

Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Rico Schady

geb. am 4. Juli 1977 in Königs Wusterhausen
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Michael Schenk
Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

Promotionskolloquium am 10. April 2008

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung (IFF) in Magdeburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Michael Schenk, Institutsleiter des Fraunhofer IFF sowie des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, danke ich für die wohlwollende Begleitung meines Promotionsvorhabens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Egon Müller, Leiter des Lehrstuhls Fabrikplanung und Fabrikbetrieb an der Technischen Universität Chemnitz gilt mein Dank für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Molitor aus der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen des Geschäftsfeldes Logistik- und Fabrikssysteme am Fraunhofer IFF bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank Dr.-Ing. habil. Juri Tolujew für seine Bereitschaft zur Diskussion und seine hilfreichen Anmerkungen. Weiterhin bedanke ich mich bei Mark Staiger (M.A.), der mich mit seinem Ehrgeiz selbst angespornt hat, Dominic Stange und Dipl.-Ing. Ronny Franke für die Unterstützung mit der Programmierung des Werkzeuges sowie Jessica Gatzke für die Korrektur der Arbeit. Herrn Dipl.-Ing. Holger Seidel danke ich für die zur Verfügung gestellten Ressourcen.

Schließlich danke ich meinen Eltern für ihre langjährige Unterstützung.

Rico Schady

Magdeburg, im April 2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Anforderungen an Fabriken und die Digitale Fabrik.....	2
1.2 Problembeschreibung	4
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit.....	7
2 Grundlagen und Inhalt	10
2.1 Fabrikbezogene Grundlagen.....	10
2.1.1 Fabriken und Fabrikssysteme.....	11
2.1.2 Fabrikplanung.....	16
2.1.3 Änderungsmanagement	20
2.1.4 Fabrikbetrieb.....	22
2.1.5 Quantitative und qualitative Fabrikmerkmale	23
2.1.6 Die Digitale Fabrik	24
2.2 Modellierung von Fabrikssystemen	27
2.2.1 Grundlagen der Modellierung	27
2.2.2 Objektorientierte Modelle	32
2.2.3 Prozessorientierte Modelle	33
2.2.4 Grafische und virtuelle Modelle.....	36
2.2.5 Kombinierte Modelle und Simulation	38
2.3 Wissensrepräsentation für die Produktion.....	40
2.3.1 Grundlagen der Wissensrepräsentation	40
2.3.2 Anwendungen der Wissensrepräsentation in der Produktion.....	45
2.4 Aufgabenstellung.....	46
2.4.1 Stand der Forschung	47
2.4.2 Anforderungen an eine wissensorientierte Fabrikmodellierung.....	49
2.4.3 Lösungsansatz und Vorgehensweise	51
3 Abbildung der Systemelemente mit dem Objektmodell	55
3.1 Aufbau des Objektmodells	55
3.2 Partialmodell der Fabrikelemente.....	57
3.2.1 Definition und Systematik von Fabrikelementen	57
3.2.2 Attribute und Operationen von Fabrikelementen	61
3.2.3 UML-Klassendiagramm	62
3.3 Partialmodell der Fabrikprozesse	62
3.3.1 Grundlagen der Prozessbetrachtung.....	63
3.3.2 Rolle und Definition von Fabrikprozessen.....	65

3.3.3	Prozesskettenelemente, Prozessketten und Prozessgruppen	69
3.3.4	Attribute von Fabrikprozessen	71
3.3.5	Operationen von Fabrikprozessen	74
3.3.6	Aufbau des Fabrikprozess-Modells	75
3.3.7	UML-Klassendiagramm	77
3.4	Partialmodell der Produktelemente	79
3.5	Integration der Partialmodelle des Objektmodells	82
3.6	Modellparametrierung	83
3.6.1	Erstellung von Fabrikelementen, Fabrikprozessen und Produktelementen.....	84
3.6.2	Bestimmung von Attributausprägungen.....	85
3.6.3	Angabe von ergänzenden Objektinformationen	86
4	Abbildung der Relationen mit dem Relationenmodell.....	88
4.1	Konzeption des hybriden Gesamtmodells	88
4.1.1	Semantische Netze und Ontologien.....	88
4.1.2	Description Logics.....	91
4.1.3	Verknüpfung von Objektorientierter Modellierung und Description Logics.....	93
4.2	Abbildung von Relationen in der ABox	97
4.2.1	Systematik der Relationen	97
4.2.2	Relationen nach verbundenen Konzeptarten	100
4.2.3	Relationen nach verbundenen Partialmodellen	102
4.3	Erweiterung der Wissensbasis	104
4.3.1	Informationen, Regeln und Formeln	105
4.3.2	Komplexe Sätze	106
4.3.3	Produktionsregeln.....	108
4.4	Diskussion des hybriden Modellansatzes	109
5	Modellerweiterung und Anwendungen	111
5.1	Definition von Wissensdomänen.....	111
5.2	Konzeption eines Referenzmodells	112
5.3	Visualisierung von Relationen.....	115
5.4	Abfragen an das Gesamtmodell.....	117
5.4.1	Einfache Abfragen.....	117
5.4.2	Abfragen mit Inferenzprozeduren	118
5.5	Anwendungen im Fabriklebenszyklus	120
5.5.1	Anwendungsarten	120
5.5.2	Anwendungsgebiete	121
5.6	Systematische Vorgehensweisen.....	123
5.6.1	Funktionsorientierung.....	123
5.6.2	Änderungsanalyse.....	125

6	Modellimplementierung	128
6.1	Referenzmodellerstellung.....	128
6.2	Fabrikspezifische Modellerstellung.....	129
6.2.1	Abschätzung des Nutzenpotenzials	129
6.2.2	Vorgehensmodell für die Modellanwendung	132
6.2.3	Modellerstellung.....	134
6.3	Werkzeugentwicklung.....	135
6.3.1	Systemarchitektur	136
6.3.2	Wissensbasis.....	137
6.3.3	Visualisierungskomponente.....	139
6.4	Modellerprobung	140
7	Schlussbetrachtung	141
7.1	Zusammenfassung	141
7.2	Ausblick.....	143
8	Literaturverzeichnis	145

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1: Anforderungen an Fabriken, die Fabrikplanung und die Digitale Fabrik	3
Bild 1-2: Einordnung der Tätigkeiten der Fabrikplanung	6
Bild 1-3: Forschungsansatz dieser Arbeit.....	7
Bild 1-4: Aufbau der Arbeit	9
Bild 2-1: Konzepte der Allgemeinen Systemtheorie	12
Bild 2-2: Formale Darstellung eines Produktionssystems.....	13
Bild 2-3: Ebenen und Strukturen einer Fabrik	14
Bild 2-4: Langfristige und kurzfristige Lebenszyklen einer Fabrik	15
Bild 2-5: Phasen des Fabrikplanungsprozesses	18
Bild 2-6: Änderungsprozess in der Produktion	21
Bild 2-7: Differenzierung von Fabrikplanung und Änderungsmanagement.....	21
Bild 2-8: Quantitative und qualitative Merkmale der Fabrikplanung	23
Bild 2-9: Anwendungen der Digitalen Fabrik	25
Bild 2-10: Durchgängiger Einsatz der Digitalen Fabrik.....	25
Bild 2-11: Anwendung verschiedener Modelle im Planungsprozess.....	28
Bild 2-12: Klassifizierung von Modellen	30
Bild 2-13: Modelle zur Abbildung von Fabrikssystemen.....	38
Bild 2-14: Ebenen der Wissensrepräsentation im Sinne dieser Arbeit.....	41
Bild 2-15: Aufbau eines wissensbasierten Systems	44
Bild 2-16: Beispiel für Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung.....	45
Bild 2-17: Schnittstellen zwischen Wissensrepräsentation und Fabrikmodellen.....	51
Bild 2-18: Aufbau des Gesamtmodells für die wissensorientierte Fabrikmodellierung	52
Bild 2-19: Lösungsansatz und Inhalte der Arbeit.....	53
Bild 3-1: Abbildung der Systemelemente mit Klassenbeschreibungen	56
Bild 3-2: Ebeneninstanzen und zugeordnete Fabrikelemente im FE-Modell.....	60
Bild 3-3: UML-Klassendiagramm für das FE-Modell	62
Bild 3-4: Anwendung des Prozesskonstrukts für die wissensorientierte Fabrikmodellierung	67
Bild 3-5: Elemente und Einflussgrößen eines Fabrikprozesses.....	70
Bild 3-6: Modellelemente für das FP-Modell.....	71
Bild 3-7: Merkmalsträger für qualitative Kriterien	72
Bild 3-8: Operationen im FP-Modell	74
Bild 3-9: Prozesskomposition im FP-Modell	76
Bild 3-10: Beispiel für ein FP-Modell.....	76
Bild 3-11: FP-Modell als UML-Klassendiagramm.....	78
Bild 3-12: Aufbau einer Klassenbibliothek für Fabrikprozesse	79

Bild 3-13: Baukastenstückliste mit Features	81
Bild 3-14: UML-Klassendiagramm für das PE-Modell	82
Bild 3-15: Integration der Partialmodelle	83
Bild 3-16: Spezielle Klassen und Instanzen im Objektmodell	84
Bild 3-17: Morphologisches Schema zur Detailbeschreibung von Instanzen	87
Bild 4-1: Beispiel für ein semantisches Netz	89
Bild 4-2: Beispiel für eine Anfrage an ein semantisches Netz	90
Bild 4-3: TBox und ABox der Description Logics	92
Bild 4-4: Schematische Darstellung des Transformationsansatzes	95
Bild 4-5: Merkmale und ihre Ausprägungen für Relationen im Relationenmodell	99
Bild 4-6: Elementen und ihren Relationen im Gesamtmodell	103
Bild 4-7: Beispiel für ein konkretes Relationenmodell	104
Bild 4-8: Entsprechung zwischen der Welt und ihrer Repräsentation	106
Bild 4-9: Hybrider Modellansatz und Erweiterungen in der Wissensbasis	110
Bild 5-1: Abgrenzung von Wissensdomänen	112
Bild 5-2: Referenzmodell und Nutzung für ein konkretes Modell	113
Bild 5-3: Informationsvisualisierung in einem grafischen Modell	116
Bild 5-4: Merkmale der Nutzung wissensorientierter Fabrikmodelle	122
Bild 5-5: Aufstellung von Fabrikprozessen zur Abbildung mit dem FP-Modell	124
Bild 5-6: Zielorientierte Planung von Fabrikprozessen	125
Bild 5-7: Unterstützung der Änderungsanalyse mit dem wissensorientierten Fabrikmodell	126
Bild 6-1: Wirtschaftlichkeit der Modellabbildung	130
Bild 6-2: Merkmale von Fabrikssystemen	131
Bild 6-3: Vorgehensmodell für die Modellanwendung	132
Bild 6-4: Ablauf der Modellerstellung	135
Bild 6-5: Systemarchitektur des Werkzeugs FabrikNet	136
Bild 6-6: Formularblatt „Modellelemente anlegen/löschen“	137
Bild 6-7: Formularblatt „Semantisches Netz“	138
Bild 6-8: Darstellung von Relationen mit der Visualisierungskomponente	139
Bild 7-1: Modellelemente für die wissensorientierte Fabrikmodellierung	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Planungsgrundsätze der Fabrikplanung	17
Tabelle 2-2: Objektorientierte Modellierung für Fabrikplanung und -betrieb	33
Tabelle 2-3: Wissensarten	40
Tabelle 2-4: Anforderungen an das zu entwickelnde Instrumentarium	50
Tabelle 3-1: Einteilung der Fabrikelemente nach Gestaltungsbereichen	58
Tabelle 3-2: Systematik der Fabrikelemente	59
Tabelle 3-3: Eigenschaften von Fabrikelementen	61
Tabelle 3-4: Übersicht über Fabrikprozesse	67
Tabelle 3-5: Differenzierungskriterien für Prozessattribute	73
Tabelle 3-6: Beispiele für Attribut- und Prozessoperationen	75
Tabelle 3-7: Systematik von Fabrikprozessen (Beispiel)	77
Tabelle 4-1: Grundlegende atomare Konzepte des Relationenmodells.....	96
Tabelle 4-2: Grundvokabular für das Semantische Netz.....	102
Tabelle 4-3: Matrix der gültigen Beziehungen im Relationenmodell	103
Tabelle 4-4: Beispiele für komplexe Sätze der DL	108
Tabelle 5-1: Inferenzprozeduren	119
Tabelle 5-2: Spezifizierung der Anwendungsarten	121

Abkürzungsverzeichnis

2D/3D	zweidimensional/dreidimensional
BDE	Betriebsdatenerfassung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAx	Computer Aided ...
d.h.	das(s) heißt
DL	Description Logics
DMU	Digital Mock-Up
et al.	und andere
FE	Fabrikelement
FLZ	Fabriklebenszyklus
FP	Fabrikprozess
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R.	in der Regel
i.e.S.	im engen Sinne
i.w.S.	im weiten Sinne
KBE	Knowledge Based Engineering
ODBC	Open Database Connectivity
OOM	Objektorientierte Modellierung
PE	Produktelement
SADT	Structured Analyses and Design Technique
TGA	Technische Gebäudeausstattung
tlw.	teilweise
u.a.	und andere
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality / Virtuelle Realität
XML	eXtensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

*Das Ziel der Wissenschaft ist es immer gewesen,
die Komplexität der Welt auf simple Regeln zu reduzieren.*

Benoît Mandelbrot

1 Einleitung

Die Qualität von Fabrikplanung und -betrieb ist ein wichtiger Faktor für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Fabriken. Der globale Wettbewerb unter konkurrierenden Produktionsstandorten erfordert die bestmögliche Planung und permanente Optimierung der Produktionsprozesse, weshalb der Weiterentwicklung von Modellen, Methoden und Werkzeugen für die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb eine große Bedeutung zukommt. Eine wichtige Entwicklungsrichtung ist in diesem Zusammenhang die Digitale Fabrik, die insbesondere zur Verbreitung und Weiterentwicklung von Fabrikmodellen und Planungswerkzeugen beiträgt:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – unter anderem der Simulation und 3-D/VR-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“¹

Die Digitale Fabrik soll dazu dienen, alle wesentlichen Prozesse in einer Fabrik zu beschreiben, zu simulieren und deren Durchführbarkeit zu prüfen, bevor diese überhaupt physisch existieren. Gängiges Leitmotiv der Digitalen Fabrik ist die durchgängige Unterstützung im Lebenszyklus einer Fabrik unter Wiederverwendung von Daten und Modellen, von der Planung, über die Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb der Fabrik und zukünftigen Änderungsplanungen.² In der Realität besteht die Digitale Fabrik aus einer Vielzahl von digitalen Werkzeugen, die jeweils für spezifische Problemstellungen eingesetzt werden. Typische Einsatzfelder dieser Werkzeuge sind die Prozess- und Ressourcenplanung, Prozesssimulation, Materialflussanalyse, Ergonomiesimulation, Anordnungsplanung und Visualisierung der Fabrik.³ Diese Werkzeuge dienen der Unterstützung einer spezifischen Problemstellung von Fabrikplanung und -betrieb und sollen im Rahmen dieser Arbeit deshalb als problemorientierte Werkzeuge bezeichnet werden.

Der Einsatz der Digitalen Fabrik bietet sich insbesondere bei einer hohen Komplexität der Produktion und einem hohen Kommunikationsbedarf zwischen den Mitarbeitern an.⁴ Mit dieser Arbeit wird im Kontext der Digitalen Fabrik das Ziel verfolgt, einen Beitrag für die effiziente Bereitstellung von Informationen und Wissen in komplexen Produktionsumgebungen zu leisten.

¹ VDI 4499 (2006), S. 2.

² Vgl. Kühn (2006), S. 1-6.

³ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 405-408 und Westkämper; Runde (2006), S. 99-101.

⁴ Vgl. Dombrowski; Tiedemann (2005), S. 139.

1.1 Anforderungen an Fabriken und die Digitale Fabrik

Die Notwendigkeit hoch effizienter Fabriken ergibt sich insbesondere aus der Globalisierung und dem aus ihr resultierenden Wettbewerbsdruck mit anderen Standorten des eigenen Unternehmens und den von Konkurrenten. Die Vorteile eines Standortes, wie die Nähe zum Entwicklungsbereich oder zu zuliefernden Unternehmen werden durch eine größere Kundennähe und niedrige Lohnkosten an anderen Standorten oftmals aufgehoben.⁵ Die Logistikkosten bilden einen vergleichsweise geringen Teil der Gesamtkosten eines Produktes und stehen einer Verlagerung der Produktion oft nicht mehr entgegen.⁶ Zudem lässt sich die Qualität der Produkte mit standardisierten Produktionssystemen und gleichem Technologieansatz auch an anderen Standorten sicherstellen.⁷ Lediglich der Mangel an qualifizierten Mitarbeitern bei hochtechnologischen Prozessen, hohe Koordinations- und Kommunikationskosten oder Planungsunsicherheiten an anderen Standorten stellen unter Umständen ein Verlagerungshindernis dar.⁸

Aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks und sich permanent ändernder Marktanforderungen steigen die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und die Anpassungsfähigkeit von Fabriken stetig. Das Ziel muss es vor diesem Hintergrund sein neben geringen Planungs-, Investitions- und Produktionskosten, eine hohe Wandlungsfähigkeit der Produktion sicherzustellen.⁹ Um den langfristigen Bestand einer Fabrik an einem Standort zu gewährleisten, sind durch ein Unternehmen im Prinzip folgende Aufgaben zu erfüllen:

- *Fabrikplanung*: Die Planung und Realisierung flexibler, wandlungsfähiger und wettbewerbsfähiger Fabriken in einem optimierten Produktionsnetz.¹⁰
- *Änderungsmanagement*: Die kontinuierliche Optimierung der Produktionsprozesse und schnelle Adaption der Fabrik an veränderte Umwelтанforderungen.¹¹
- *Fabrikbetrieb*: Die Sicherstellung eines effizienten Fabrikbetriebs mit Hilfe von Methoden und Werkzeugen Ganzheitlicher Produktionssysteme.¹²

Um diese Aufgaben effektiver als konkurrierende Fabrikstandorte auszuführen, sollten im Fabriklebenszyklus permanent verbesserte Modelle, Methoden und Werkzeuge zur Anwendung kommen. In Wissenschaft und Praxis werden deshalb in den letzten Jahren Ansätze

⁵ Vgl. Kinkel et al. (2004), S. 15-16.

⁶ Vgl. Wildemann (2005), S. 11 und Bundesvereinigung für Logistik (2004), S. 11.

⁷ Vgl. Fleischer et al. (2005), S. 279.

⁸ Vgl. Sauthoff; Schulte (2007), S. 202-203; Kinkel et al. (2004), S. 31 und 63.

⁹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 9-12.

¹⁰ Vgl. Müssig (2005) und Schenk; Wirth (2004), S. 9-11.

¹¹ Vgl. Meier; Homuth (2005), S. 20.

¹² Vgl. Sporer (2006), S. 10.

wie strukturadaptive Fabrikkonzepte, Ganzheitliche Produktionssysteme oder die Digitale Fabrik mit der Integration von Produkt- und Prozessentwicklung verfolgt.¹³ Um Planungs- und Anpassungsprozesse in immer kürzeren Abständen und kürzeren Zeiträumen durchführen zu können wird u.a. auch der effiziente Umgang mit dem dazu notwendigen Wissen thematisiert.¹⁴ Das steigende Interesse von Unternehmen an diesen neuen Themenfeldern wird bspw. aus der strategischen europäischen Forschungsagenda Manufuture oder der Gründung der Arbeitskreise Fabrikplanung und Digitale Fabrik durch den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) in Deutschland deutlich.¹⁵

Im Folgenden werden einige Anforderungen, die Unternehmen und die Unternehmensumwelt an Fabriken, die Fabrikplanung sowie die Digitale Fabrik stellen, aufgeführt (vgl. Bild 1-1).

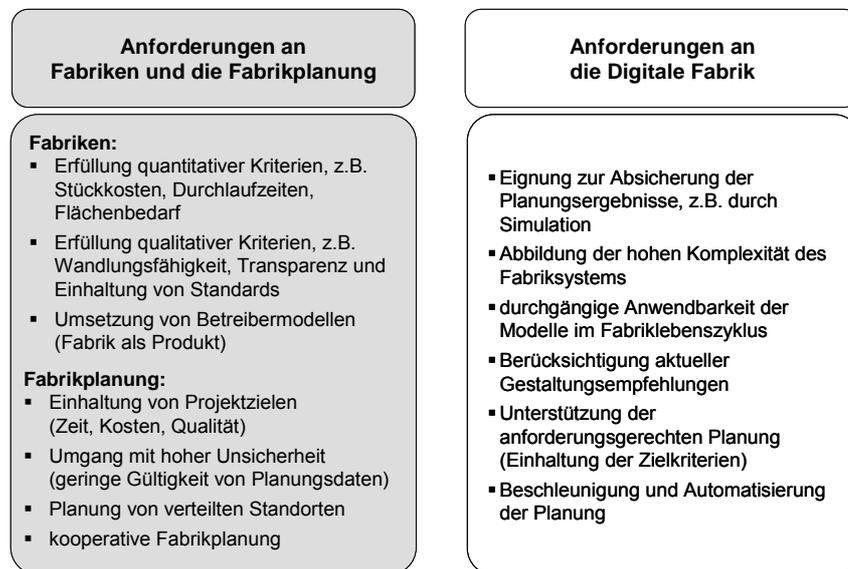


Bild 1-1: Anforderungen an Fabriken, die Fabrikplanung und die Digitale Fabrik

Wettbewerbsfähige Fabriken müssen neben ihrer prinzipiellen technischen Produktionsfunktion auch eine Vielzahl von quantitativen und qualitativen Kriterien erfüllen.¹⁶ Die heutigen Anforderungen gehen über die Vorgabe von quantitativen Zielen, wie Stückkosten und Durchlaufzeiten für das aktuelle Produktionsprogramm hinaus. Eine Fabrik ist bspw. wandlungsfähig zu planen, d.h. sie muss für einen definierten Handlungsspielraum eine aufwandsarme Adaption an veränderte Umweltbedingungen erlauben. Diese Forderung ergibt sich aus dem turbulenten Umfeld von Unternehmen, das zu einer geringen Gültigkeit von Daten führt, die der Planung zugrunde liegen. So ändern sich die Mengengerüste der Produkte, Technologien und Anforderungen an Qualität, Kosten und Zeit der Produktion kurzzyklisch und un-

¹³ Vgl. der Reihe nach Sudhoff et al. (2006); Dombrowski et al. (2006) und Bley; Franke (2001).

