							
Orientierungen							
Flussorientierung / Fließprinzip							
Materialfluss							
Medienfluss							
Ver- und Entsorgung							
Personenfluss							
Informationsfluss							
Sicherheitsabstände (Vorschriften)							
Unverträglichkeiten/Störungen (funktional und Vorschriften)							
Fluchtwege / Türen							
Erschließung / Tore							
Funktionale Fähigkeiten / Ausstattungen							
Brandschutz							
Fundamente							
Stützen, Stützenraster							
Organisatorische Einheiten							
Arbeitsorganisation							
Synergien							
Geschosse							
Fixpunkte							

13.7 Quantifizierte Materialflüsse in Matrixform

OE-Kürzel	BGM Maschine	BGM Peripherie	B BGM Maschine	B BGM Peripherie	B EM Maschine	B EM Peripherie	B Teilfertigung	Blechbearbeitung	Elektrofertigung	EM Anlagen	EM Maschinen	EM Peripherie	Ersatzteillager	Ersatzteilversand	Gruppenfertigung	Kleinteillager	Kommissionen BGM	Kommissionen EM	Lackierung	Maschinenversand	Palettenlager	Rohmateriallager	Sägen	Schrottlager	Sonderlager	Verpackungslager	Wareneingang	Werkstättenfertigung	SUMME
BGM Maschine																													0
BGM Peripherie																													0
B BGM Maschine	13647				18070		44						210	31						2063	21								34.086
B BGM Peripherie		4120									25870	3192																	7.312
B EM Maschine																													26.010
B EM Peripherie												3473																	3.473
B Teilfertigung																													9262
Blechbearbeitung																													15
Elektrofertigung																													415
EM Anlagen																													2.593
EM Maschinen																													512
EM Peripherie																													3.276
Ersatzteillager																													1.090
Ersatzteilversand																													775
Gruppenfertigung																													0
Kleinteillager																													645
Kommissionen BGM																													5570
Kommissionen EM																													6.225
Lackierung																													7.654
Maschinenversand																													13.004
Palettenlager																													5.203
Rohmateriallager																													11.185
Sägen																													2
Schrottlager																													26.178
Sonderlager																													7.586
Verpackungslager																													3.086
Wareneingang																													0
Werkstättenfertigung	3																												1.089
SUMME	13.650	4.120	17.178	4.120	26.010	281	14.854	1.041	3.357	512	27.844	6.805	1.036	1.319	5.580	7.654	15.240	5.484	13.733	11.116	24.230	4.446	3.295	2.560	1.089	3.233	2.162	16.803	238.752

13.8 Langbezeichnungen zu den in der Materialflussmatrix verwendeten organisatorischen Einheiten

Organisatorische Einheit	OE-Kürzel
Baugruppenmontage Maschinen	BGM Maschine
Baugruppenmontage Peripherie	BGM Peripherie
Bereitstellung Baugruppenmontage Maschinen	B_BGM Maschine
Bereitstellung Baugruppenmontage Peripherie	B_BGM Peripherie
Bereitstellung Endmontage Maschinen	B_EM Maschine
Bereitstellung Endmontage Peripherie	B_EM Peripherie
Bereitstellung Teilefertigung	B_Teilefertigung
Blechbearbeitung	Blechbearbeitung
Elektrofertigung	Elektrofertigung
Endmontage Anlagen	EM Anlagen
Endmontage Maschinen	EM Maschinen
Endmontage Peripherie	EM Peripherie
Ersatzteillager	Ersatzteillager
Ersatzteilversand	Ersatzteilversand
Gruppenfertigung	Gruppenfertigung
Kleinteilelager	Kleinteilelager
Kommissionierung Baugruppenmontage	Kommissionen BGM
Kommissionierung Endmontage	Kommissionen EM
Lackierung	Lackierung
Maschinenversand	Maschinenversand
Palettenlager	Palettenlager
Rohmateriallager	Rohmateriallager
Sägen	Sägen
Schrottlager	Schrottlager
Sonderlager	Sonderlager
Verpackungslager	Verpackungslager
Wareneingang	Wareneingang
Werkstättenfertigung	Werkstättenfertigung