¹⁴ Vgl. Dombrowski; Horatzek (2002), S. 121 und Vgl. Berger et al. (2004), S. 83.

¹⁵ Vgl. im Internet www.manufuture.org und Dombrowski et al. (2007), S. 14.

¹⁶ Vgl. Kolakowski et al. (2007), S. 226.

vorhersagbar.¹⁷ Fabriken entwickeln sich zunehmend zu „Produkten“ mit zusätzlichen Dienstleistungen, für die Betreibermodelle implementiert und die teilweise von wechselnden Produzenten genutzt werden können.¹⁸

Die Planung von Fabriken orientiert sich an klaren Zielvorgaben der unternehmensinternen und -externen Auftraggeber. Diese beinhalten neben Zielkriterien für die Fabrik auch verbindliche Projektziele. Planungen müssen immer häufiger und in immer kürzerer Zeit bei möglichst geringen Planungs- und Realisierungskosten durchgeführt werden. Dabei steigen die Anforderungen an die Qualität der Planungsergebnisse.¹⁹ In einem Fabrikplanungsprojekt sind die Arbeitspakete und Planungsergebnisse einer Vielzahl von Arbeitsgruppen zu koordinieren und zu integrieren. Die Arbeitsgruppen werden für ein Projekt oftmals neu zusammengestellt und arbeiten unter Umständen auf unterschiedliche Standorte verteilt, weshalb ein werkzeugunterstützter effizienter Umgang mit Informationen ein wesentlicher Erfolgsfaktor ist.²⁰

Die Phasen des Fabriklebenszyklus sind mit Modellen, Methoden und Werkzeugen zu unterstützen, die unter Maßgabe ihres wirtschaftlichen Einsatzes zu optimierten Ergebnissen führen. Im Bild 1-1 sind auf der rechten Seite Anforderungen an die Digitale Fabrik aufgeführt. Von einem Auftraggeber wird bspw. oftmals die Absicherung der Ergebnisse durch Simulation und Visualisierung sowie die Einbeziehung neuester Konzepte und Problemlösungen in das Planungsergebnis gefordert. Die im Verlauf der Fabrikplanung generierten Modelle sollten durchgängig, d.h. z.B. auch für das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb eingesetzt werden können.²¹

1.2 Problembeschreibung

Die Planung und der Betrieb von Fabriken stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar wobei dem Erfahrungswissen der Mitarbeiter eine hohe Bedeutung zukommt.²² Während der Erarbeitung von Problemlösungen kommt es zur Kombination verschiedenster Wissensarten und Wissensdomänen.²³ Die Problemlösung zeichnet sich dadurch aus, dass viele zu berücksichtigende Informationen voneinander abhängen. Die Komplexität ist umso höher, je mehr Informationen existieren und je mehr diese miteinander vernetzt sind. Eine hohe Vernetztheit erfordert die gleichzeitige Beachtung vieler Informationen und führt dazu, dass nie nur ein Teil des Fabriksystems isoliert von anderen Teilen betrachtet werden kann.²⁴ Der Anteil der Koordinierungs- und Informationsaufgaben bei planerischen Aufgaben kann dabei bis zu 70%

¹⁷ Vgl. Hernández (2003), S. 4. und Kirchner et al. (2003), S. 254-255.

¹⁸ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 442.

¹⁹ Vgl. Nyhuis et al. (2004), S. 95.

²⁰ Vgl. Fleischer et al. (2004), S. 107 und Meierlohr (2003), S. 16.

²¹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 27 und S. 398.

²² Vgl. Schuh et al. (2006), S. 167, 169 und Schmigalla (1995), S. 70.

²³ Vgl. Meierlohr (2003), S. 54.

²⁴ Vgl. Dörner (2006), S. 60-61 und Willke (1991), S. 192. Komplexität bezeichnet nicht nur den Grad der Vernetzung sondern auch die Vielschichtigkeit und Folgelastigkeit eines Entscheidungsfeldes.

der Gesamtarbeitszeit betragen.²⁵ Die folgende Aussage soll bspw. die Komplexität in der Fabrikplanung zu verarbeitender Informationen verdeutlichen:

Die Qualität eines Feindrehprozesses wird durch eine Temperaturschwankung, welche durch das Öffnen eines Hallentors an einer Maschine auftritt, beeinflusst. Bei der Layoutplanung sollte deshalb darauf geachtet werden, die Maschine an einem Ort mit geringen Temperaturschwankungen aufzustellen, wobei die Materialflussorientierung für das Produkt mit den größten Stückzahlen erhalten bleiben soll. Möglicherweise lassen sich auch Modifikationen an der Maschine durchführen, die jedoch die Prozesszeit beeinflussen.

Aufgrund der je nach Projekt unterschiedlichen Planungssituation und Aufgabenstellung ist die Fabrikplanung davon gekennzeichnet, dass sie auf kein standardisiertes Lösungsverfahren zurückgreifen kann.²⁶ Die vorhandenen klassischen Planungsansätze, wie z.B. die Materialflussanalyse, optimieren jeweils Teilprobleme, deren Lösung als Information in die Gesamtplanung einfließt. In jedem Fall hat der Planer das Zielsystem, den Betrachtungs- und Lösungsraum sowie Rahmenbedingungen und Restriktionen erstmalig zu erfassen und unter Einsatz seines Erfahrungswissens zu verarbeiten.²⁷

Die Fabrikplanung zeichnet eine heuristische und iterative Vorgehensweise aus, die von der Erstellung und Bewertung einer Vielzahl von Lösungsvarianten, die zu einer Gesamtlösung verdichtet werden, geprägt ist.²⁸ In der Praxis werden zunehmend synthetische Vorgehensmodelle verfolgt, bei denen sich die Produktionsgestaltung als Konsequenz der Auswahl von Gestaltungsmustern ergeben.²⁹ Zur Anwendung kommen bspw. Typologisierungen oder Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich der Gestaltung Ganzheitlicher Produktionssysteme.³⁰ Die Rahmenbedingungen und Restriktionen der spezifischen Planungsaufgabe erfordern jedoch weiterhin komplexe Planungstätigkeiten zur Integration von allgemeingültigen Lösungsvorschlägen in die Gesamtlösung sowie ihre detaillierten Ausplanung.

Aufgrund des Projektcharakters der Fabrikplanung und den oftmals neuartigen Problemstellungen sind Fabrikplanungstätigkeiten von der Anwendung eines hohen Anteils innovativen Wissens geprägt. Die Tätigkeiten sind sehr spezifisch und werden relativ selten im Unternehmen durchgeführt, weshalb i.d.R. nur für Teilaufgaben auf standardisiertes allgemeingültiges Wissen zurückgegriffen werden kann. Im Bild 1-2 werden die Tätigkeiten der Fabrikplanung

²⁵ Vgl. Meierlohr (2003), S. 140 für eine Angabe von 45% und Bley et al. (2006), S.21 für eine Angabe von 70% für Koordinierungs- und Informationsaufgaben.

²⁶ Vgl. Aggteleky (1987), S. 49-51.

²⁷ Unter Randbedingungen werden in dieser Arbeit durch die Fabrikplanung zu berücksichtigende Eingangsdaten verstanden, wie die Kapazität, der maximale Flächenbedarf oder rechtliche Vorgaben. Restriktionen ergeben sich hingegen im Vorfeld oder während der Planung als Folge der Entscheidung für bestimmte Gestaltungsvarianten.

²⁸ Vgl. Aggteleky (1987), S. 50-53 und Kettner et al. (1984), S. 5-6.

²⁹ Vgl. Schuh et al. (2006), S. 169.

³⁰ Vgl. Schenk; Schulte (2003); Schuh (2006), S. 169; Nofen et. al. (2005), S. 20-21 und Meier et al. (2004).

hinsichtlich der verwendeten Wissensarten und -domänen und ihrer Ausführungshäufigkeit anderen Aufgaben im Unternehmen gegenüberstellt.

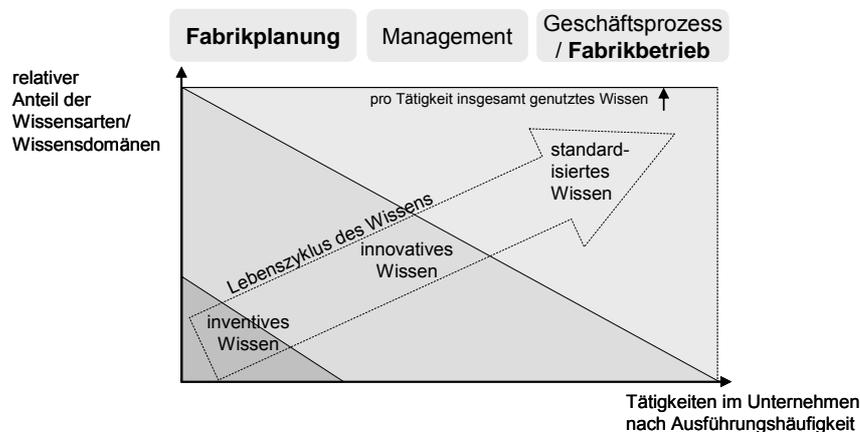


Bild 1-2: Einordnung der Tätigkeiten der Fabrikplanung³¹

Der Anteil des innovativen Wissens am insgesamt genutzten Wissen differiert in Abhängigkeit von dem individuellen Erfahrungshintergrund der Mitarbeiter und dem für die Problemstellung relevanten verfügbaren Wissen im Unternehmen. Oftmals wird das Wissen von externen Personen oder durch Recherchen erstmalig in ein Unternehmen getragen. Dieses Wissen wird in Bild 1-2 als inventives Wissen bezeichnet, welches mit seiner Anwendung für einen spezifischen Planungsfall zu innovativem Wissen gewandelt wird.³²

In den vorangegangenen Ausführungen wurde insbesondere die Fabrikplanung als komplexe und wissensintensive Aufgabe charakterisiert. Für standardisiertes Wissen und etablierte Routinen sind in den Unternehmen oftmals Methoden- und Wissensdatenbanken bzw. entsprechende Kompetenzen bei den Mitarbeitern vorhanden.³³ Insbesondere bei gestaltenden Tätigkeiten³⁴ und bei der Erarbeitung von fabrikspezifischen Lösungen kommt es jedoch zur verstärkten Nutzung von personengebundenem Erfahrungswissen und innovativem Wissen. Dieses Wissen ist in den Planungsergebnissen bzw. der später realisierten Fabrik verkörpert. Problematisch ist es, wenn es dabei für Folgeplanungen nicht explizit verfügbar ist, da Informationen aufwändig wiederbeschafft werden müssen oder vorausgedachte implizite Sachverhalte nicht berücksichtigt werden.

³¹ In Anlehnung an Dombrowski; Horatzek (2002), S. 123.

³² Vgl. Dombrowski; Tiedemann (2004), S. 138.

³³ Vgl. Dombrowski; Tiedemann (2004), S. 139.

³⁴ Die Tätigkeiten der Planung können in Routinetätigkeiten, gestaltende Tätigkeiten und bewertende Tätigkeiten unterteilt werden. Vgl. Meierlohr (2003), S. 70.

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Digitale Fabrikplanungswerkzeuge sind aus den heutigen Planungsprozessen nicht mehr wegzudenken. Die Weiterentwicklung der Digitalen Fabrik (vgl. Abschnitt 1) sowie der Einsatz virtueller Fabrikmodelle in Forschung und Praxis werden die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb zunehmend prägen.³⁵ Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung einer Methode und von Anwendungen, welche die Denkprozesse und die Kognition des Planers mit einer Informations- und Wissensversorgung im Kontext der Digitalen Fabrik besser als bisher unterstützen. Die Kognition ist ein Sammelbegriff für alle Prozesse und Strukturen, die mit dem Wahrnehmen und Erkennen zusammenhängen. Hierzu gehören z.B. Denken, Erinnerung, Vorstellen, Gedächtnis, Lernen und Planen.³⁶

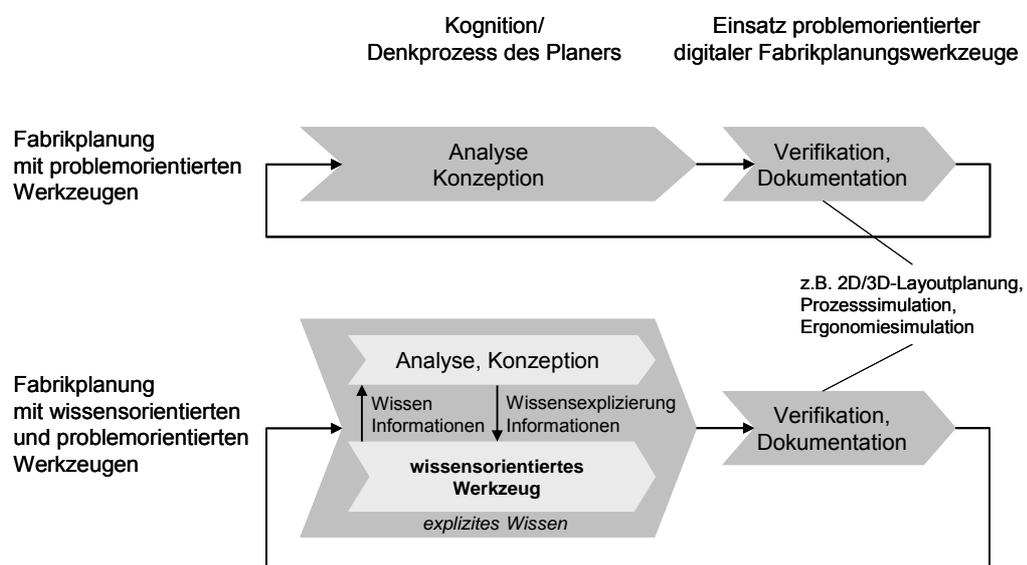


Bild 1-3: Forschungsansatz dieser Arbeit³⁷

In Bild 1-3 wird der Forschungsansatz dieser Arbeit verdeutlicht, in dem der Einsatz problemorientierter digitaler Planungswerkzeuge (vgl. Abschnitt 1) dem in dieser Arbeit verfolgten wissensorientierten Werkzeugeinsatz gegenübergestellt wird.

Problemorientierte Werkzeuge werden zeitlich nach dem Denkprozess, welcher durch den Planer vollzogen wird angewendet. Sie dienen primär der Verifikation und Dokumentation bereits „erdachter“ Planungsergebnisse. Dabei kann es sich um Ergebnisse mit geringem Umfang, z.B. die Planung einer Maschinenverschiebung und die entsprechende Nachführung im 2D-Layout oder um umfangreiche Ergebnisse, wie die Konzipierung einer Taktstraße und ihre

³⁵ Vgl. Straßburger et al. (2006).

³⁶ Vgl. Strube (1995), S. 299-300 und Brockhaus (2005).

³⁷ In dieser Arbeit wird unter explizitem Wissen in eine formale Sprache gefasstes Wissen verstanden. Implizites Wissen liegt hingegen zunächst in den Köpfen der Mitarbeiter vor und kann expliziert werden. In der Literatur finden sich unterschiedlichste Definitionen für explizites und implizites Wissen. Vgl. Nonaka; Takeuchi (1997), S. 72-73 oder Polanyi (1985), S. 14-15.

anschließende Simulation handeln.

Der Einsatz wissensorientierter Werkzeuge soll hingegen primär die Kognition des Nutzers durch Informationsversorgung und Wissensrepräsentation unterstützen. Dabei werden Eingangsinformationen zur Verfügung gestellt, welche der Planer in einem Denkprozess verarbeiten kann. Erst in einem zweiten Schritt werden die Ergebnisse ggf. in einem problemorientierten Werkzeug verifiziert und dokumentiert. Demnach wird in dieser Arbeit ein Werkzeug entwickelt, das als Wissensbasis und weniger als Planungsinstrument dient. Mit dem wissensorientierten Ansatz kann auch Nutzen virtueller Fabrikmodelle mit Hilfe der Implementierung von Informationen und Wissen in das Modell über die heutige Darstellungs- und Anordnungsfunktion hinaus erweitert werden.

Das Ziel ist es, dem Nutzer eines digitalen Fabrikmodells Informationen und Wissen kontextsensitiv und zielgerichtet zur Verfügung zu stellen. Das zu entwickelnde Instrumentarium soll sich insbesondere auch für die Abbildung von nicht-standardisierten und fabrikspezifischen Erfahrungswissen (vgl. Abschnitt 1.2) eignen. Im Ergebnis können dann Aufgaben von Fabrikplanung und -betrieb aufgrund einer verbesserten Verfügbarkeit von Informationen und Wissen schneller und mit höherer Ergebnisqualität durchgeführt werden.

Das Forschungsvorhaben ist auf eine in der Praxis festgestellte Problemsituation ausgerichtet und damit den anwendungsorientierten Wissenschaften zuzuordnen. Die Arbeit verfolgt ein pragmatisches Wissensziel, bei dem auf Basis von Modellen und Regeln ein wissenschaftlich fundiertes Handeln in der Praxis angestrebt wird.³⁸ In dieser Arbeit wird ein Lösungsverfahren für ein konkretes Problem entwickelt. Das Problem besteht primär in dem Aufwand, der insbesondere für die Erfassung und Verarbeitung von Informationen bei der durch eine hohe Komplexität und Wissensintensität gekennzeichneten Fabrikplanung anfällt. Die wissenschaftliche Aufgabe dieser Arbeit ist es, eine Vorgehensweise für die Lösung dieses Problems in der Praxis anzubieten. Von Interesse ist dabei nicht „was“, sondern „wie“ etwas getan werden soll.³⁹ Gemäß dem Wesen der anwendungsorientierten Wissenschaften handelt es sich um eine interdisziplinäre Arbeit.⁴⁰ In ihr werden wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Bereichen Fabrikplanung, Digitale Fabrik, Informatik und Wissensverarbeitung miteinander verbunden.

Der Aufbau der Arbeit ist in Bild 1-4 dargestellt. Im zweiten Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen aufgeführt. Insbesondere wird auf die Fabrikplanung, die Modellierung im Allgemeinen sowie mit Bezug zur Produktion und auf die Wissensrepräsentation eingegangen. Den Abschluss des Kapitels bildet die Beschreibung des Lösungsansatzes sowie der Vorgehensweise zur Entwicklung der Lösung.

³⁸ Vgl. Ulrich (1995), S. 165-166 und Fischer (1995), S. 24.

³⁹ Vgl. Ulrich (1984), S. 179-180.

⁴⁰ Vgl. Ulrich (1995), S. 166.

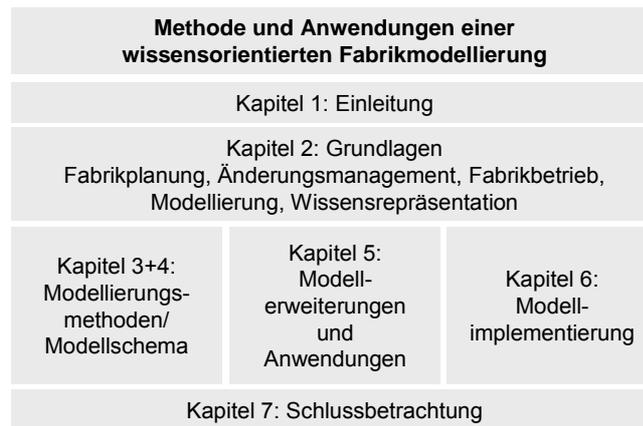


Bild 1-4: Aufbau der Arbeit

Im dritten und vierten Kapitel erfolgt die Entwicklung eines Modellschemas, welches dazu geeignet sein soll, die im Fabriklebenszyklus relevanten Informationen in einem digitalen Fabrikmodell abzubilden. Das Modellschema ist durch eine hybride Modellstruktur gekennzeichnet, für welche zwei unterschiedliche Modellierungsmethoden verwendet werden. Im Kapitel 3 wird die Modellstruktur für ein *Objektmodell* und im Kapitel 4 für ein *Relationenmodell* als Teilmodelle des hybriden Gesamtmodells hergeleitet.

Im fünften Kapitel werden an dem zuvor entwickelten Gesamtmodell Erweiterungen vorgenommen. Diese Erweiterungen erhöhen die Praktikabilität und die Anwendungsmöglichkeiten des Gesamtmodells. Weiterhin werden konkrete Anwendungsmöglichkeiten der wissensorientierten Fabrikmodellierung im Fabriklebenszyklus aufgezeigt.

Das sechste Kapitel enthält Hinweise zur Implementierung und Nutzung der wissensorientierten Fabrikmodellierung für spezifische Fabriken. Dabei wird das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Werkzeug FabrikNet vorgestellt, mit dem diese Modelle prototypisch erstellt werden können. FabrikNet wurde für ein Szenario in einer Fabrik für Aluminiumussteile angewendet und die Modellierungsmethode als auch die Modellstruktur in diesem Zusammenhang erprobt.

Den Abschluss der Arbeit bildet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten das siebente Kapitel.

2 Grundlagen und Inhalt

Das zweite Kapitel führt in die für diese Arbeit relevanten Grundlagen ein und legt den Stand der Forschung dar, bevor für die im Abschnitt 1.3 vorgegebene Zielstellung ein Lösungsansatz beschrieben wird. Dieser Arbeit liegt eine aus der Praxis abgeleitete Fragestellung zugrunde. Hieraus ergibt sich, dass nicht der Stand der Forschung eines einzelnen Wissensgebietes dezidiert dargelegt wird. Vielmehr werden die für die Entwicklung des wissensorientierten Fabrikmodells relevanten Grundlagen mehrerer Wissensgebiete aufgeführt und der Stand der Forschung zu ihrer interdisziplinären Verflechtung ausgewertet. Im Abschnitt 2.1 werden mit der Fabrikplanung, dem Änderungsmanagement und dem Fabrikbetrieb die Anwendungsgebiete des wissensorientierten Fabrikmodells beschrieben. Modelle und die Modellierung für die Produktion sind der Betrachtungsgegenstand im Abschnitt 2.2. Im Abschnitt 2.3 wird auf die Wissensrepräsentation, dem dritten Wissensgebiet dieser Arbeit eingegangen. Eine Reflexion bisheriger interdisziplinärer Arbeiten, welche die drei genannten Anwendungsgebiete mit der Modellierung und Wissensrepräsentation integrieren, erfolgt in Abschnitt 2.4. Inhalt dieses Abschnitts ist weiterhin die Definition der Anforderungen an eine Lösung für die wissensorientierte Fabrikmodellierung sowie die Formulierung eines Lösungsansatzes, welcher der Zielstellung dieser Arbeit gerecht wird.

2.1 Fabrikbezogene Grundlagen

Die Fabrik wird im Abschnitt 2.1.1 zunächst mit Hilfe der Allgemeinen Systemtheorie analysiert, um die Grundlagen für eine systematische Betrachtung dieses Planungsobjektes zu legen. Der Aufbau eines Systems, insbesondere die Struktur, welche aus Elementen und Relationen gebildet wird, ist das zentrale dieser Arbeit zugrunde liegende Konzept. Auf die Vorgehensweisen bei der Planung von Fabrikssystemen und den Planungsablauf wird im Abschnitt 2.1.2 eingegangen. Nicht immer werden Änderungen an einem Fabrikssystem in Form von Fabrikplanungsprojekten durchgeführt. Während des Fabrikbetriebes kommt es zu ständigen Anpassungen, die durch das Änderungsmanagement für Fabriken organisiert werden. Das Änderungsmanagement wird im Abschnitt 2.1.3 thematisiert, wobei der aus der Produktentwicklung bekannte Ansatz zum produktbezogenen Änderungsmanagement auf das Änderungsobjekt Fabrik übertragen wird. Das wissensorientierte Fabrikmodell kann auch für den Fabrikbetrieb eingesetzt werden, weshalb im Abschnitt 2.1.4 auf wesentliche Funktionen des Fabrikbetriebes eingegangen wird.

Die Bewertung von Fabriken erfolgt anhand von quantitativen und qualitativen Kriterien, deren Thematisierung im Abschnitt 2.1.5 erfolgt. Die Berücksichtigung qualitativer Kriterien bei der Fabrikplanung wird seit vielen Jahren propagiert, ihre systematische Berücksichtigung und Operationalisierung erfolgt jedoch erst seit ca. 10 Jahren und wurde insbesondere für das

Kriterium Wandlungsfähigkeit wissenschaftlich diskutiert.⁴¹ Den Abschnitt 2.1.6 bilden die Grundlagen zur Unterstützung der Fabrikplanung mit digitalen Fabrikplanungswerkzeugen und ihrer Weiterentwicklung zur Digitalen Fabrik.

2.1.1 Fabriken und Fabrikssysteme

Der Begriff Fabrik steht in engem Zusammenhang mit den Begriffen Betrieb und Unternehmen. Er wird insbesondere dann verwendet, wenn produktionstechnische und produktionsorganisatorische Aspekte im Vordergrund stehen.⁴² Dieser Arbeit liegt folgendes Begriffsverständnis für eine Fabrik zugrunde:

Die Fabrik ist ein sozio-technisches System, in dem Wertschöpfung durch Produktion von Sachgütern unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.

Für die wissenschaftliche Untersuchung von Fabriken wird oftmals auf ein Erklärungsmodell zurückgegriffen dem die Allgemeine Systemtheorie zugrunde liegt.⁴³ Die Allgemeine Systemtheorie ist nicht auf eine bestimmte Disziplin begrenzt. Die Ursprünge des Systemdenkens lassen sich bis in die griechische Philosophie zurückverfolgen. Durch Bertalanffy wurde in den 1930er Jahren mit dem Begriff der Allgemeinen Systemtheorie der bereits von Aristoteles beschriebene Begriff der Ganzheit präzisiert. Das Ganze auf einer höheren Ebene ist hiernach die Summe der Bestandteile einer unteren Ebene und ihrer Beziehungen. Das Systemdenken wird zunehmend zur Verwissenschaftlichung praktischen Problemlösens benutzt, um der Komplexität von Problemen, mit vielen Teilaspekten und Zusammenhängen zwischen Teilaspekten, gerecht zu werden.⁴⁴ Systeme lassen sich nach ihren Eigenschaften klassifizieren, wobei im Wesentlichen natürliche, technische und soziale Systeme unterschieden werden. Fabriken gehören zu den sozio-technischen Systemen, die aus künstlich geschaffenen technischen Systemen, wie den Maschinen und Anlagen und sozialen Systemen, den arbeitenden Menschen, bestehen.⁴⁵ Fabriken wurden in der Literatur auch im Zusammenhang mit dem systemtheoretisch-kybernetischen Ansatz untersucht. Sie können beispielweise als selbstorganisierende und von nichtlinearer Dynamik geprägte Systeme charakterisiert werden.⁴⁶

Nach Ropohl umfasst der Systembegriff mit dem funktionalen Konzept, dem strukturalen Konzept und dem hierarchischen Konzept drei interdependente und sich einander ergänzende

⁴¹ Vgl. Hernández (2003), S. 31-33.

⁴² Vgl. Kettner et al. (1984), S. 1; Schmigalla (1995), S. 34.

⁴³ Vgl. Hernández (2003), S. 35-43; Harms (2004), S. 31-34 und Wiendahl (1997), S. 8-11; Schenk; Wirth (2004), S. 77-80.

⁴⁴ Vgl. Ropohl (1999), S. 71-73.

⁴⁵ Vgl. Harms (2004), S. 32 und Spieker (2006), S. 171.

⁴⁶ Vgl. Schuh (2006), S. 168; Harms (2004), S. 34-35 und zum kybernetischen Ansatz allgemein bei Vester (2000), S. 124-126.

Konzepte der Systemtheorie (vgl. Bild 2-1).⁴⁷

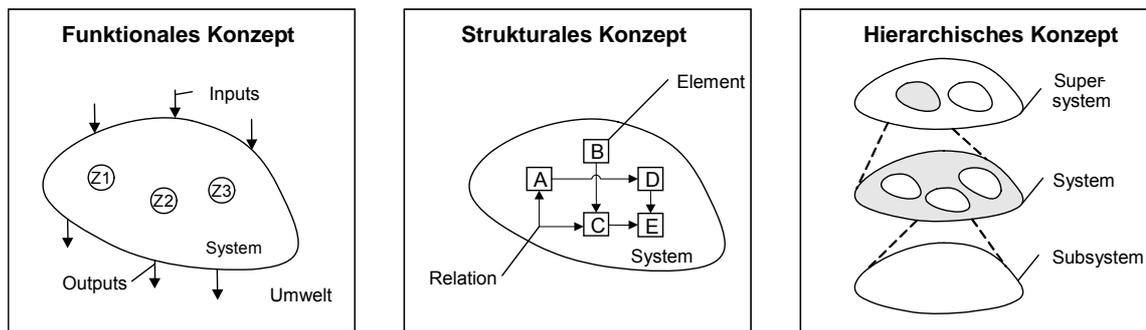


Bild 2-1: Konzepte der Allgemeinen Systemtheorie⁴⁸

In der Literatur gibt es eine Reihe von Ansätzen, die den komplexen Untersuchungsgegenstand Fabrik mit Modellelementen der Systemtheorie analysieren. Im Folgenden werden die drei Konzepte erläutert und Beispiele ihrer Anwendung für das Fabrikssystem aufgeführt.

Nach dem funktionalen Konzept wird ein System als eine Black-Box aufgefasst, bei der die Attribute oder Eigenschaften des Systems - Input, Output und Zustand - sowie bestimmte Zusammenhänge zwischen diesen Eigenschaften bekannt sind. Dabei wird nicht nach den inneren Zusammenhängen in einem System gefragt, sondern nach dem Verhalten eines Systems in seiner Umgebung. Ein Beispiel der Anwendung des funktionalen Konzeptes für Fabriken ist die Analyse der Wertschöpfung mit Hilfe von Prozessen und Prozessketten oder die Abbildung von Flusssystemen.⁴⁹

Im Verständnis des strukturalen Konzepts wird ein System als eine Gesamtheit miteinander verknüpfter Elemente verstanden. Das Ganze ist mehr als die immer gleiche Summe der Elemente. Aus den Elementen und einer Vielzahl von Beziehungen oder Relationen zwischen den Elementen entstehen unterschiedliche Systemeigenschaften. Das strukturale Systemdenken impliziert, Teile nicht isoliert, sondern in ihrer Interdependenz mit anderen Teilen innerhalb eines Systems und somit in ihrem Kontext zu betrachten.

Die Fabrikstruktur formt sich aus den Elementen der Fabrik und ihren Beziehungen. Als kleinstes Strukturelement wird oftmals ein Betriebsmittel oder Handarbeitsplatz in Verbindung mit einem oder mehreren Mitarbeitern angeführt. Die Fertigungsprinzipien Werkstattfertigung, Inselfertigung, Baustellenfertigung oder Fließfertigung stellen unterschiedliche Strukturösungen für einen Fertigungsbereich auf einer entsprechend niedrigeren Detaillierungsebene dar.⁵⁰ Schmigalla beschreibt eine Fabrik als Produktionssystem in einer mengentheore-

⁴⁷ Vgl. Ropohl (1999), S. 75-77.

⁴⁸ Hernández (2003), S. 37.

⁴⁹ Vgl. Wirth (1989), S. 26-35 sowie Schenk; Wirth (2004), S. 81-93.

⁵⁰ Vgl. Harms (2004), S. 12.

tischen Weise und verbindet dabei das strukturele mit dem funktionalen Konzept der Allgemeinen Systemtheorie (vgl. Bild 2-2). Die Elemente lassen sich den Produktionsfaktoren Material, Realkapital und Personal zuordnen. Die Elementmenge M , die Prozesse P als Menge der Einzelprozesse über M sowie die Struktur S als Menge der zweistelligen Relationen über M bilden als geordnetes Tripel Σ das Produktionssystem, welches von seiner Umgebung abgegrenzt wird. Die Randstruktur in Form von Input und Output stellt die Beziehung des Produktionssystems zur Umwelt her.

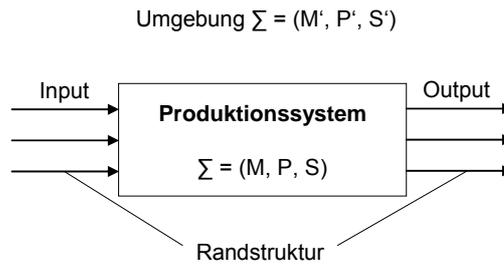


Bild 2-2: Formale Darstellung eines Produktionssystems⁵¹

Mit dem hierarchischen Konzept ist die Anschauung verbunden, dass Teile eines Systems wiederum Systeme (Subsysteme) sein können und im Umkehrschluss Systeme als Teile eines übergeordneten Supersystems interpretiert werden können. Bei einer hierarchischen Systembetrachtung kann man mit der Bewegung abwärts in der Systemhierarchie eine detaillierte Erklärung des Systems erzielen, während man bei einer Aufwärtsbewegung Aufschluss über die Bedeutung des Systems erreicht. Während Sub- und Supersysteme infolge einer hierarchischen Untergliederung des betrachteten Gesamtsystems entstehen, handelt es sich bei Teilsystemen um eine Zusammenfassung von Elementen nach jeweils anderen Kriterien auf vorwiegend horizontaler Ebene.⁵²

Für die horizontale und vertikale Untergliederung einer Fabrik gibt es in der Literatur viele Vorschläge, wobei sich die Ansätze vor allem in der verwendeten Ebenenanzahl und Ebenenbezeichnung unterscheiden. In Bild 2-3 ist eine Strukturierung der Fabrik in die fünf Fabrikebenen Arbeitsplatz, Bereich, Fabrik bzw. Gebäude, Werk und Produktionsnetz dargestellt.⁵³

⁵¹ Schmigalla (1995), S. 82.

⁵² Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 79.

⁵³ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 123-125; Wiendahl (2002), S. 126; Hernández (2003), S. 42-43.

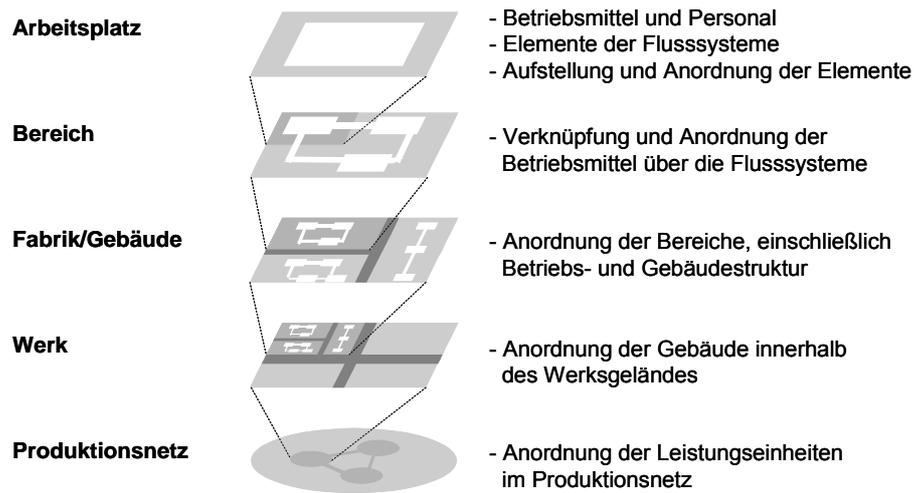


Bild 2-3: Ebenen und Strukturen einer Fabrik⁵⁴

Die Instanzen der Ebenen sind Teilsysteme eines Fabriksystems auf einer Abstraktionsebene. Sie integrieren wiederum Instanzen von Subsystemen oder gehören zu Instanzen von Supersystemen. Ein bestimmter Fabrikbereich besteht z.B. aus mehreren Arbeitsplätzen. Ein Arbeitsplatz kann auch ein abgegrenztes Fertigungs-, Montage- oder Logistiksystem sein, welches aus einem oder mehreren eng gekoppelten Arbeitsplätzen mit Fertigungseinrichtung, je einer Transport-, Übergabe- und Handhabungseinrichtung sowie je einem Eingangs- und Ausgangsspeicher besteht.⁵⁵

Eine weitere Variante der horizontalen und vertikalen Gliederung des Fabriksystems ist die Einteilung in die Teilsysteme Fertigungssystem, Montagesystem, Produktionssystem und Gebäudesystem. Fertigungs- und Montagesysteme dienen der Herstellung von Einzelteilen und Baugruppen mittels Be- und Verarbeitungsmaschinen bzw. mittels Füge- und Montageeinrichtungen einschließlich Transport-, Umschlag- und Lagereinrichtungen. Das Produktionssystem integriert das Fertigungs- und Montagesystem und somit Maschinen und Anlagen für unterschiedliche technologische Prozesse mit den Prozessen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS).⁵⁶ Das Gebäudesystem besteht aus dem Gebäude mit seiner Geometrie, Belastungsparametern sowie der technischen Gebäudeausstattung zur Unterbringung des Produktionssystems. Das Fabrikssystem setzt sich letztendlich aus dem Gebäude- und Produktionssystem sowie der infrastrukturellen Anbindung zusammen.⁵⁷

In Bild 2-4 ist ein Lebenszyklusmodell für Fabriken dargestellt. Im oberen langfristigen Lebenszyklusmodell ist zunächst der Zusammenhang zwischen den Lebenszyklen von Produk-

⁵⁴ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 124.

⁵⁵ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 95.

⁵⁶ Das Produktionssystem ist nicht mit den Ganzheitlichen Produktionssystemen zu verwechseln, welche z.B. bei Dombrowski et al. (2006), S. 156 als „ein unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Produktion“ definiert wird.

⁵⁷ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 98-99.

ten, Prozessen, dem Gebäude und der Grundstücksfläche verdeutlicht. Für eine möglichst effiziente Nutzung der Fabrik ist einerseits die zeitliche Harmonisierung der einzelnen Lebenszyklen als auch ihre Flexibilisierung anzustreben. Bei der Planung der Fabrik sollte eine lebenszyklusübergreifende Optimierung sowie Bewertung von Lösungsvarianten vorgenommen werden, um eine nachhaltige Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.⁵⁸

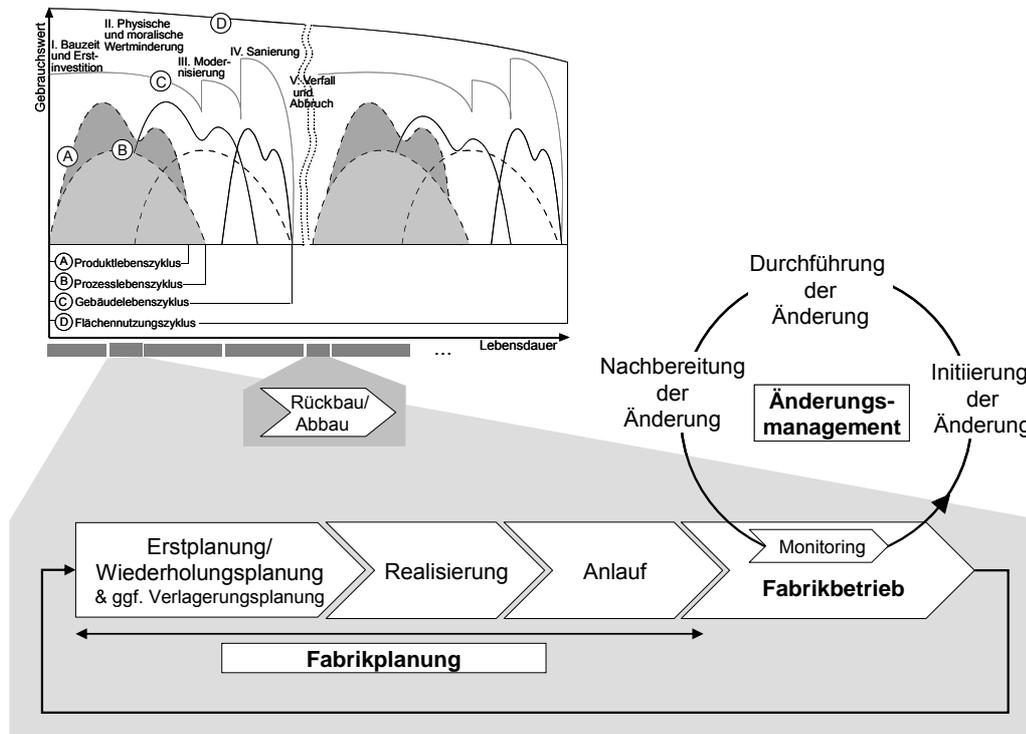


Bild 2-4: Langfristige und kurzfristige Lebenszyklen einer Fabrik⁵⁹

Im unteren Teil von Bild 2-4 ist der kurzfristige Lebenszyklus einer Fabrik oder eines Teilsystems der Fabrik dargestellt. Sein Durchlauf erfolgt in wiederholten Schleifen im langfristigen Fabriklebenszyklus. Gründe für eine Wiederholung sind z.B. die Reorganisation zur Effektivitätssteigerung, die Schaffung der Voraussetzung für die Fertigung neuer Produkte, die Anpassung der Produktionskapazität an die Nachfrage, die Einführung neuer Fertigungstechnologien oder die Verlagerung von Teilen der Produktion.⁶⁰ Die Fabrikplanung schließt die Phasen Planung, Realisierung und Anlauf ein. Ihr folgt der Fabrikbetrieb in dessen Verlauf, ausgelöst durch ein Monitoring der internen und externen Einflüsse auf das Fabrikssystem, notwendige Änderungen am Fabrikssystem im Rahmen des Änderungsmanagements vollzogen

⁵⁸ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 106 und Schuh et al. (2004c), S. 116-117. Kapazität und Kosten des Produktionsprozesses sollten z.B. auf die Produktlebensphase ausgerichtet sein oder eine umfassende Reorganisation/Technologieänderung nur bei entsprechender Lebensdauer/Eignung der Fabrikanlagen und Gebäude erfolgen.

⁵⁹ In Anlehnung an Schenk; Wirth (2004), S. 106-109 sowie Aurich et al. (2004), S. 382.

⁶⁰ Vgl. Kettner et al. (1984), S. 14.

werden.⁶¹ Der kurzfristige Lebenszyklus wird zeitlich insbesondere zwischen markanten Ereignissen im Produkt- und Prozesslebenszyklus durchlaufen. Zum Ende des Gebäudelebenszyklus bzw. der Aufgabe des Standortes und der Verlagerung von Produktionsanlagen erfolgt letztendlich der Rückbau bzw. Abbau der Fabrik.

2.1.2 Fabrikplanung

Die Aufgabe der Fabrikplanung ist es, unter Berücksichtigung vielfältiger unternehmensinterner und -externer Rahmenbedingungen einen technisch einwandfreien und wirtschaftlichen Ablauf des Produktionsprozesses zu ermöglichen.⁶² Der Begriff - Fabrikplanung - wird in dieser Arbeit wie folgt definiert:

*Die Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Gestaltung einer Fabrik von der ersten Idee bis zum Anlauf der Produktion.*⁶³

Als Synonyme bzw. Unterbegriffe werden in der älteren Literatur auch die Begriffe Werksplanung, Werksstrukturplanung, Industrieplanung oder Betriebsstättenplanung verwendet.⁶⁴ Die Fabrikplanung bezieht unter anderem Erkenntnisse aus den Arbeitswissenschaften und Wirtschaftswissenschaften in ihre Überlegungen ein.⁶⁵ In Tabelle 2-1 sind Planungsgrundsätze zusammengestellt, von denen die Fabrikplanung wesentlich geprägt wird.⁶⁶

Vorgehensweise	Beschreibung
heuristisches Planungsvorgehen und Variantenbildung	Auf Basis der Fachkenntnis, Erfahrung und Intuition des Planers wird eine Anzahl vielversprechender Lösungsvarianten relativ willkürlich und durch schöpferische Tätigkeit erarbeitet. Entscheidend für die Anzahl der Varianten ist, dass die tatsächlich optimalen Lösungen mit ausreichender Sicherheit erfasst werden. Die Varianten werden gegenübergestellt, teilweise kombiniert und anhand von Kriterien bewertet. Die engere Auswahl von Alternativen wird detailliert untersucht und daraufhin weitere Varianten ausgeschlossen.

⁶¹ Vgl. Schuh et al. (2004b), S. 123.

⁶² Vgl. Kettner et al. (1984), S. 3.; Aggteleky (1987), S. 29; Felix (1998), S. 36. Unternehmensinterne Rahmenbedingungen sind z.B. die zu fertigenden Produkte, verwendete Technologien, die Unternehmensstrategie, die Einbettung in das Produktionsnetzwerk und Unternehmensstandards. Unternehmensexterne Rahmenbedingungen sind z.B. die Merkmale des Beschaffungs- und Absatzmarktes, das sozio-kulturelle Umfeld und rechtliche Bestimmungen. Vgl. hierzu auch Baumeister (2003), S. 55.

⁶³ Die Definition folgt teilweise einem unveröffentlichten VDI-Richtlinienentwurf zur Fabrikplanung mit dem Stand vom Juli 2006. Jedoch werden Anpassungen im laufenden Betrieb nicht der Fabrikplanung zugeordnet.

⁶⁴ Vgl. Schmigalla (1995), S. 69.

⁶⁵ Vgl. Spieker (2006), S. 171.

⁶⁶ Vgl. Aggteleky (1987), S. 49-54; Kettner et al. (1984), S. 4-8 und Schmigalla (1995), S. 85-88 und 98.

Ausnutzung des synergetischen Effekts	Der synergetische Effekt besagt, dass eine gesamthafte Lösung aufgrund zusätzlicher Kombinationsmöglichkeiten von Problemgruppen oftmals mehr bietet als die Summe isolierter Teillösungen. Die Aufgabenstellung für ein Fabrikplanungsprojekt sollte deshalb eine zusammengefasste Betrachtung von Problemgruppen ermöglichen.
breite Basis zu Planungsbeginn	Zum Anfang der Planung wird ein möglichst weiter und ggf. auch ausgefallener Lösungsraum aufgespannt und sich dann schnell auf vielversprechende Lösungen konzentriert.
ganzheitliche Planung	Die Planung einer Fabrik besteht aus einer Vielzahl eng miteinander verknüpfter Teilaufgaben. Die Lösung dieser Teilaufgaben kann nicht isoliert geschehen, sondern muss auf ein Gesamtziel ausgerichtet sein. Dies führt dazu, dass ggf. eine suboptimale Teillösung zu einer optimalen Gesamtlösung führt.
Idealplanung und Realplanung	Die Gegenüberstellung einer idealen Lösung und einer den vorliegenden Restriktionen entsprechenden realen Lösung gibt Aufschluss über die Optimiertheit der realen Lösung. Bei entsprechenden Potenzialen können die Restriktionen überprüft werden.
iteratives Vorgehen	In der Fabrikplanung wird in mehreren Stufen vom Groben zum Feinen geplant. Weiterhin wird die Gesamtplanung auf Arbeitspakete aufgeteilt. Es gibt Rückkopplungen, wenn die feinere Planung Überprüfungen bzw. Änderungen an der gröberen Planung erfordert oder die Ergebnisse eines Arbeitspaketes Folgen für die Arbeit an einem anderen Arbeitspaket haben.
funktionsorientierte Planung	Ausgangspunkt jeder Planung sind das zu fertigende Produktspektrum und die technologischen Kernprozesse.
wirtschaftliche Planung	Bei der Planung ist eine Unterplanung aber auch eine Überplanung zu vermeiden. Detailplanungen können in die Ausführungsphase verlagert werden.
interdisziplinäre Planung und Teamarbeit	Fabrikplanung wird durch eine Vielzahl von Fachplanern durchgeführt, die im Team arbeiten.
Anwendung vieler Aktivitätsarten	Aktivitätsarten der Planung sind z.B. Synthese, Integration, Analyse, Konzipierung, Recherchieren, Überprüfen, Bewerten, Verifizieren, Koordinieren, Dokumentieren, Realisieren und Initiieren.

Tabelle 2-1: Planungsgrundsätze der Fabrikplanung

Die Fabrikplanung wird in Form von Projekten durchgeführt. Diese können sich bzgl. ihrer Zielstellung und ihres Umfangs stark unterscheiden. Ein Differenzierungsmerkmal für Fabrikplanungsprojekte sind bspw. die Planungsfälle, bei denen zwischen Neubau (Greenfield-Planung), Um- bzw. Neugestaltung oder Erweiterung (Brownfield-Planung) sowie Rückbau und Revitalisierung differenziert wird.⁶⁷ Die Fabrikplanung kann von unternehmensinternen Mitarbeitern oder externen Fabrikplanungsdienstleistern durchgeführt werden. Dabei stehen

⁶⁷ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 229 und Gröpke et al. (2004), S. 179-182.

z.B. spezifischen Betriebskenntnissen oder geringeren Kosten eine breitere Erfahrungsbasis und objektivere Sichtweise gegenüber.⁶⁸

Zur Systematisierung des Fabrikplanungsprozesses existiert in der Literatur eine Vielzahl von Phasenmodellen.⁶⁹ Allen Modellen ist gleich, dass sie entgegen der prinzipiellen Darstellung nicht von voneinander klar abgegrenzten und nacheinander zu durchlaufenden Phasen ausgehen. Vielmehr sind fließende Übergänge mit zahlreichen Rückkopplungen im Planungsprozess die Regel.⁷⁰ In Bild 2-5 ist ein Phasenmodell exemplarisch aufgeführt.⁷¹

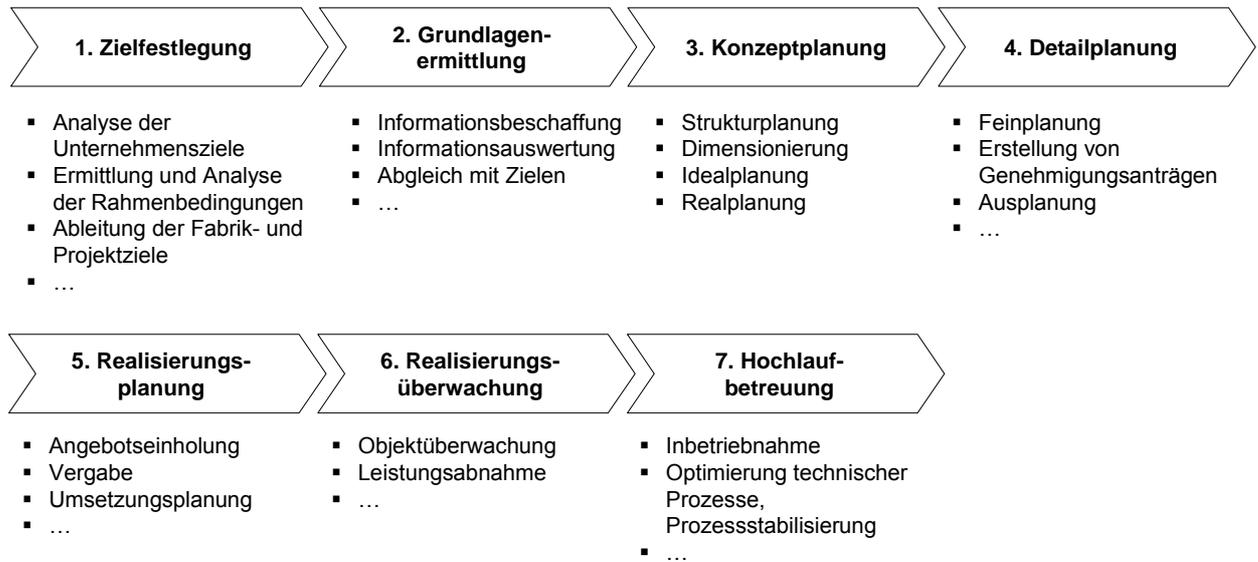


Bild 2-5: Phasen des Fabrikplanungsprozesses

Parallel zu den spezifischen Tätigkeiten der Phasen des Fabrikplanungsprozesses werden phasenübergreifende ergänzende Tätigkeiten ausgeführt. Diese sind z.B. das Projektmanagement, die Visualisierung der Planungsergebnisse, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Aufgaben des Wissensmanagements. Zum Ende des Projektes erfolgt die Projektbewertung, welche zusammen mit dem Auftraggeber durchgeführt wird.⁷²

Die Fabrikplanung ist eine komplexe interdisziplinäre Planungsaufgabe, welche die Integration der Ergebnisse einer Vielzahl von Fachplanern erfordert. Ansätze wie die synergetische, kooperative oder partizipative Fabrikplanung versuchen die Vernetzung der Einzelaktivitäten der Planer - insbesondere bzgl. der Produktions- und Gebäudeplanung - zu optimieren sowie

⁶⁸ Vgl. Kettner et al. (1984), S. 16.

⁶⁹ Vgl. Gröpke et al. (2004), S. 177-178; Kettner et al. (1994), S. 5; Felix (1998), S. 38 und Meierlohr (2003), S. 12-14.

⁷⁰ Vgl. Kettner et al. (1984), S. 5.

⁷¹ Das Phasenmodell folgt einem unveröffentlichten VDI-Richtlinienentwurf zur Fabrikplanung mit dem Stand vom Juli 2006. Im Bild werden die Fabrikplanungsphasen aus Bild 2-4 weiter detailliert.

⁷² Vgl. Hernández (2003), S. 17.

die Mitarbeiter vermehrt in den Planungsprozess einzubeziehen.⁷³ Vor allem die Zunahme der Planungshäufigkeit aufgrund verkürzter Planungshorizonte und die entsprechende Forderung nach einer kurzen Planungsdauer erfordern den Einsatz von Instrumenten zur Optimierung der Zusammenarbeit.⁷⁴

Im Rahmen der Zielfestlegung für ein Fabrikplanungsprojekt werden aus den projektspezifischen Vorgaben des Auftraggebers in Form der grob umrissenen Aufgabenstellung, den aus der Unternehmensstrategie abgeleiteten Unternehmenszielen sowie den vorliegenden Rahmenbedingungen Fabrik- und Projektziele definiert.⁷⁵ Hierzu gehört auch die Bestimmung von wesentlichen Merkmalen der Fabrik bzw. der Fabriktypen.⁷⁶ Eine Forderung an die Fabrikplanung ist die Planung und Entwicklung adaptiver Produktionsstrukturen und -strategien, um dem dynamischen Unternehmensumfeld (vgl. Abschnitt 1.1) gerecht zu werden.⁷⁷ In diesem Zusammenhang wurde das Kriterium Wandlungsfähigkeit in den letzten Jahren durch eine Vielzahl von Autoren wissenschaftlich untersucht.⁷⁸ Hernández definiert den Begriff wie folgt:

„Wandlungsfähigkeit kennzeichnet das Potenzial einer Fabrik, durch systemimmanente Wandlungsbefähiger, reaktiv oder proaktiv eine zielgerichtete Neu- oder Rekonfiguration der Wandlungsobjekte auf allen Systemebenen bei geringem Aufwand durchführen zu können, um die interne und externe Effizienz der Fabrik zu erhöhen oder zu erhalten.“⁷⁹

In der Literatur existieren eine Reihe von Ansätzen zu einer systematischen Berücksichtigung und wirtschaftlichen Bewertung der Wandlungsfähigkeit.⁸⁰ Zur Realisierung wandlungsfähiger Fabriken werden bspw. modular aufgebaute Produktionssysteme bzw. Fabriken vorgeschlagen.⁸¹ Das Ziel besteht darin, schnelle und kostengünstige Strukturanpassungen bei sich ändernden Anforderungen an das Produktionssystem zu ermöglichen.⁸² Ein weiterer Wandlungsbefähiger für Fabriken ist neben der Modularität die Mobilität von Produktionsanlagen.⁸³

⁷³ Vgl. Nyhuis et al. (2004) und Wiendahl (2000), S. 5.

⁷⁴ Vgl. Wiendahl et al. (2001), S. 190-191. Die Verkürzung der Planungshorizonte resultiert aus der Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung in einem turbulenten Unternehmensumfeld, insbesondere aus schwankender Nachfrage, kurzen Produktlebenszyklen und Verlagerungs- bzw. Outsourcingaktivitäten.

⁷⁵ Vgl. Aggteleky (1987), S. 158-161.

⁷⁶ Vgl. Schenk; Schulte (2003), S. 9-36 und Spath et. al. (2002), S. 30-31. Eine idealisierte Typisierung von Fabriken ist z.B. die Unterscheidung zwischen High-Tech Fabrik, Low-Cost Fabrik, variantenflexible Fabrik, atmende Fabrik und schnelle Fabrik, wobei eine reale Fabrik i.d.R. Eigenschaften mehrerer Typen besitzt.

⁷⁷ Vgl. Zäh et al. (2003b).

⁷⁸ Vgl. Zäh et al. (2004) und Hernández (2003).

⁷⁹ Vgl. Hernández (2003), S. 52.

⁸⁰ Vgl. Witte et al. (2005) und Förster (1999).

⁸¹ Vgl. z.B. Wirth et al. (2003) mit einem Ansatz, der auf unterschiedliche Plattformtypen für Bautechnik und Produktionstechnik beruht oder Drabow; Woelk (2004), S. 92-93 und Neuhausen (2001) zu Ansätzen modularer Fabrikstrukturen bzw. Produktionssysteme.

⁸² Vgl. Schuh et al. (2004a), S. 102.

⁸³ Vgl. Zäh et al. (2003a), S. 327-329.

Zur Erzielung einer hohen Gesamtwandlungsfähigkeit ist neben der technischen Wandlungsfähigkeit auch eine hohe organisatorische Wandlungsfähigkeit und Entwicklungsfähigkeit anzustreben.⁸⁴

Die Fabrikplanung hat die Ergebnisse der Produktionsnetzwerkplanung zu berücksichtigen, bei welcher der Betrachtungsraum auf mehrere Fabriken bis hin zu weltweiten Produktionsnetzen ausgedehnt wird. Die Netzwerkplanung dient der Bestimmung der optimalen Anzahl, Lage und Funktion von Produktionsstandorten.⁸⁵ Bei Vorliegen eines Produktionsnetzes ist die Koordination der Fabrikplanungsprojekte auch über die vertikale Struktur vom Arbeitsplatz bis zum Produktionsnetzwerk anzustreben. Geplante Veränderungen in einem Fertigungsbereich sollten z.B. mit Überlegungen zu Veränderungen im Netzwerk, die zum gleichen Zeitpunkt etwa die Verlagerung der betreffenden Fertigungsprozesse vorsehen, abgestimmt werden.⁸⁶ Andernfalls ergeben sich ineffektive Strukturanpassungen im Produktionsnetzwerk. Die Zielgröße Wandlungsfähigkeit wird im Rahmen der Netzwerkplanung nicht auf einzelne Fabriken, sondern auf das gesamte Produktionsnetzwerk bezogen.⁸⁷

2.1.3 Änderungsmanagement

Das Änderungsmanagement ist in erster Linie aus der Produktentwicklung bekannt. Dabei kommt es als Folge von Produktänderungen auch zur Einbeziehung der Produktionsprozesse in das Änderungsmanagement.⁸⁸ Mit dem Ansatz des Simultaneous Engineering wird z.B. das Ziel verfolgt, die Produktentwicklung mit der Prozessentwicklung zu parallelisieren. Änderungsbedarfe in der Produktion können somit frühzeitig erkannt und geplant sowie bei Entscheidungen über Lösungsvarianten für Produkte berücksichtigt werden.⁸⁹

In diesem Abschnitt wird hingegen das auf die Produktion bezogene Änderungsmanagement beschrieben, bei dem neben Produktänderungen auch weitere für Fabriken typische unternehmensinterne und -externe Änderungstreiber berücksichtigt werden.⁹⁰ Das Änderungsmanagement wird als eine kontinuierliche Aufgabe definiert (vgl. Bild 2-4), bei der es zum wiederholten Durchlauf des in Bild 2-6 dargestellten Änderungsprozesses kommt.

⁸⁴ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 10-11.

⁸⁵ Vgl. Abele et al. (2006), S. 220. Auf die Netzwerkgestaltung wirken z.B. Rahmenbedingungen wie Faktorkosten, Marktnähe, Logistikkosten oder Lebenszyklusphasen von Produkten.

⁸⁶ Vgl. Westkämper (2005).

⁸⁷ Vgl. Müssig (2005). Eine Fortführung des Netzwerkansatzes ist die Planung von hierarchielosen Kompetenznetzen, welche insbesondere für kurzfristige und unregelmäßige Kundenaufträge geeignet sind. Vgl. hierzu Mehnert (2004), S. 17.

⁸⁸ Vgl. Aurich et al. (2004), S. 381.

⁸⁹ Vgl. Eversheim (1996a), S. 7.124-7.126.

⁹⁰ Änderungstreiber sind z.B. die kontinuierliche Verbesserung, arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen, Kapazitätsanpassungen und Maschinensubstitutionen.

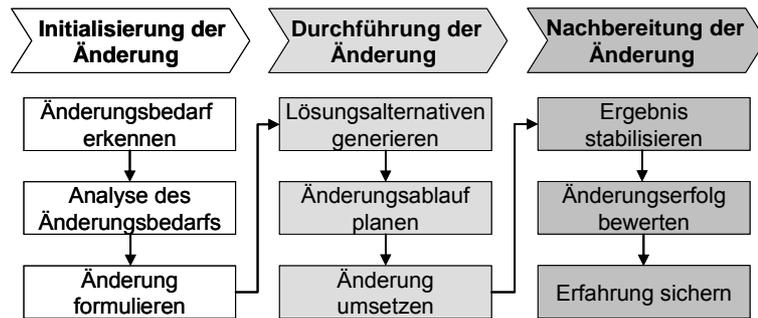


Bild 2-6: Änderungsprozess in der Produktion⁹¹

Die Abgrenzung des Änderungsmanagements zur Fabrikplanung wird mit Bild 2-7 verdeutlicht, indem der in einzelnen Fabrikplanungsprojekten durchgeführten Fabrikplanung (vgl. Abschnitt 2.1.2) die permanent durchgeführten Änderungsprozesse (vgl. Bild 2-4) gegenübergestellt werden.

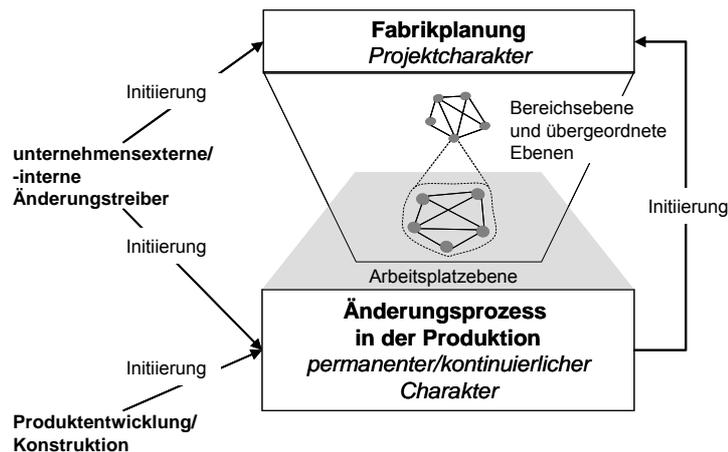


Bild 2-7: Differenzierung von Fabrikplanung und Änderungsmanagement

Die Differenzierung zwischen Fabrikplanung und Änderungsmanagement erfolgt über das Kriterium Veränderungsausmaß.⁹² Der Fabrikplanung werden Planungs- und Realisierungstätigkeiten, mit denen strategische Zielstellungen verfolgt werden, zugerechnet.⁹³ Diese verursachen i.d.R. einen hohen Aufwand und beziehen mindestens die Bereichsebene der Fabrik (vgl. Bild 2-3) in die Änderung ein. Das Änderungsmanagement hat hingegen Änderungen an

⁹¹ Aurich et al. (2004), S. 382.

⁹² Vgl. die Verwendung des Kriteriums im Zusammenhang mit der Beschreibung von Wandlungsfähigkeit bei Wiendahl (2002), S. 124. Das Kriterium hat die Unterkriterien Ebene und Spannweite der Änderung, Häufigkeit und Dauer sowie Aufwand und Kosten.

⁹³ Strategische Zielstellungen sind z.B. die Einführung neuer Produkte oder Technologien und aufwendige Strukturveränderungen der Fabrik einschließlich Neubaumaßnahmen. Vgl. Wiendahl (2002), S. 125-126 zur Differenzierung in operatives, taktisches und strategisches Veränderungspotenzial.

einzelnen Elementen und Strukturen des Fabriksystems auf Arbeitsplatzebene zum Gegenstand, denen vorwiegend operative und taktische Zielstellungen zugrunde liegen.⁹⁴ Die Erkennung eines umfangreichen Änderungsbedarfes im Rahmen des Monitoring, das einen Teil des Änderungsmanagements darstellt, kann zum Initiieren von Fabrikplanungsprojekten führen. Das Änderungsmanagement grenzt sich zur Arbeitsplanung und technologischen Prozessplanung dahingehend ab, als dass bei diesen keine Veränderungen an Elementen und Strukturen des Fabriksystems vorgenommen werden.⁹⁵

Unter das Änderungsmanagement werden im Rahmen dieser Arbeit weitere Ansätze subsumiert, die weder der Fabrikplanung noch dem Fabrikbetrieb zuzuordnen sind. Hierzu gehören:

- die kontinuierliche Adaption von Produktionsstrukturen und regelkreisbasierte Methoden für die Steuerung von Änderungsprozessen⁹⁶,
- die permanente bzw. kontinuierliche Fabrikplanung⁹⁷,
- kontinuierliche Verbesserungsprozesse und
- das Anlaufmanagement, soweit es nicht Bestandteil von Fabrikplanungsprojekten ist.

Der Änderungsprozess in Fabrikssystemen wird zunehmend analog zur Produktentwicklung mit virtuellen Fabrikmodellen unterstützt. Eine Möglichkeit ist z.B., die für Änderungen relevanten Objektinformationen und Änderungsschritte im virtuellen Modell zu dokumentieren.⁹⁸

2.1.4 Fabrikbetrieb

Der Fabrikbetrieb (vgl. Bild 2-4) ist das Betreiben des durch die Fabrikplanung und das Änderungsmanagement fixierten Fabriksystems. Das Ziel des Fabrikbetriebes ist die effiziente Nutzung der vorgegebenen Ressourcen für die durch die Produktionsplanung definierte Produktion von Sachgütern.⁹⁹ Aufgaben des Fabrikbetriebs sind unter anderen:

- die Ausführung von Fertigungs-, Montage- und Logistikprozessen,
- die Fertigungsplanung und -steuerung für den Auftragsdurchlauf,
- die Qualitätskontrolle,

⁹⁴ Operative und taktische Zielstellungen sind z.B. das Umrüsten einer Maschine oder eines Montagearbeitsplatzes und Veränderungen des Fertigungslayouts innerhalb eines Bereiches. Sowohl bei der Fabrikplanung als auch dem Änderungsmanagement wird die von Näser; Ackermann (2003) auf S. 436 definierte Erweiterungsflexibilität der Fabrik nutzbar gemacht.

⁹⁵ Die Arbeits- und technologische Prozessplanung nutzen primär die von Näser; Ackermann (2003), S. 436 definierte Basisflexibilität, die ohne Änderung der Elemente nach Art, Anzahl und Anordnung sowie Strukturen in einer Produktionsstätte besteht.

⁹⁶ Vgl. Schuh et al. (2004b); Meier; Hanenkamp (2003a) und Zäh et al. (2005a).

⁹⁷ Bei Sallaba; Gröpke (2000) wird die Fabrikplanung z.B. als eine permanente Managementfunktion bezeichnet.

⁹⁸ Vgl. Aurich et. al. (2005).

⁹⁹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 4-5.

- die Instandhaltung und
- die Verwaltung und Bereitstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Prüfmitteln.

2.1.5 Quantitative und qualitative Fabrikmerkmale

Mit der Fabrikplanung werden durch die Planung und Gestaltung des Grundstücks, der Gebäude, Anlagen, Maschinen und Einrichtungen sowie durch die Dimensionierung der technischen und personellen Kapazitäten die Fixkosten zur Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Produktionsstätten für einen längeren Zeitraum festgeschrieben.¹⁰⁰ Gleichzeitig determiniert die Wahl der technologischen und organisatorischen Prozesse auch die künftigen Kosten der Leistungserstellung. Die nachhaltige Wirtschaftlichkeit einer Fabrik ist das oberste Ziel sämtlicher Planungsvorgänge. Die Grundlage für die Bewertung von Fabrikplanungsergebnissen bildet ein Zielsystem, welches aus den übergeordneten Unternehmenszielen abgeleitet wird. Das Zielsystem ist ein Ergebnis der Zielfestlegungsphase (vgl. Bild 2-5).¹⁰¹

Neben Zielvorgaben für quantitativ bzw. monetär beschreibbare Merkmale wie Kapazität, Investitionssumme, Betriebskosten, Flächenbedarf oder Mitarbeiterzahl haben quantitativ nicht oder nur schwer erfassbare Merkmale einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Fabrik (vgl. Bild 2-8).

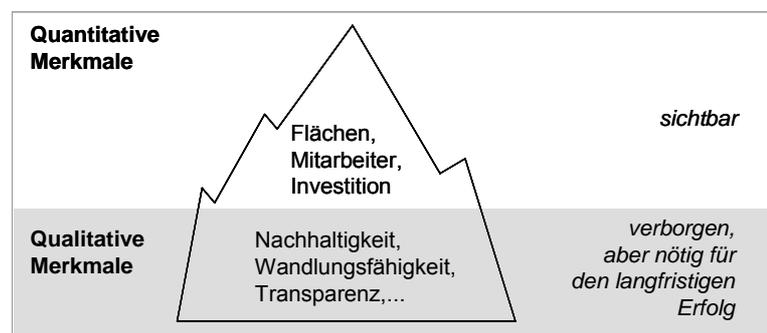


Bild 2-8: Quantitative und qualitative Merkmale der Fabrikplanung¹⁰²

Im Gegensatz zu Zielvorgaben für qualitative Merkmale lassen sich Vorgaben für quantitative Merkmale einer Fabrik relativ einfach treffen und der Erfüllungsgrad einfach bestimmen. Qualitative Merkmale sind nicht nur nicht direkt messbar, ihre Wirkung entfaltet sich oftmals erst langfristig und ist nicht unmittelbar sichtbar. Zur Erzielung einer hohen Wirtschaftlichkeit ist die Berücksichtigung qualitativer Merkmale jedoch genauso bedeutsam wie die quantitativer Merkmale.¹⁰³ Der VDI unterscheidet im Rahmen der „Erweiterten Wirtschaftlichkeits-

¹⁰⁰ Vgl. Aggteleky (1990), S. 677.

¹⁰¹ Vgl. Schmigalla (1995), S. 94; Kettner et al. (1984), S. 15 und Aggteleky (1990), S. 10-11.

¹⁰² Kolakowski et al. (2007), S. 226.

¹⁰³ Vgl. Kolakowski et al. (2007), S. 226. Die Priorisierung von Unterzielen in Fabrikplanungsprojekten hängt von den spezifischen Rahmenbedingungen der Planung (z.B. Lohnkosten am Standort, Unternehmenskultur) ab.

rechnung“ zwischen zehn qualitativen Merkmalen, denen jeweils weitere spezifische Merkmale zugeordnet werden. Insbesondere das Merkmal „Wandlungsfähigkeit“ wurde in den letzten Jahren wissenschaftlich diskutiert. Es gibt jedoch weitere wichtige Merkmale, wie die Mitarbeiterorientierung, Nachhaltigkeit oder Attraktivität einer Fabrik.

Die jeweilige Merkmalsausprägung wird durch die Gestaltung von Elementen der Fabrik, wie der Gebäudehülle oder dem Fertigungslayout bestimmt. Dabei wirken diese Elemente in einem Wirkungsraum, der z.B. durch die Instanz einer Fabrikebene (vgl. Bild 2-3) beschrieben sein kann.¹⁰⁴ Ein bestimmtes Element kann die Ausprägung mehrerer qualitativer Kriterien in einem Wirkungsraum beeinflussen, weshalb zwischen qualitativen Kriterien Interdependenzen bestehen.¹⁰⁵

2.1.6 Die Digitale Fabrik

Der Begriff der Digitalen Fabrik wurde bereits im Abschnitt 1 gemäß der VDI-Richtlinie 4499 definiert. Die Digitale Fabrik ist kein homogenes Werkzeug, mit dem alle Tätigkeiten von der Fabrikplanung bis zum Fabrikbetrieb gleichzeitig unterstützt werden können. Sie steht vielmehr für mehrere IT-Werkzeuge, die heterogene Systemlandschaften bilden und deren Kopplung über Schnittstellen erfolgt.¹⁰⁶ Ein Beispiel ist die Kopplung von Werkzeugen für die Prozessplanung, Simulation und Layoutplanung.¹⁰⁷

In Bild 2-9 sind ausgewählte Anwendungen für digitale Werkzeuge zur Unterstützung von Fabrikplanung und -betrieb dargestellt. Die Systematisierung dieser Anwendungen erfolgt durch eine ungefähre Zuweisung zu ihrem Einsatzschwerpunkt - Planung oder Betrieb - und dem Abstraktionsgrad bzw. der Realitätsnähe der zugrunde liegenden Modelle - abstraktes Modell oder virtuelles Modell.¹⁰⁸

Die Werkzeuge der Digitalen Fabrik sind im Idealfall mit Systemen zur Produktentwicklung verbunden, wodurch ein bidirektionaler Austausch der Informationen zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung stattfinden kann und die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung unterstützt wird (Vgl. Bild 2-10).¹⁰⁹ Auswirkungen von Produkteigenschaftsänderungen auf den zukünftigen Herstellungsprozess können somit frühzeitig abgeschätzt werden.¹¹⁰ Die Freigabe zur physischen Produktherstellung bzw. Veränderung des Fabriksystems erfolgt erst nach einer digitalen Absicherung, z.B. durch Simulation.¹¹¹ Die Simulation zukünftiger realer

¹⁰⁴ Die Fabrikebenen wurden in Abschnitt 2.1.1 dargestellt. Eine Ebeneninstanz ist ein spezifischer Bereich einer Fabrik, der einer Fabrikebene zugewiesen ist.

¹⁰⁵ Vgl. Kolakowski et al. (2007), S. 228-229.

¹⁰⁶ Vgl. Zäh (2005c), S. 289 und Meier; Homuth (2005), S. 20.

¹⁰⁷ Vgl. Kapp et al. (2005), S. 193.

¹⁰⁸ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 409.

¹⁰⁹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 397; Schneider (2004), S. 44; Schraft; Bierschenk (2005), S. 15-16.

¹¹⁰ Vgl. Menges (2005), S. 26.

¹¹¹ Vgl. Schreiber (2005) und Schraft; Bierschenk (2005), S. 15.

2 Grundlagen und Inhalt

Prozesse kennzeichnet die Virtuelle Produktion, mit der in Zukunft eine durchgängige experimentelle Planung und Steuerung von Produktionsprozessen und Anlagen über digitale Modelle möglich werden soll.¹¹²

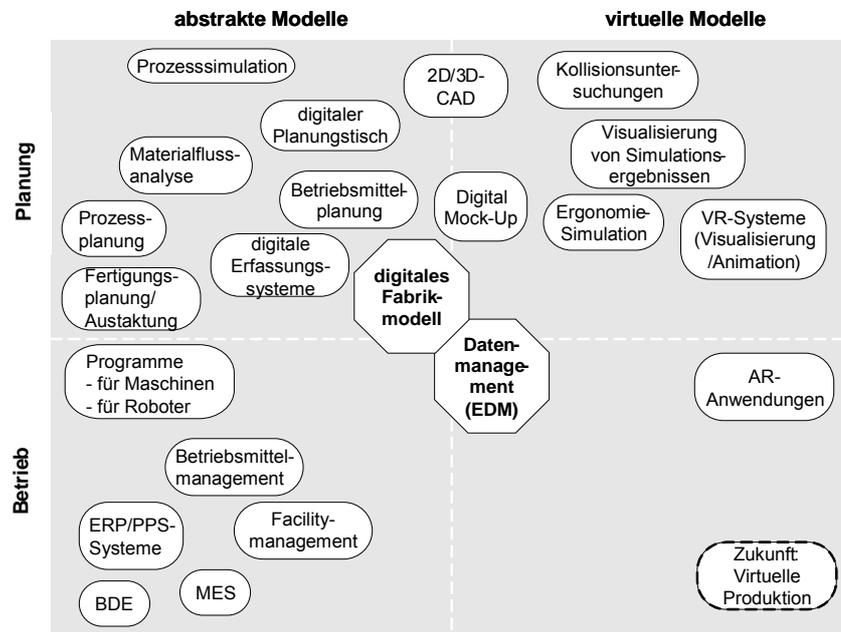


Bild 2-9: Anwendungen der Digitalen Fabrik

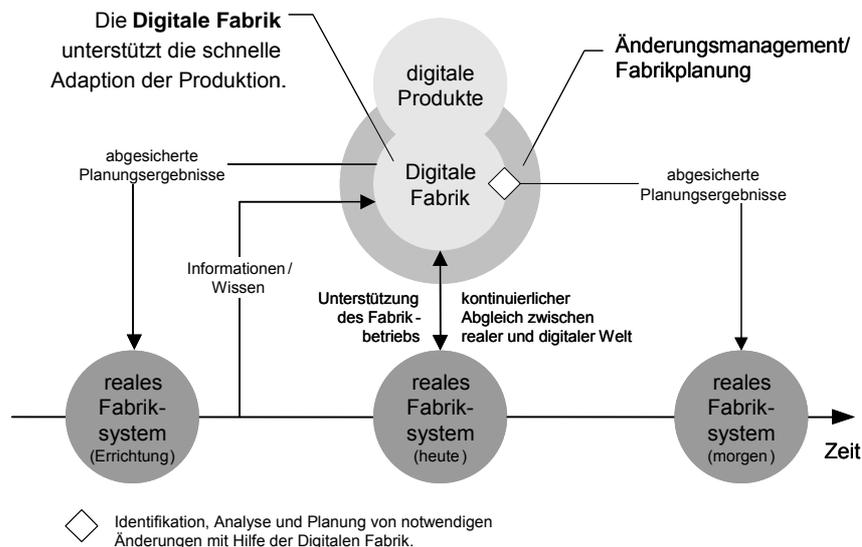


Bild 2-10: Durchgängiger Einsatz der Digitalen Fabrik¹¹³

Die Definition der Digitalen Fabrik verweist ausdrücklich auf die Weiterverwendung der bei

¹¹² Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 397-398 und Bracht; Masurat (2003), S. 253.

¹¹³ In Anlehnung an Westkämper (2005) und Schenk; Wirth (2004), S. 415.

der Planung generierten Fabrikmodelle im Fabriklebenszyklus.¹¹⁴ Ein Beispiel ist die Anwendung für den Fabrikbetrieb und insbesondere die Fertigungssteuerung, bei der reale Produktionsdaten durch die Betriebsdatenerfassung (BDE) aufgenommen und in das Modell integriert werden.¹¹⁵ Eine Voraussetzung hierfür ist, dass das Modell bei stattfindenden Änderungen der realen Fabrik an die Realität angepasst wird.¹¹⁶ Die Erfassung dieser Änderungen kann bspw. ebenfalls durch die BDE erfolgen.¹¹⁷ In Bild 2-10 verdeutlicht der Pfeil mit der Beschriftung Information/Wissen, dass die Wissensbasis über den Lebenszyklus einer Fabrik ständig angepasst und erweitert werden muss.

Mit der Einführung der Digitalen Fabrik in Unternehmen werden Potenziale quantitativer und qualitativer Natur erschlossen. Quantitativ bewertbare Kosten- und Zeitvorteile entstehen z.B. durch eine Reduzierung der Prozesszeiten in der Produkt- und Produktionsplanung aufgrund einer verstärkten Parallelisierung der Prozesse oder der Wiederverwendung standardisierter und digital abgebildeter Planungsobjekte.¹¹⁸ Auf die Planungsqualität wirken sich die Harmonisierung der Planungsprozesse aufgrund der damit einhergehenden Verfügbarkeit vollständiger und aktueller Planungsgrundlagen vorteilhaft aus.¹¹⁹

Durch die Visualisierung von Fabriken oder Teilsystemen ergeben sich Vorteile aus einer hohen Anschaulichkeit und Transparenz der Planungsergebnisse, die sich positiv auf die Kommunikation der am Planungsprozess beteiligten Fachplaner auswirken. Digital Mock-Up (DMU) der Fabrik unterstützen durch die Integration der Teillösungen von Lieferanten in einem Modell die kollaborative Fabrikplanung und bieten die Möglichkeit der Kollisionsuntersuchung im dreidimensionalen Raum.¹²⁰ Weiterhin können reale Objekte durch das 3D-Laserscanning und die Augmented Reality (AR)¹²¹ in das digitale Fabrikmodell integriert werden, wodurch sich eine Reduzierung des Modellierungsaufwandes ergibt bzw. weitere Anwendungsgebiete, insbesondere für den Fabrikbetrieb, erschlossen werden.¹²²

Ein wesentliches Merkmal der Digitalen Fabrik ist die gemeinsame Datenbasis, über die als zentrales Element die gesamten Planungsprozesse sowie die darin eingesetzten Werkzeuge integriert werden. Ihre Realisierung stellt zugleich die größte Herausforderung auf dem Weg zu einem wirtschaftlichen Einsatz der Digitalen Fabrik dar.¹²³ Die Vernetzung der einzelnen

¹¹⁴ Vgl. VDI 4499 (2006), S. 6 und Sauer (2004), S. 31.

¹¹⁵ Vgl. Aldinger et al. (2007), S. 359.

¹¹⁶ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 398; Schreiber (2005).

¹¹⁷ Vgl. Westkämper (2005) und Schreiber (2005).

¹¹⁸ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 401-402.

¹¹⁹ Vgl. Zäh et al. (2005c), S. 287.

¹²⁰ Vgl. Schneider (2004), S. 44-46; Sauer (2004), S. 32 und Schwab (2005).

¹²¹ Unter Augmented Reality oder Erweiterter Realität versteht man die visuelle Überlagerung von virtuellen Informationen mit der Realität in Echtzeit. Dabei soll die Information möglichst am richtigen geometrischen Ort dargestellt werden. Die Planung der Platzierung von Anlagen könnte bspw. direkt vor Ort in der Werkhalle durch die Einblendung der virtuellen Maschinen in das Bild der realen Werkhalle durchgeführt werden.

¹²² Vgl. Westkämper (2005) und Schreiber (2005).

¹²³ Vgl. Zäh et al. (2005c), S. 287.

Funktionsbausteine, die oftmals in unterschiedlichen Werkzeugen realisiert sind, setzt idealerweise eine einheitliche Informationsplattform und ein einheitliches Datenmodell voraus.¹²⁴ In der Praxis existieren jedoch lediglich Standards für den Austausch eines Teils der relevanten Daten.¹²⁵ Mit STEP liegt z.B. ein Standard für den Austausch von im Produktlebenszyklus entstehenden Produktdaten vor.¹²⁶ Für die Digitale Fabrik werden anstatt eines einheitlichen Datenmodells insbesondere Ansätze zur Modellvernetzung und Interoperabilität der einzelnen Werkzeuge sowie die Integration der Einzelergebnisse unterschiedlicher Planungswerkzeuge durch Übergabe der Ergebnisdaten vorangetrieben.¹²⁷

In Unternehmen werden Werkzeuge der Digitalen Fabrik parallel zu anderen Systemen, die den Fabrikbetrieb bzw. weitere Unternehmensfunktionen unterstützen, eingesetzt. Weit verbreitet sind Enterprise Resource Planning-Systeme (ERP/PPS-Systeme) und Systeme zur Betriebsdatenerfassung bzw. Fertigungsleitstände. Zunehmend kommen auch Manufacturing Execution-Systeme (MES-Systeme) oder Facility Management-Systeme zum Einsatz.¹²⁸ Regelmäßig werden weiterhin CAx-Anwendungen für die Produktentwicklung sowie Office-Anwendungen eingesetzt. Werkzeuge der Digitalen Fabrik besitzen ggf. Schnittstellen zu den genannten Systemen. Die im Lebenszyklus eines Produktes mit verschiedenen Systemen erzeugten Daten werden mit Engineering Data Management-Systemen (EDM-Systeme) bzw. Product Data Management-Systemen (PDM-Systeme) verwaltet. EDM/PDM-Systeme erlauben eine zentralisierte und quasi-integrierte Administration der produktrelevanten Informationen bzw. Unternehmensdaten.¹²⁹

2.2 Modellierung von Fabrikssystemen

Der Abschnitt 2.2.1 enthält Grundlagen zur Modellierung, insoweit sie zur Abbildung von für Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb relevanten Weltausschnitten relevant sind. Als Ergebnis einer Analyse in der Literatur beschriebener Modelle wird in dieser Arbeit eine Unterteilung in objektorientierte Modelle, prozessorientierte Modelle und grafische bzw. virtuelle Modelle favorisiert. Ihre Beschreibung erfolgt in den Abschnitten 2.2.2 bis 2.2.4. Im Abschnitt 2.2.5 wird weiterhin auf Kombinationen dieser Modellarten sowie Simulationsmodelle eingegangen.

¹²⁴ Vgl. Schreiber (2005) und Schwab (2005).

¹²⁵ Vgl. z.B. Haag (1999), S. 47 für den Produktdatenaustausch in der TGA oder Meierlohr (2003), S. 37-38 für IGES und STEP.

¹²⁶ STEP ist die Abkürzung für Standard of the Exchange of Product Model Data. Vgl. VDI 4499 (2006), S. 26 sowie Wehner (2003), S. 41-43 für Aufbau und Inhalt des Produktdatenmodells.

¹²⁷ Vgl. Wenzel (2004), S. 56; Meier; Homuth (2005), S. 21-23 und Bracht et al. (2005), S. 197-198.

¹²⁸ Vgl. z.B. Nävy (2000), S. 67 und Kletti (2006), S. 48-49.

¹²⁹ Vgl. Wehner (2003), S. 32-33 und Schneider (2004), S. 45.

2.2.1 Grundlagen der Modellierung

Der Begriff des Modells ist ein für die Fabrikplanung elementarer Terminus, dessen Begriffsinhalt und Erscheinungsform sich mit dem Einsatz digitaler Fabrikplanungswerkzeuge kontinuierlich erweitert hat.¹³⁰ Dieser Arbeit liegt der folgende Modellbegriff zugrunde:

„Ein Modell ist ein bewusst konstruiertes Abbild der Wirklichkeit, das auf der Grundlage einer Struktur, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt bzw. genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist.“¹³¹

Modelle stellen das Original vereinfacht dar, um mit Hilfe eines problembezogenen Realitätsausschnitts ein Realproblem der Lösung zuzuführen.¹³² Um die Ergebnisse, die auf Basis des Modells erzielt werden, auf das Original übertragen zu können, müssen die wesentlichen Eigenschaften ausreichend genau abgebildet werden.¹³³ Hierzu sollte die Struktur des realen Systems ausreichend gut mit seinem Modell korrespondieren.¹³⁴ Der Modellbegriff wird auch oftmals mit Hilfe des Abbildungsmerkmals, des Verkürzungsmerkmals und dem pragmatischen Merkmal erklärt.¹³⁵ Die Bandbreite von Modellen reicht von hoch formalisierten bis zu anschaulichen Abbildern.¹³⁶ Im Bild 2-11 werden Anwendungen von Modellen mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad aufgeführt.¹³⁷

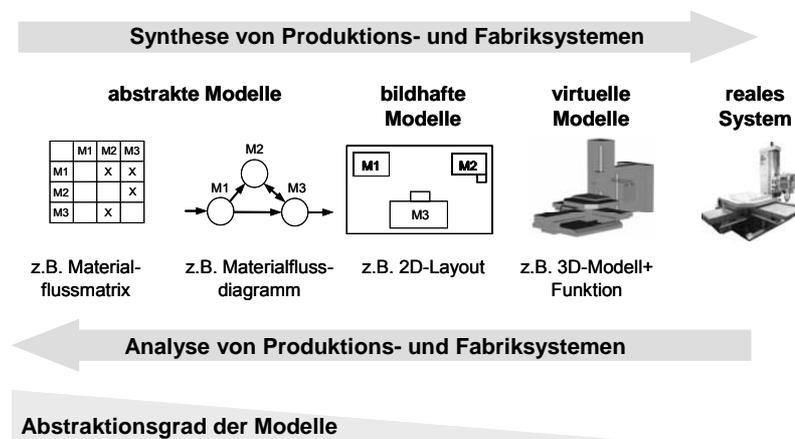


Bild 2-11: Anwendung verschiedener Modelle im Planungsprozess¹³⁸

¹³⁰ Vgl. Schmigalla (1995), S. 243.

¹³¹ Dangelmaier (1999), S. 11.

¹³² Vgl. REFA (1991), S. 78.

¹³³ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 178.

¹³⁴ Vgl. REFA (1991), S. 89.

¹³⁵ Vgl. Stachowiak (1973), S. 131-133.

¹³⁶ Vgl. Schmigalla (1995), S. 243 und 245.

¹³⁷ Bildhafte Modelle unterscheiden sich von virtuellen Modellen insofern, dass letztere die Merkmale Immersion, Interaktion und Simulation aufweisen. Vgl. Schreiber (2004) und Schmigalla (1995), S. 245.

¹³⁸ Schenk; Wirth (2004), S. 180.

Neben dem Abstraktionsgrad gibt es weitere Merkmale anhand derer Modelle spezifiziert werden können. Diese sind z.B.:¹³⁹

- *Zeitbezug*: Im Gegensatz zu statischen Modellen bilden dynamische Modelle auch zeitliche Veränderungen des Systemzustandes ab.¹⁴⁰
- *Raumbezug*: Der Raumbezug charakterisiert die Art und den Umfang der Abbildung räumlicher geometrischer Zusammenhänge.
- *Modellverhalten*: Bei deterministischen Modellen werden die Größen systematisch bestimmt, während sich bei stochastischen Modellen die Größen zufällig und auf Basis von Wahrscheinlichkeitsangaben ergeben.
- *Physikalische Gesetzmäßigkeiten*: Modelle unterscheiden sich in der Art und dem Umfang in dem sie physikalische Gesetzmäßigkeiten, z.B. bzgl. kinetischer Zusammenhänge, abbilden.
- *Modellierungskonzept*: Modelle können aufbauorganisatorische oder ablauforganisatorische Strukturen und Sichtweisen abbilden.
- *Aussagekraft und Qualität der Ergebnisse*: Die Ergebnisse können qualitativer oder quantitativer Art sein. Die Ergebnisqualität hängt maßgeblich von der Güte der eingesetzten Modellierungsmethoden und den verfügbaren Daten ab.

In Bild 2-12 wurde eine Klassifizierung von Modellen gemäß ihres Verwendungszwecks dargestellt.¹⁴¹ Bei den sprachlichen Modellen wird zwischen impliziten, d.h. vom Menschen während seiner Problemwahrnehmung erschaffenen gedanklichen Konstrukten und expliziten, die Sphäre reiner Gedanken verlassener Modelle unterschieden. Explizite Modelle können Beschreibungs- oder Analysemodelle sein. Beschreibungsmodelle oder deskriptive bzw. präskriptive Modelle dienen der Abbildung empirischer Erscheinungen bzw. als Vorlage für ein zu realisierendes Objekt.¹⁴² Analysemodelle dienen hingegen Erkenntniszielen und lassen sich in Erklärungs-, Entscheidungs- und Prognosemodelle unterteilen. In Erklärungsmodellen werden Hypothesen über Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgestellt, Entscheidungsmodelle unterstützen insbesondere die Auswahl zwischen Handlungsalternativen und Prognosemodelle dienen der Ermittlung zukünftiger Entwicklungen unter den im Modell angegebenen Annahmen.¹⁴³

¹³⁹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 180; Schmigalla (1995), S. 244-245 und VDI 4499 (2006), S. 11-12.

¹⁴⁰ Vgl. Dyckhoff; Spengler (2005), S.179-180 für eine Differenzierung in statische, zeitablaufbezogene und dynamische Modelle.

¹⁴¹ Vgl. Zelewski (1999), S. 46-49.

¹⁴² Vgl. Ludewig (2002), S. 12.

¹⁴³ Vgl. Schmidt (2002), S. 37.

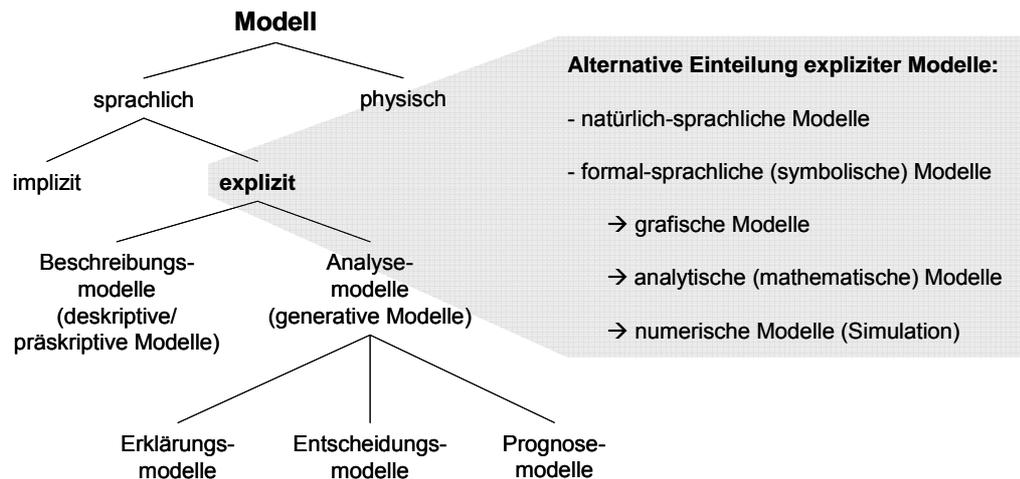


Bild 2-12: Klassifizierung von Modellen¹⁴⁴

Explizite Modelle werden gemäß ihrer Modellierungsart in natürlich-sprachliche und formal-sprachliche Modelle eingeteilt. Letztere lassen sich in grafische, analytische und numerische Modelle differenzieren.¹⁴⁵ Physische körperliche Modelle werden verwendet, wenn ein sprachliches Modell nicht bekannt ist oder seine Aussagekraft nicht ausreicht. Beispiele für physische Modelle sind Windkanäle für strömungstechnische Untersuchungen oder Bauteile für Schwingungsanalysen.¹⁴⁶

Für die Fabrikplanung sind Modelle nicht nur Abbild eines Objektes, z.B. einer Maschine oder eines Gebäudes, sondern auch Arbeitsmittel und -gegenstand im Planungsprozess.¹⁴⁷ Bei der Fabrikplanung kommen vor allem Beschreibungs-, Entscheidungs- und Erklärungsmodelle zum Einsatz. Beschreibungsmodelle sind i.d.R. stark vereinfacht und formalisiert, wie Tabellen, Präsentationen oder Layoutdarstellungen, die der Dokumentation dienen und im Prozess der Realisierung in ein Realobjekt umgesetzt werden. Entscheidungsmodelle unterstützen den Entscheidungsakt bei der Bewertung von Varianten im Rahmen des Entwurfs.¹⁴⁸ Prognosemodelle bieten die Möglichkeit der Variation von Modellparametern. Sie helfen dem Modellnutzer, zu Aussagen über Zustand und Verhalten realer Objekte des Fabriksystems zu gelangen.¹⁴⁹

Der Prozess der Überführung eines Realitätsausschnittes in ein Modell wird als Modellierung bezeichnet. Dabei wird ein originales System in eine homomorphe Abbildung mit Hilfe einer Modellierungsmethode abstrahiert.¹⁵⁰

¹⁴⁴ In Anlehnung an Zelewski (1999), S. 48.

¹⁴⁵ Vgl. Reinhart (2000), S. 19-21.

¹⁴⁶ Vgl. Ostermann (2001), S. 7.

¹⁴⁷ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 177.

¹⁴⁸ Vgl. Schmigalla (1995), S. 243 und 245.

¹⁴⁹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 177.

¹⁵⁰ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 177.

Eine Modellierungsmethode kann wie folgt definiert sein:

„Eine Modellierungsmethode umfasst Konstrukte, Regeln zur richtigen Benutzung der Konstrukte und die Beschreibung der Vorgehensweise zur Modellierung von Systemen eines gewissen Anwendungsbereiches.“¹⁵¹

Die Beschreibung eines Modells lässt sich auf der syntaktischen, semantischen und pragmatischen Ebene durchführen. Die syntaktische Ebene entspricht der Notation, in der ein Modell formuliert ist. Hierzu zählen z.B. Programmiersprachen oder ein grafischer Beschreibungsvorrat. Die semantische Ebene betrifft die Bedeutung der verwendeten Zeichen und Symbole. Auf der pragmatischen Ebene wird letztendlich der Bezug zwischen Zeichen und Symbolen und der realen Welt unter Berücksichtigung des Wissens des Modellnutzers hergestellt.¹⁵² Die Anwendung einer Modellierungsmethode muss mit der Einhaltung der Grundsätze der ordnungsgemäßen Modellierung einhergehen.¹⁵³ Hierzu zählen die Richtigkeit, Relevanz, Wirtschaftlichkeit, Klarheit, Vergleichbarkeit und der systematische Aufbau von Modellen.¹⁵⁴

Die Erstellung, Nutzung und Wartung von Informationsmodellen wurde bis in den späten achtziger Jahren insbesondere von Softwareentwicklern und Systemanalytikern mit entsprechender Methodenkompetenz vorgenommen. Mit dem Postulat der Prozessorientierung als Paradigma des Business Reengineering und der zunehmenden Bedeutung der Informationstechnologie bei der Optimierung von Geschäftsprozessen hat sich die Nutzung von Informationsmodellen auch auf andere Fachbereiche ausgedehnt.¹⁵⁵ Beispiele für Methoden zur allgemeinen Informationsmodellierung im Unternehmen sind bspw. die Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) als Instrument des ARIS-Konzeptes oder die Unified Modeling Language (UML).¹⁵⁶ Bei der Datenmodellierung für Informationssysteme wird z.B. die Entity-Relationship-Modellierung (ER-Modellierung) eingesetzt.¹⁵⁷

Eine Analyse von wissenschaftlichen Arbeiten zur Modellbildung für Fabrikplanung und -betrieb ergibt, dass sich viele Modelle in eine der drei Modellklassen objektorientierte Modelle, Prozessmodelle und grafische Modelle einordnen lassen. Dabei ist anzumerken, dass eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich ist.¹⁵⁸ In diesem Fall sollte die Zuordnung gemäß der Intension der Modellierung, d.h. der Wichtigkeit objektbezogener, prozessbezogener oder grafischer Informationen erfolgen. In der Literatur existieren auch andere Einteilungen, wel-

¹⁵¹ Dangelmaier (1999), S. 11.

¹⁵² Vgl. Wenzel (2004), S. 55.

¹⁵³ Vgl. Keller (2000), S. 76.

¹⁵⁴ Vgl. Rosemann (1998), S. 6-10.

¹⁵⁵ Vgl. Rosemann (1998), S. 2.

¹⁵⁶ Vgl. Keller (2000), S. 53.

¹⁵⁷ Vgl. Schmidt (2002), S. 38 und Rosemann (1998), S. 2.

¹⁵⁸ Vgl. z.B. bei Fischer (1995) und Dandl (1999), die eine objektorientierte Prozessmodellierung vornehmen.

che jedoch ebenfalls nicht überschneidungsfrei sind.¹⁵⁹ Die drei genannten Modellklassen und die entsprechenden Modellierungsmethoden werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet, um später ausgewählte Vorarbeiten in die wissensorientierte Fabrikmodellierung einfließen zu lassen.

2.2.2 Objektorientierte Modelle

Das objektorientierte Paradigma entstammt ursprünglich dem Software Engineering.¹⁶⁰ Das Hauptmerkmal der objektorientierten Programmierung ist die integrierte Modellierung von Daten und Funktionen eines Programms, die in Objekten gekapselt sind.¹⁶¹ Diese Objekte, ihre Abstraktion zu Klassen und ihre Beschreibung mit Attributen sowie Operationen sind das zentrale Konzept des Modellierungsansatzes.¹⁶² Die objektorientierte Programmierung ist eine Fortführung verschiedener Modelle und Methoden der objektorientierten Modellierung (OOM) und objektorientierten Analyse (OOA).¹⁶³ Der bekannteste Vertreter ist die Unified Modeling Language (UML), die weit verbreitete Notationselemente zur objektorientierten Modellierung, Dokumentation und Visualisierung komplexer Systeme bereithält.¹⁶⁴

Der Ansatz der objektorientierten Modellierung ist prinzipiell auf andere Anwendungsbereiche als der Softwareentwicklung übertragbar. Im Mittelpunkt stehen dort das Verständnis und die Spezifikation von Systemen und Prozessen.¹⁶⁵ Die Objektorientierung stellt mit den Objekttypen eine Möglichkeit zur Organisation des Denkens über die Welt zur Verfügung und führt damit zu einer abstrakten Organisation des Wissens, welche bspw. in Bezug zu Regeln, Aussagen, Funktionen oder relationale Sprachen gesetzt werden kann.¹⁶⁶ Bisherige Arbeiten zur objektorientierten Modellierung und Analyse von Produktions- bzw. Fabrikssystemen unterscheiden sich in der gewählten Modellierungssprache sowie der Breite und Tiefe der abgebildeten Elemente des Systems, die sich aus dem angestrebten Verwendungszweck des Modells ergeben. In Tabelle 2-2 sind einige Arbeiten der letzten Jahre aufgeführt.

¹⁵⁹ Vgl. die Einteilung in gesamtheitliche Modelle, hierarchische Modelle, hybride Modelle, adaptive Modelle, wissensbasierte Modelle und Künstliche Neuronale Netze bei Ostermann (2001), S. 8-12.

¹⁶⁰ Für nähere Informationen zur Objektorientierten Modellierung vgl. bei Jeckle et al. (2004); Burkhardt (1999) oder Martin; Odell (1999).

¹⁶¹ Vgl. Bergholz (2005), S. 93-94.

¹⁶² Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 32.

¹⁶³ Vgl. Hartmann (2000), S. 7-9.

¹⁶⁴ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 10.

¹⁶⁵ Vgl. Schröer; Müller-Rogait (2002), S. 187-188.

¹⁶⁶ Vgl. Martin; Odell (1999), S. 25-27.

Autor(en)	Modellbeschreibung
Meier; Hohmuth (2005)	- Datenstrukturen für die Abbildung von NC-Drehmaschinen mit den Teilmodellen Ressourcen, Numerische Steuerung, Prozess und Ergebnis
Mehnert (2004)	- Abbildung der Struktur eines generischen Kompetenzzellenmodells
Meierlohr (2003)	- erweitertes Datenmodell zur Kopplung von Produktions- und Gebäudeplanung
Schmidt (2002)	- objektorientiertes Referenzmodell für die Entwicklung einer Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen, aufgeteilt in sieben Partialmodelle zur Verbesserung der Modelltransparenz
Westkämper; Winkler (2002)	- Beschreibung von Fabrikssystemen zum Zweck der Erstellung datenbankgestützter Simulationsmodelle
Mönch (1999)	- Modellierung des Materialflusses bei einer Halbleiterfertigung
Niemeier; Redeker (1998)	- Informationsmodell zur Verfügbarkeitssicherung von Produktionsanlagen - Erfassung der für die Überwachung, Diagnose und Prognose von Produktionsanlagen wesentlichen Objekte und Relationen
Amann (1994)	- Übersicht über Klassen eines Produktionssystems und ihrer Attribute

Tabelle 2-2: Objektorientierte Modellierung für Fabrikplanung und -betrieb

In der jüngeren Vergangenheit wurden auch Ansätze entwickelt, in denen die Übertragung des objektorientierten Paradigmas auf den Fabrikplanungsprozess erfolgt. Die Planung einer objektorientiert abgebildeten Fabrik wird hier mit Methoden des objektorientierten Software Engineering durchgeführt. Das Ziel ist es, den zunehmenden Wandlungsvorgängen und Neuvernetzungen der Systemelemente in Fabrikssystemen mit als Modulen abgebildeten Ressourcen, Prozessen und Organisationseinheiten sowie definierten Schnittstellen zwischen diesen Modulen gerecht zu werden.¹⁶⁷

2.2.3 Prozessorientierte Modelle

Der Prozessbegriff entspricht weitgehend dem funktionalen Konzept der Allgemeinen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.1.1). Er kann wie folgt definiert werden:

„Unter einem Prozess wird eine geordnete Abfolge von Aktivitäten¹⁶⁸ verstanden, die einen definierten Input in einen definierten Output überführen.“¹⁶⁹

Ein Prozess führt Transformationen an den ihn durchlaufenden Prozessgegenständen unter Nutzung des zur Verfügung stehenden Leistungspotenzials durch. Prozessgegenstände können

¹⁶⁷ Vgl. Bergholz (2005); Schuh et al. (2007a); Schuh et al. (2007b); Sihm et al. (2000).

¹⁶⁸ Der Prozess mit dem höchsten gewählten Detaillierungsgrad wird oftmals auch als Aktivität bezeichnet. Vgl. Schmelzer, Sesselmann (2004), S. 86.

¹⁶⁹ Kuhn; Hellingrath (2002), S. 117.

z.B. Materialien, Bauteile oder Informationen sein. Das Leistungspotenzial sind die für die Prozessdurchführung vorhandenen Betriebsmittel und Arbeitskräfte.¹⁷⁰ Die angegebene Prozessdefinition ist relativ allgemeingültig. So werden z.B. Inhalt, Ergebnisempfänger oder die Aktivitäten eines Prozesses noch nicht spezifiziert. Bereits bei einer Verknüpfung weniger Aktivitäten zur Erstellung eines Outputs liegt definitorisch ein Prozess vor.

Verbreitete Modelle für die Abbildung von Produktions- und Logistikprozessen sind z.B. Arbeitspläne, Materialfluss- und Wertstromdarstellungen, Flusssysteme und Leistungssysteme:

- *Arbeitspläne*: Arbeitspläne gehören neben Zeichnungen und Stücklisten zu den wichtigsten Montage- und Fertigungsunterlagen. In einem Arbeitsplan ist die Bearbeitungsaufgabe in einzelne Arbeitsvorgänge einschließlich der jeweiligen Ressourcen und Vorgabezeiten aufgegliedert.¹⁷¹
- *Materialflussdarstellungen*: Materialflussdarstellungen sind abstrakte Darstellungen der Flüsse von Gütern auf einer der vier Stufen - Produktionsnetz, Werk, Fabrik/Bereich und Arbeitsplätze.¹⁷²
- *Wertstromdarstellungen*: Wertstromdarstellungen werden im Rahmen des Wertstromdesigns verwendet, bei dem die Produktentstehung von „Tor zu Tor“ in der Fabrik oder in Supply Chains visualisiert wird. Mit dieser Flussperspektive werden vertikale Strukturen von Funktionen und Abteilungen zugunsten einer durchgängigen, das Gesamtoptimum anstrebenden Betrachtungsweise vernachlässigt. Der Materialfluss sowie Bestände, Durchlaufzeiten u.a. an den Arbeitsplätzen werden durch eine einfache Symbolik visualisiert.¹⁷³
- *Flusssysteme nach Wirth*: Flusssysteme dienen der technischen Umsetzung von Funktionsketten in verschiedenen Betrachtungsebenen der Fabrik. Funktionsketten setzen sich aus Einzelfunktionen zusammen, mit denen die Erfüllung von Prozessaufgaben realisiert wird. Als Fluss wird die zeitliche und räumliche Folge von Eigenschafts- und/oder Zustandsänderungen eines bestimmten Prozessgegenstandes bezeichnet. Der Prozessgegenstand kann ein Stoff, Informationen oder Energie sein. Dementsprechend wird in einer Fabrik zwischen Stofffluss-, Informationsfluss- und Energieflusssystemen unterschieden.¹⁷⁴ Zur Herstellung der Funktionsfähigkeit eines Fabriksystems müssen Stoffflusssysteme mit anderen Flusssystemen gekoppelt werden.¹⁷⁵

¹⁷⁰ Vgl. Kuhn; Hellingrath (2002), S. 117 und Dangelmaier (1999), S. 4.

¹⁷¹ Vgl. Eversheim (1996c), S. 7-74.

¹⁷² Vgl. Dangelmaier (1999), S. 49.

¹⁷³ Vgl. Mittelhuber; Kallmeyer (2002), S. 79-80 und Vollmer; Schlörke (2005), S. 222-223.

¹⁷⁴ Folgende Flusssysteme sind bspw. in einer Fabrik vorhanden: Produkt- und Materialflusssysteme, VWP-Flusssysteme (VWP = Vorrichtungen - Werkzeuge - Prüfmittel), Flusssysteme der Ver- und Entsorgungstechnik/Haustechnik und Informationsflusssysteme der Produktionsdurchführung.

¹⁷⁵ Vgl. Wirth (1989), S. 30; Schenk; Wirth (2004), S. 81-93.

- *Leistungssysteme nach Gudehus*: Leistungssysteme sind „Netzwerke von einzelnen Leistungsstellen, die von Material und Daten durchlaufen werden und bestimmte Leistungen erzeugen“. ¹⁷⁶ Leistungssysteme können wie andere Systeme hinsichtlich ihrer Aufbaustruktur oder Ablaufstruktur betrachtet werden. Aus der Aufbaustruktur werden Aufbau, Netzwerk, Funktionen, Kapazitäten und Leistungsvermögen eines Systems deutlich. Mit Kenntnis der Leistungsprozesse eines Systems lassen sich Leistungsstellen dimensionieren. Mehrere Leistungsstellen können zu Leistungs- oder Funktionsbereichen zusammengefasst werden. Abhängig vom Leistungsgegenstand wird zwischen operativen Leistungsstellen, bei Vorgängen an oder mit materiellen Objekten oder administrativen Leistungsstellen, bei Vorgängen an oder mit Aufträgen, Daten oder anderen Informationen, unterschieden. ¹⁷⁷

Für die Modellierung von Prozessen in Fabriken können neben den erwähnten Modellierungsansätzen auch universell einsetzbare Methoden verwendet werden. Verbreitete Vertreter sind z.B. Structured Analyses and Design Technique-Diagramme (SADT-Diagramme), Prozesskettenmodelle, Netzpläne und das UML-Aktivitätsdiagramm:

- *SADT-Diagramme*: SADT-Diagramme dienen der Veranschaulichung und präzisen informellen Beschreibung von Abläufen. Jede Aktivität wird mit einem Kästchen und herein- bzw. herausführenden Pfeilen dargestellt. Hereinführend Pfeile symbolisieren Eingänge, Kontrolleinflüsse und benutzte Ressourcen oder Mechanismen, herausführende Pfeile stehen für Ergebnisse der Aktivität. SADT-Diagramme sind hierarchisch strukturiert. ¹⁷⁸
- *Prozesskettenmodelle*: Mit Hilfe von Prozesskettenmodellen werden Abläufe als eine Menge verknüpfter Prozesse beschrieben, denen jeweils informelle Beschreibungen als auch Parameter wie Kennzahlen zugewiesen werden. Einzelne Prozesskettenelemente können ähnlich den SADT-Diagrammen hierarchisch verfeinert werden. Prozesskettenmodelle eignen sich in besonderer Weise für Aufgaben der Prozessgestaltung, bei der Schnittstellen von Teilprozessketten optimiert werden und Zusammenhänge zwischen Teilprozessketten übergreifend dargestellt werden müssen. ¹⁷⁹ Durch Prozessmodulation, d.h. einer gezielten Veränderung der Prozesskettenstruktur werden Leistungsverbesserungen in der Prozesskette angestrebt. ¹⁸⁰ Mit der Veränderung eines Strukturelements im Rahmen der Prozessgestaltung findet eine direkte oder indirekte Beeinflussung der anderen Strukturelemente statt. ¹⁸¹

¹⁷⁶ Gudehus (2005), S. 12-15.

¹⁷⁷ Vgl. Gudehus (2005), S. 14-19.

¹⁷⁸ Vgl. Scheer (1996), S. 17-41 bis 17-42; Keller (2000), S. 26-28 sowie Bernemann (2002), S. 55.

¹⁷⁹ Vgl. Eversheim (1996a), S. 7-128; Bernemann (2002), S. 56.

¹⁸⁰ Vgl. Bernemann (2002), S. 63-66; Schenk; Wirth (2004), S. 52.

¹⁸¹ Vgl. Kuhn (1995), S. 37 sowie Kuhn; Hellingrath (2002), S. 95.

- *Netzpläne*: Netzpläne bestehen analog zu SADT-Diagrammen aus verknüpften Aktivitäten. Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten lassen sich durch die Angabe des frühesten und spätesten Anfangstermins und Aktivitäten z.B. durch die Angabe des Aufwandes parametrieren.¹⁸² Im Gegensatz zu SADT-Diagrammen werden nur wenige informale Angaben im Diagramm festgehalten.
- *UML-Aktivitätsdiagramm*: Die UML stellt mit dem Aktivitätsdiagramm auch eine Methode für die Prozessmodellierung bereit.¹⁸³ Das Diagramm ist dazu geeignet, die Beeinflussung von Zuständen und ihren Beziehungen darzustellen.¹⁸⁴

Im Kontext der Prozessmodellierung hat sich weiterhin die Referenzprozessmodellierung etabliert. Referenzprozesse dienen insbesondere der Standardisierung von Geschäftsprozessen mit Hilfe unternehmensunabhängiger, von spezifischen Anforderungen abstrahierten Gestaltungsmustern.¹⁸⁵ Die Referenzmodelle integrieren Prozess-Know-how in Form von Ablaufbeschreibungen, Beschreibung der Aufbauorganisation oder Informations- und Datenstrukturen. Die Standardisierung von Unternehmensprozessen führt aufgrund identischer Prozessdurchführung und Prozessergebnisse unter anderem zu einer Vereinfachung des Informationsaustausches, einer erhöhten Handlungssicherheit und leichteren Einarbeitung von Mitarbeitern. Einen hohen Verbreitungsgrad hat bspw. das Supply-Chain Operations Reference-model (SCOR-model) für das Management von Produktions- und Logistikprozessen in Supply Chains erzielt.¹⁸⁶

In einem engen Zusammenhang mit der Prozessstandardisierung steht die Modularisierung. Ein Prozessmodul ist eine fest definierte Kette von Arbeitsschritten, die unter bestimmten Voraussetzungen unverändert abläuft.¹⁸⁷ Somit kann ein Prozessmodul als eine Art Baustein über definierte Schnittstellen mit anderen Modulen zu einem neuen Gesamtsystem mit anderen Eigenschaften kombiniert werden.

2.2.4 Grafische und virtuelle Modelle

Die Anwendung von CAD-Systemen als gestalterisches und unterstützendes Werkzeug ist heute nicht mehr aus der Fabrikplanung wegzudenken. Bei der Konstruktion mit modernen CAD-Systemen, wie z.B. AutoCAD oder CATIA werden räumliche Geometriedaten von Objekten in Fabriken erzeugt und als 2D-, 2.5D- bzw. 3D-Modell optisch dargestellt. 2D-Modelle kommen insbesondere bei der Layout- und Materialflussplanung zum Einsatz.¹⁸⁸ 3D-Modelle werden bei Raumplanungen, Ergonomie- und Kollisionsuntersuchungen oder Ergeb-

¹⁸² Vgl. Bernemann (2002), S. 55-56.

¹⁸³ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 26 und Martin; Odell (1999), S. 164-165.

¹⁸⁴ Vgl. Burkhardt (1999), S. 285.

¹⁸⁵ Vgl. Köster (2002), S. 31.

¹⁸⁶ Vgl. Holten; Melchert (2002), S. 207 und im Internet: <http://www.supply-chain.org>.

¹⁸⁷ Vgl. Bichlmaier (2000), S. 78-79.

¹⁸⁸ Vgl. Straßburger et al. (2006).

nispräsentation von Simulationen eingesetzt.¹⁸⁹

Die rechnerinterne Speicherung der Objekte und ihre Abbildung erfolgt meist nach system-spezifischen Abbildungsschemata. Die verschiedenen CAD-Systeme unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich des verwendeten Geometriemodells. Eine Klassifizierung findet zwischen zweidimensionalen Modellen und dreidimensionalen Draht-, Flächen- oder Volumenmodellen statt.¹⁹⁰

Die Modellierung bei CAD-Systemen erfolgt i.d.R. parametrisch, d.h. die Veränderung grafischer Objekte erfolgt durch die Modifikation von einzelnen Parametern, wie z.B. der Länge oder dem Durchmesser eines grafischen Objektes. Die gegenseitige Abhängigkeit von Geometrie und Parameter wird als bidirektionale Assoziativität bezeichnet. Zu den grundlegenden Ansätzen der Volumenmodellierung in CAD-Systemen zählen Constructive Solids Geometry-Modelle (CSG-Modelle), Boundary Representation-Modelle (B-Rep-Modelle) oder Hybridmodelle dieser beiden Modellarten.¹⁹¹ Bei CSG-Modellen handelt es sich um Volumenmodelle, bei denen die Modellinformationen in Form einer Entstehungshistorie in einem Verknüpfungsbaum abgelegt werden. Komplexe Volumina werden durch mengentheoretische Operationen von Volumenelementen erzeugt.¹⁹² Bei B-Rep-Modellen werden Volumen durch die das Volumen umhüllenden Begrenzungsflächen und die relative Lage des Materials zu den Begrenzungsflächen beschrieben.¹⁹³ Mit den heutigen CAD-Systemen wird eine featurebasierte parametrische Modellierung vorgenommen. Features beschreiben die Geometrie von Elementen und enthalten weitere elementbezogene Informationen zur Unterstützung des Konstrukteurs. In einem Instanzierungsprozess werden von vorgegebenen Featuredefinitionen Feature-Instanzen erzeugt und diese nach Belegung ihrer Parameter mit Werten in das Modell eingefügt.¹⁹⁴ Weiterhin verfolgen aktuelle CAD-Systeme einen objektorientierten Ansatz, der eng im Zusammenhang mit der Verwendung von Features steht. Ein Objekt ist ein Konstrukt aus geometrischen Elementen, beschreibenden Daten sowie zugeordneten Methoden. Objekte können jedoch auch anderer Art, wie z.B. Dokumente oder Aktivitäten sein. Durch Assoziation können mehrere Objekte miteinander verknüpft werden. Das CAD-Datenmodell wird damit zu einem Objektmodell erweitert.¹⁹⁵

Die Erstellung von digitalen Prototypen, bei denen die Konstruktionsergebnisse in Form mehrerer CAD-Modelle in einem Modell zusammengestellt werden, wird als Digital-Mock-Up bezeichnet. DMU erlangen mit der Vergabe von Konstruktionsaufträgen an Zulieferer bzw. der verteilten Entwicklung von komplexen Produkten zunehmend an Bedeutung.¹⁹⁶

¹⁸⁹ Vgl. Schreiber (2004).

¹⁹⁰ Vgl. Schaal (1992), S. 28-36.

¹⁹¹ Vgl. Stjepandic; Thel (2003), S. 53.

¹⁹² Vgl. Schaal (1992), S. 32.

¹⁹³ Vgl. Beyer (2002), S. 42 und Schaal (1992), S. 34.

¹⁹⁴ Vgl. Mendgen (1999), S. 15.

¹⁹⁵ Vgl. Lacour (2000), S. 50 und 52.

¹⁹⁶ Vgl. Horn (2004), S. 172 und 177.

Eine weitere Entwicklungsrichtung zur Darstellung von Produkten oder Fabriken ist die Virtuelle Realität. Von virtuellen Modellen oder virtueller Realität (VR) wird gesprochen, wenn die eingesetzten Technologien die drei Merkmale Immersion, Interaktion und Simulation aufweisen. Immersion beschreibt den Grad, in dem der Anwender in die virtuelle Welt einbezogen wird. Die Interaktion erfolgt bei VR-Systemen im dreidimensionalen Raum und nutzt mehrere Sinne des Menschen wie die visuelle Wahrnehmung und den Tastsinn. Mit Hilfe der Simulation wird das dynamische Verhalten der virtuellen Welt abgebildet.¹⁹⁷ Bei der Augmented Reality wird eine Kombination von menschlicher Wahrnehmung mit rechnergenerierten Informationen realisiert.¹⁹⁸ Für die Erstellung virtueller Modelle kommen spezielle Visualisierungsprogramme und Autorensysteme, die die Modelle zu einem Szenario zusammensetzen, zur Anwendung. Die am meisten verbreitete Beschreibungssprache für virtuelle Szenarien ist die Virtual Reality Modeling Language (VRML).

2.2.5 Kombinierte Modelle und Simulation

Im Verständnis dieser Arbeit werden mit den produktionsorientierten und den grafischen Fabrikmodellen zunächst zwei grundsätzliche Modellarten der Fabrik unterschieden (vgl. Bild 2-13). Die in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 beschriebenen objektorientierten bzw. prozessorientierten Modelle sollen den produktionsorientierten Modellen zugeordnet werden.

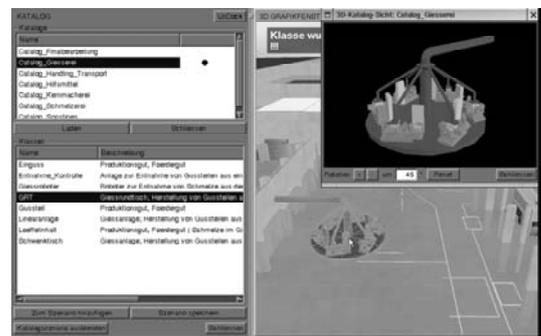
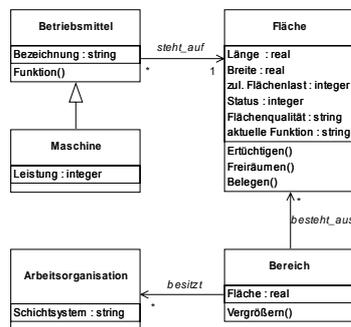
Modelle der Fabrik

**produktionsorientierte Modelle
(z.B. objektorientierte/prozessorientierte Modelle)**

- Informationsmodelle für die Lösung produktionstechnischer und -wirtschaftlicher Fragestellungen
- unterstützen operative Tätigkeiten von Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb
- bilden auch nicht-physische Objekte ab

grafische/virtuelle Modelle

- Informationsmodelle für die grafische Darstellung
- unterstützen u.a. Digital Mock-Up und VR
- Verwaltung von grafischen Objekten und Objektinformationen in Bibliotheken



Informationsmodelle

Bild 2-13: Modelle zur Abbildung von Fabrikssystemen

¹⁹⁷ Vgl. Schreiber (2004), S. 91.
¹⁹⁸ Vgl. Reinhart; Patron (2002), S. 205.

Produktionsorientierte Modelle dienen der gezielten Unterstützung konkreter Aufgaben von Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb. Grafische Modelle dienen hingegen primär der Visualisierung physischer Objekte und nicht der Lösung von Aufgaben, obwohl Werkzeuge, denen ausschließlich grafische Modelle zugrunde liegen dennoch, z.B. für die Layoutplanung und Kollisionsuntersuchungen, eingesetzt werden können.

Aufbauend auf dynamische produktionsorientierte Modelle können Simulationen durchgeführt werden. Der Begriff Simulation wird nach der VDI-Richtlinie 3633 wie folgt definiert:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“¹⁹⁹

Die Datenbasis, der Experimentverlauf oder die Experimentergebnisse von Simulationen werden oftmals mit grafischen Modellen visualisiert.²⁰⁰ Die Visualisierung hat das Ziel, eine hohe Anschaulichkeit herzustellen und unterstützt damit die interdisziplinäre Kommunikation zwischen den am Planungsprozess beteiligten Personen. Die Manipulation des Modells erfolgt oftmals durch die auch als Benutzerschnittstelle dienende grafische Repräsentation des Systems. Die Darstellung des Prozessablaufs oder die Zustandsanzeige von Modellelementen unterstützen das Verständnis komplexer dynamischer Sachverhalte.²⁰¹ Typische Simulationsanwendungen für Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb sind logistische Prozesssimulationen, Robotersimulationen oder Ergonomiesimulationen. Modellierungsmethoden für die Simulation sind bspw. Petri-Netze und erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten (eEPK).²⁰²

Simulationen liefern grundsätzlich keine Lösungen für gestellte Aufgaben. Sie sind vielmehr ein Instrument zur Bewertung vorgeschlagener Lösungen und können in der Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase von Produktionssystemen eingesetzt werden.²⁰³ Werkzeuge zur Simulation und die mit ihnen aufgebauten Simulationsmodelle enthalten jedoch implizit das Wissen von Experten. Insbesondere betrifft dies Wissen über die Grundprinzipien der abgebildeten technischen Systeme und Prozesse sowie der dazugehörigen Organisations- und Steuerungsstrategien.²⁰⁴

¹⁹⁹ VDI 3633 (1993).

²⁰⁰ Vgl. Zäh et al. (2005b), S. 177.

²⁰¹ Vgl. VDI 3633 (2003), S. 2.

²⁰² Vgl. Bernemann (2002), S. 55 oder Gausemeier; Fink (1999), S. 335-341.

²⁰³ Vgl. Ostermann (2001), S. 18.

²⁰⁴ Vgl. VDI 3633 (1993), S. 5.

2.3 Wissensrepräsentation für die Produktion

Die Wissensrepräsentation ist das dritte für diese interdisziplinäre Arbeit wesentlich relevante Fachgebiet. Während mit der Modellierung die konstruierte Abbildung der Wirklichkeit verfolgt wird, liegt der Schwerpunkt der Wissensrepräsentation auf der Formalisierung von Wissen zur rechnergestützten Verarbeitung. Den Grundlagen der Wissensrepräsentation wird sich in Abschnitt 2.3.1 gewidmet. Im Abschnitt 2.3.2 findet darauf folgend die Vorstellung vorhandener Arbeiten zur Wissensrepräsentation im Bereich der Produktion statt.

2.3.1 Grundlagen der Wissensrepräsentation

Im Vorfeld der Ausführungen zur Wissensrepräsentation soll zunächst der Wissensbegriff definiert werden. Die Definition wird i.d.R. indirekt über eine Abgrenzung zu Daten und Informationen vorgenommen. Daten bestehen aus einer kombinierten Folge von Zeichen, z.B. Zahlen oder Buchstaben, die keine Verwendungshinweise besitzen und demnach an sich wirkungs- und bedeutungslos sind. Sie werden zu Informationen, wenn sie in einem Bedeutungskontext gebracht werden.²⁰⁵ In Tabelle 2-3 sind unterschiedliche Wissensarten mit kurzen Beschreibungen und jeweils einem Beispiel aufgeführt.²⁰⁶

Wissensart	Beschreibung
deklaratives Wissen (auch Faktenwissen)	- bewiesene Fakten in einem speziellen Fachgebiet - Beispiel: Werkstoff x hat Dichte y.
prozedurales Wissen (auch Handlungswissen oder Methodenwissen)	- Wissen darüber, wie etwas gemacht wird - Hinweise zur Benutzung von Fähigkeiten, Algorithmen, Techniken und Methoden - Beispiel: Der Umfang eines Kreises berechnet sich nach der Formel $U = 2\pi r$.
Regelwissen	- Wissen über Strategien zur Bewältigung von Problemsituationen - Beispiel: Wenn das Verhältnis Außendurchmesser/Innendurchmesser größer als 1.2 ist, dann darf nicht mehr nach der Theorie der dünnen Schalen gerechnet werden.
heuristisches Wissen (Lösungsheuristiken, Faustregeln)	- allgemeine Regeln, die sinnvolle Abläufe vorschlagen, wenn invariante prozedurale Regeln nicht zur Verfügung stehen oder Ausnahmen vorliegen - Beispiel: Bei der Gestaltung von Maschinen des Typs x sollte man mit dem Entwerfen der Komponente y beginnen.
Bedingungswissen	- Normen, Gesetzmäßigkeiten - Beispiel: Die genormten Wellendurchmesser von Standard-Asynchronmotoren sind einzuhalten.

Tabelle 2-3: Wissensarten

²⁰⁵ Vgl. Reinmann-Rothmeier et al. (2001), S. 15-16 und North (1998), S. 40.

²⁰⁶ Vgl. Schaal (1992), S. 63-64.

Wissen entsteht im Ergebnis der Verarbeitung von Informationen durch das Bewusstsein, wobei diese in Verbindung mit persönlicher Erfahrung gebracht und zweckdienlich, d.h. sinnstiftend und der Situationsbewältigung dienend, vernetzt werden. Informationen sind die Basis aus der Wissen generiert und gleichzeitig die Form, in der Wissen kommuniziert und gespeichert wird.²⁰⁷ Als Wissen werden in dieser Arbeit Informationen bezeichnet, die zur effizienten Lösung eines Problems verwendet werden können.²⁰⁸

Die Repräsentation von Wissen besteht im Aufschreiben von Symbolen, welche die Repräsentationsstruktur bilden und in einer erkennbaren Weise einem Ausschnitt einer zu repräsentierenden Welt entsprechen. Die Erkennbarkeit wird durch Vorliegen einer Interpretationsvorschrift sichergestellt, die Angaben darüber enthält, wie die Strukturen der Repräsentation auf die Merkmale der repräsentierten Welt abgebildet werden.²⁰⁹ An jedes Repräsentationsschema wird die Anforderung gestellt, die wichtigsten Merkmale einer Problemdomäne zu beschreiben und diese Daten einem Problemlösungsverfahren zugänglich zu machen. Die durch den Entwickler einer Wissensrepräsentation auszuwählende Repräsentationsart muss demzufolge dazu geeignet sein, dass für eine spezifische Problemstellung erforderliche Wissen auszudrücken.²¹⁰

In Bild 2-14 wurden gemäß dem Verständnis dieser ingenieurwissenschaftlichen Arbeit zwei Ebenen der Wissensrepräsentation aufgeführt und diesen beispielhaft Repräsentationsarten zugeordnet.

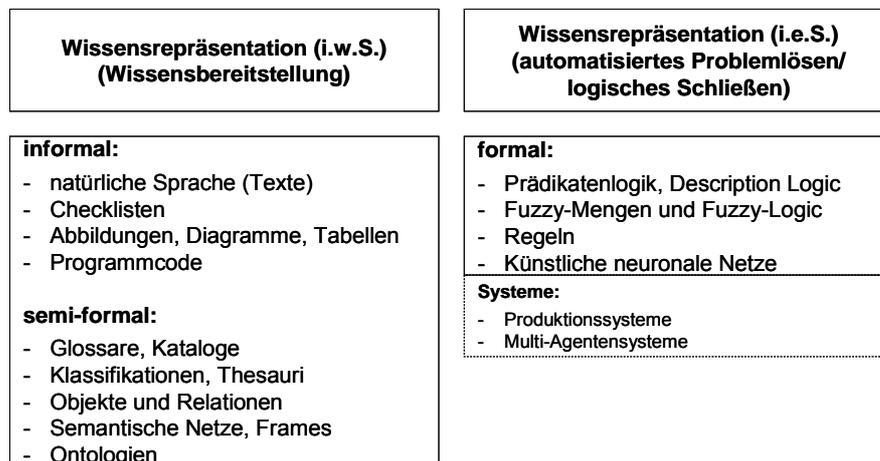


Bild 2-14: Ebenen der Wissensrepräsentation im Sinne dieser Arbeit

²⁰⁷ Vgl. North (1998), S. 40-41.

²⁰⁸ Vgl. Heinsohn; Socher-Ambrosius (1999), S. 1.

²⁰⁹ Vgl. Reimer (1991), S. 10 und Debenham (1998), S. 15.

²¹⁰ Vgl. Luger (2001), S. 58.

Die Wissensrepräsentation kann mit unterschiedlicher Mächtigkeit, d.h. Formalisierung und Fähigkeit zum Problemlösen erfolgen. Während es sich bei der Wissensrepräsentation im weiten Sinne (i.w.S.) vor allem um Repräsentationsarten zur Wissensbereitstellung bzw. Informationsstrukturierung für den Nutzer der Repräsentation handelt, weisen die Repräsentationsarten der Wissensrepräsentation im engen Sinne (i.e.S.) die Fähigkeit zur Ableitung neuen Wissens bzw. zur Generierung von Lösungen aus einer Menge von Fakten und Regeln auf.²¹¹ Diese Sprachen erlauben es, abstrakte Klassen von Objekten und Situationen zu formulieren und für automatisierte Problemlösungsprozesse einzusetzen.²¹² Um ihre Eignung für die wissensorientierte Fabrikmodellierung später besser einschätzen zu können, werden die bekanntesten der im Bild 2-14 aufgeführten Repräsentationsarten kurz erläutert:

- *Semantische Netze*: Mit semantischen Netzen werden durch den Menschen erzeugte Wissensstrukturen in Form von Konzepten und ihren semantischen Relationen dargestellt. Zwei gebräuchliche Relationen in semantischen Netzen sind „ist_ein“-Beziehungen und „Teil_von“-Beziehungen.²¹³ Semantische Netze werden unter anderem angewendet, um Suchvorgänge durch die Strukturierung von Informationen effektiver zu gestalten.²¹⁴ Aktuelle Anwendungen sind Topic Maps und das Semantic Web.²¹⁵ In Verbindung mit semantischen Netzen können Frames angewendet werden. Diese organisieren Wissen in Form von Eigenschaftslisten, die Konzepten zugeordnet sind.²¹⁶
- *Prädikatenlogik*: Die Prädikatenlogik ist der am intensivsten erforschte formale Repräsentationsansatz. Sie basiert wie die Aussagenlogik auf dem Wahrheitswert von Aussagen.²¹⁷ Bei der formalen Repräsentation wird eine Problembeschreibung in ein algebraisches Problem transformiert, das durch erprobte feste Mechanismen verarbeitbar ist. Die Prädikatenlogik gehört mit einem Alphabet, einer formalen Sprache, Axiomen und Schlussfolgerungsregeln zur formalen Wissensrepräsentation.²¹⁸ Aufbauend auf Elementen der Prädikatenlogik wurde die Description Logics entwickelt, die zur Abbildung semantischer netzwerkbasierter Strukturen geeignet ist.²¹⁹

²¹¹ Die Einteilung in Wissensrepräsentation im weiten Sinne (i.w.S.) sowie Wissensrepräsentation im engen Sinne (i.e.S.) ist eine im Sinne dieser Arbeit vorgenommene Systematisierung.

²¹² Vgl. Luger (2001), S. 62.

²¹³ Vgl. Schaal (1992), S.64-65.

²¹⁴ Ein neues Anwendungsfeld für semantische Netze ist das Internet, bei dem Seitenanzahl und Informationen permanent wachsen und die dadurch steigende Unübersichtlichkeit das Navigieren zu den relevanten Informationen erschwert. Suchmaschinen können Informationen nicht interpretieren und somit nicht automatisch in Beziehung setzen. Mit dem Semantic Web verfolgt das World Wide Web Consortium (W3C) das Ziel, eine verbesserte Verknüpfung der Inhalte mit Hilfe von Metadaten zu erzielen. Vgl. im Internet <http://www.w3.org> und z.B. Werner et. al. (2005), S. 218.

²¹⁵ Vgl. Grand; Soto (2002).

²¹⁶ Vgl. Luger (2001), S. 243 und Reimer (1991), S. 164.

²¹⁷ Vgl. Heinsohn; Socher-Ambrosius (1999), S. 15.

²¹⁸ Vgl. Schaal (1992), S. 64.

²¹⁹ Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 7.

- *Fuzzy-Mengen und -Logik*: Mit Fuzzy-Mengen, auch unscharfe Mengen genannt, wird versucht, die Vagheit und mangelnde Präzision der Sprache mathematisch abzubilden. Die Bedeutung von Informationen wird quantitativ ausgedrückt, indem eine Funktion der Mengenzugehörigkeit von Elementen zu unscharfen Teilmengen eingeführt wird, die reelle Werte zwischen 0 und 1 einnehmen kann.²²⁰ Die Fuzzy-Logik wird z.B. für die Regelung von Prozessen auf Basis von Expertenwissen eingesetzt.
- *Constraints*: Der Constraint-Ansatz realisiert eine Wissensrepräsentation durch die Angabe von Neben- und Randbedingungen, ohne dass eine konkrete Problemlösung vorgegeben wird. Constraints eignen sich insbesondere zur Lösung von Zuordnungsproblemen bei denen Objekten aus einer gegebenen Menge Werte aus einem festen Wertebereich zugeordnet werden sollen.²²¹
- *Regeln*: Regeln stellen Wissen über allgemeine Beziehungen zwischen Sachverhalten dar. Sie bestehen aus einer Menge von Bedingungen sowie einer Folgerung und weisen dementsprechend eine „wenn-dann“-Form auf.²²²
- *Künstliche Neuronale Netze*: Künstliche Neuronale Netze sind Algorithmen, die natürlichen neuronalen Netzen nachgebildet sind. Sie können zwischen Daten bestehende Zusammenhänge in Form von mathematischen Funktionen erlernen und diese wiederum auf neue Daten anwenden.²²³

In wissensbasierten Systemen wird die Wissensrepräsentation für die Verwendung zum intelligenten Problemlösen IT-gestützt umgesetzt. Der Begriff der wissensbasierten Systeme, der oftmals als Alternative zu KI-Systemen oder intelligenten Systemen verwendet wird, hebt hervor, dass das vom System benutzte Wissen explizit in einer Wissensbasis codiert ist und somit austauschbar, erweiterbar und modifizierbar wird, ohne dabei einen Programmcode ändern zu müssen.²²⁴ Wissensbasierte Systeme unterscheiden sich in der Form des enthaltenen Wissens und den jeweils verwendeten Repräsentationsarten.²²⁵ Wissensbasierte Systeme sind intelligent und zum logischen Schließen fähig. In diesem Zusammenhang wird intelligent wie folgt definiert:

„... 'intelligent' refers to the ability of a system to find implicit consequences of its explicitly represented knowledge. Such systems are therefore characterized as knowledge-based systems.“²²⁶

²²⁰ Vgl. Luger (2001), S. 359-350 und Heinsohn; Socher-Ambrosius (1999), S. 247-248.

²²¹ Vgl. Russel; Norvig (2004), S. 183; Winston (1993), S. 231 und Heinsohn; Ambrosius (1999), S. 55.

²²² Vgl. Heinsohn; Socher-Ambrosius (1999), S. 121-123.

²²³ Vgl. Luger (2001), S. 459-461 und Ostermann (2001), S. 12.

²²⁴ Vgl. Milberg et al. (1991), S. 5.

²²⁵ Vgl. VDI-EKV (1992), S.18.

²²⁶ Nardi; Brachman (2003), S. 2.

Zu den wissensbasierten Systemen gehören Expertensysteme. Diese repräsentieren Erfahrungswissen und unterstützen Experten bei der Problemlösung. Expertensysteme sind i.d.R. Produktionssysteme und für die Verarbeitung vieler technisch-physikalischer Aufgaben geeignet. Bei Produktionssystemen werden auf Daten bzw. Fakten vordefinierte Regeln angewendet und somit Schlussfolgerungen generiert. Das Faktenwissen vermehrt sich durch die wiederholte Anwendung von Regeln, d.h. es werden neue Daten „produziert“, welche bei einem erneuten Durchlauf eines entweder die Vorwärts- oder die Rückwärtsverkettung anwendenden Algorithmus berücksichtigt werden.²²⁷

In Bild 2-15 ist der prinzipielle Aufbau eines wissensbasierten Systems dargestellt. Ein wissensbasiertes System besteht aus einer Wissensbasis, die problemspezifische bzw. relevante Informationen konserviert, einer Inferenzkomponente, welche das Wissen gezielt verarbeitet und einer Dialogkomponente, die dem Nutzer Zugriff auf die generierten Ergebnisse gewährt sowie Möglichkeiten zur Eingabe neuer Informationen bietet.

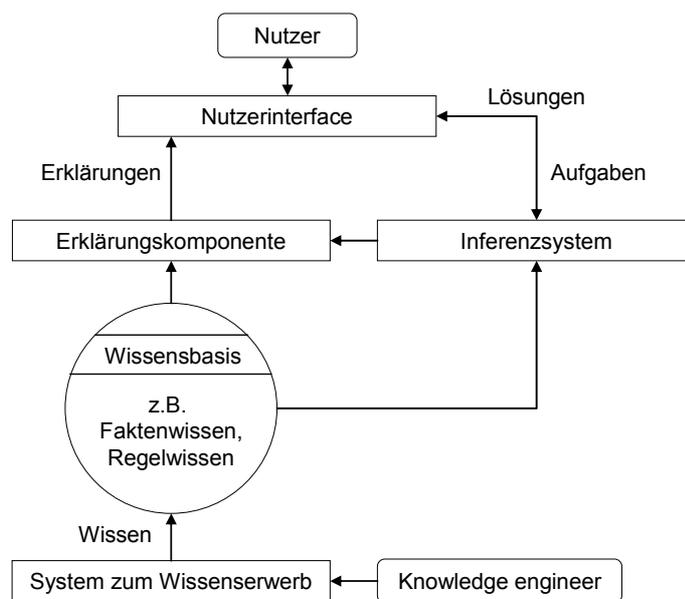


Bild 2-15: Aufbau eines wissensbasierten Systems²²⁸

Die Wissensbasis ist so konzipiert, dass sie dem Inferenzsystem Informationen unter Erkennen des aktuellen Suchstatus strukturiert zur Verfügung stellt.²²⁹ In Bild 2-15 ist zusätzlich eine Erklärungskomponente dargestellt. Diese ermöglicht es dem Nutzer zu erläutern, warum und auf welche Weise eine bestimmte Lösung gefunden wurde.²³⁰

²²⁷ Vgl. Braun (2001); Luger (2001), S. 289 und VDI-EKV (1992), S. 22.

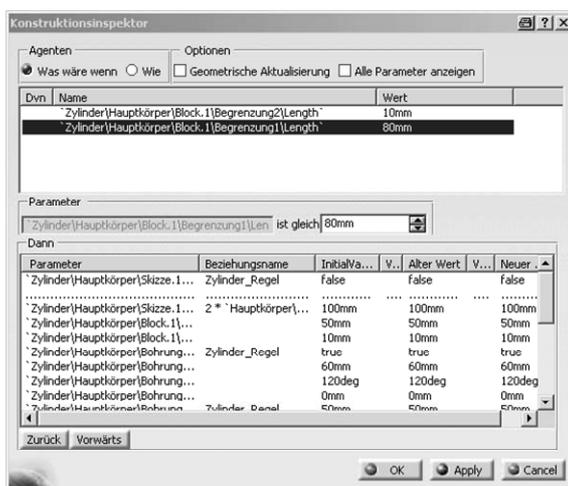
²²⁸ Vgl. Helbig (1996), S. 249.

²²⁹ Vgl. Schaal (1992), S. 63.

²³⁰ Vgl. Helbig (1996), S. 248-249.

2.3.2 Anwendungen der Wissensrepräsentation in der Produktion

Die Wissensrepräsentation wird bisher vor allem in der Produktentwicklung in Kombination mit CAD-Systemen umgesetzt. In Bild 2-16 sind z.B. drei Module des 3D-Modellierers CATIA V5 aufgeführt, welche die Verarbeitung von Konstruktionswissen, z.B. durch Integration von Regeln und Formeln in das 3D-Modell, unterstützen.²³¹ Für die Wissensrepräsentation in der Produktentwicklung wird auch der Begriff des Knowledge Based Engineering (KBE) verwendet.²³² Die vorhandenen Systeme weisen dabei jedoch nicht immer die im Abschnitt 2.3.1 definierte „Intelligenz“ von wissensbasierten Systemen zum logischen Schließen auf.



CATIA V5, IBM Product Lifecycle Management:



Knowledge Advisor

Einbetten von Know-how in die Konstruktionszeichnung, welches bei der Entscheidungsfindung für technische Fragestellungen und Probleme verwendet werden kann



Generative Knowledge

Konstruktionen auf Skriptbasis automatisiert erstellen



Knowledge Expert

Konstruktionswissen in Regeldatenbanken sammeln, verwalten und kollaborativ verwenden

Bild 2-16: Beispiel für Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung

Im Bereich der Produktion kommt die Wissensrepräsentation unter anderem zur Abbildung von fertigungsrelevantem Wissen zum Einsatz. Wissensnetze und die semantische Suche erleichtern bspw. das Auffinden von Informationen auf einem Informationsportal für mechanische Fügetechniken oder unterstützen die Abbildung von Wirkungszusammenhängen bei der Qualitätsprognose im Rahmen des Anlaufmanagements.²³³ Für die Simulation von Produktionsprozessen wurde unter anderem ein Ansatz entwickelt, bei dem künstliche neuronale Netze in das Simulationsmodell für ein Automobilmontagewerk integriert oder Simulationsmodelle durch Regeln ergänzt werden.²³⁴ Ein weiteres Beispiel ist ein objektorientiertes und wissensbasiertes System zur sicherheitstechnischen Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen, bei dem es sich um ein regelbasiertes Expertensystem handelt.²³⁵

²³¹ Vgl. Braun (2001), S. 7-8.

²³² Vgl. Wendenburg (2004) und Liese; Stjepandic (2004).

²³³ Vgl. Hahn; Heeren (2004), S. 114-119 und Fleischer et al. (2006), S. 414.

²³⁴ Vgl. Ostermann (2001), S. 45 und Milberg et al. (1991), S. 7.

²³⁵ Vgl. Leimer (2001), S. 150.

Einige Arbeiten beschränken sich auf die Informations- und Wissensbereitstellung in Datenbanken bzw. die Integration von Wissen in Programmcode. Zu erstgenanntem gehört ein System, welches Wissen für die Gebäudeplanung, z.B. in Form von geordneten Listen, Tabellen, Grafiken, Diagrammen oder Berichten bereithält und das zusammen mit Systemen der Produktionsplanung eingesetzt wird oder eine Datenbank, in der Wissen zum Einstechschleifen dokumentiert wird.²³⁶ Ein Beispiel für die Integration von Wissen in Programmcode ist eine mittels Express-Code vorgenommene Spannplanung für verschiedene Fertigungsverfahren.²³⁷

Ergänzend soll darauf hingewiesen werden, dass in den letzten Jahren auch das Wissensmanagement für die Produktion thematisiert wurde. Unter Wissensmanagement wird die „Entwicklung, Unterstützung, Überwachung und Verbesserung von Strategien, Prozessen, Organisationsstrukturen und Technologien zur Wissensverarbeitung im Unternehmen“ verstanden.²³⁸ Das Ziel des Wissensmanagements ist der bewusste und systematische Umgang mit der Ressource Wissen und der zielgerichtete Einsatz von Wissen in Organisationen. Für den systematischen Umgang mit Wissen wird z.B. eine Differenzierung in explizites und implizites Wissen oder individuelles und organisationales Wissen vorgenommen.²³⁹ Für die Fabrikplanung wurden im Besonderen praxisrelevante Methoden für die Definition von Wissenszielen, Wissensidentifikation, Wissenserwerb, Wissensentwicklung, Wissensverteilung, Wissensnutzung und Wissensbewahrung vorgeschlagen.²⁴⁰ Der richtige Umgang mit der Ressource Wissen wird auch als Voraussetzung für eine hohe organisatorische und technische Wandlungsfähigkeit in der Produktion angesehen.²⁴¹

2.4 Aufgabenstellung

Die Zielstellung dieser Arbeit wurde bereits im Abschnitt 1.3 vorgegeben. Sie liegt in der Entwicklung eines wissensorientierten Ansatzes der Fabrikmodellierung. Der Stand der Forschung zu diesem Thema findet sich im Abschnitt 2.4.1. Die Anforderungen, welche die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb an wissensorientierte Modelle und Werkzeuge stellen, werden im Abschnitt 2.4.2 herausgearbeitet. Der für diese Arbeit gewählte und den Anforderungen entsprechende Lösungsansatz sowie die Vorgehensweise in dieser Arbeit finden sich im Abschnitt 2.4.3.

²³⁶ Vgl. Meierlohr (2003), 61-66 und Klocke et al. (2005), S. 466.

²³⁷ Vgl. Zahn (1999).

²³⁸ Vgl. Allweyer (1998), S. 40. Nach Reinmann-Rothmeier et al. (2001), S. 18 umfasst Wissensmanagement die Gesamtheit der Konzepte, Strategien und Methoden zur Schaffung einer lernenden Organisation auf Basis der Gestaltungsebenen Mensch, Technik und Organisation.²³⁸

²³⁹ Vgl. Reinmann-Rothmeier et al. (2001), S. 17.

²⁴⁰ Vgl. Dombrowski; Tiedemann (2004), S. 138-139 und Tiedemann (2005), S. 175.

²⁴¹ Vgl. Berger et al. (2004), S. 80.

2.4.1 Stand der Forschung

Im Abschnitt 1.2 wurde bereits dargelegt, dass es sich insbesondere bei der Fabrikplanung um eine wissensintensive Tätigkeit handelt, bei der eine hohe Informationskomplexität zu beherrschen ist. Der Fabrikplaner hat während der Planung eine Vielzahl von Informationen zu erfassen und zu verarbeiten. Er vernetzt diese Informationen in einem kognitiven Prozess unter Anwendung eines hohen Anteils von Erfahrungswissen und generiert eine realisierbare Systemlösung, die den gegenseitigen Abhängigkeiten im System gerecht wird.²⁴² Auch das Änderungsmanagement und der Fabrikbetrieb sind oftmals von Aufgaben geprägt, bei denen vor allem spezifisches Wissen bzw. Erfahrungswissen zum Einsatz kommt. Im Folgenden sind drei Beispiele für dieses Wissen aufgeführt:

- *Fabrikplanung*: Eine Maschine X, die Vibrationen erzeugt, muss in einem Fertigungsbereich mindestens 10m von einem Maschinentyp Y entfernt stehen.
- *Änderungsmanagement*: Der Prozess X wird von einem Produkt Y durchlaufen. Er ist kritisch für die Durchlaufzeit von Y und insbesondere von der Materialdicke abhängig.
- *Fabrikbetrieb*: Die Qualität eines Feindrehprozesses wird durch eine Temperaturschwankung, welche durch das Öffnen eines Hallentors an einer Maschine auftritt, beeinflusst. Dies wirkt sich negativ auf die Qualität des Teils X aus.

In Bezug auf die Zielstellung dieser Arbeit - der Entwicklung einer Methode zur wissensorientierten Fabrikmodellierung - sollen zum Stand der Forschung zwei wesentliche Fragen beantwortet werden:

- Inwieweit unterstützen heutige Fabrikmodelle und digitale Planungswerkzeuge kognitive Prozesse durch eine geeignete Wissensrepräsentation (i.w.S.)?
- Werden einige der kognitiven Prozesse durch eine Wissensrepräsentation (i.e.S.) nachgebildet?

Die Differenzierung zwischen der Wissensrepräsentation (i.w.S.) und Wissensrepräsentation (i.e.S.) wurde in Abschnitt 2.3.1 vorgenommen. Ein produktionsorientiertes Modell eines Fabriksystems (vgl. Abschnitt 2.2), welches mit mindestens einer dieser beiden Ausprägungen der Wissensrepräsentationen gekoppelt ist, soll als wissensorientiertes Fabrikmodell bezeichnet werden.

Aus dem Entwicklungsstand der Digitalen Fabrik (vgl. Abschnitt 2.1.6) und Fabrikmodellierung (vgl. Abschnitt 2.2) ist ersichtlich, dass die heutigen Werkzeuge und die zugrunde lie-

²⁴² Zum Begriff der Kognition vgl. Strube et al. (1995), S. 299-300.

genden Modelle nicht explizit für die Wissensrepräsentation konzipiert wurden. Sie dienen der Unterstützung vorbestimmter Tätigkeiten in der Fabrikplanung, im Änderungsmanagement oder im Fabrikbetrieb und werden deshalb in dieser Arbeit als problemorientierte Werkzeuge bezeichnet (vgl. Abschnitt 1.3). Bei diesen Tätigkeiten kann es sich um gestaltende Tätigkeiten, bewertende Tätigkeiten oder Routinetätigkeiten handeln.²⁴³

Die diesen Werkzeugen zugrunde liegenden Modelle bilden die Informationen ab, die zur Realisierung der Funktionen des Werkzeuges benötigt werden. Sie orientieren sich dementsprechend nicht primär an den Wissensbedarf, der bei der Lösung eines Problems besteht, sondern vielmehr an den Datenbedarf für die Funktionserfüllung. Dabei erfolgt die informationstechnische Abbildung der Produkte, Prozesse oder Ressourcen einer Fabrik auf Basis fest definierter Datenmodelle (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese legen z.B. fest, dass einem Prozess eine oder mehrere Ressourcen zugeordnet werden, welche durch die Prozesszeit zur Herstellung eines Produktes beansprucht werden können. Ein weiteres Beispiel ist die Zuordnung eines grafischen Objektes in einer Klassenbibliothek zu einer Objektklasse.

Problemorientierte Werkzeuge stellen jedoch auch Wissen über das Nutzerinterface indirekt, d.h. nicht mit dem expliziten Ziel der Wissensrepräsentation, zur Verfügung. CAD- oder VR-Systeme bieten z.B. Zusatzinformationen über einzelne im Layout dargestellte Objekte oder liefern Informationen über Maschinenabstände und Lagebeziehungen.²⁴⁴ Ein weiteres Beispiel sind Simulationssysteme, welche mit vordefinierten Modellelementen und einer methodischen Vorgehensweise implizit Wissen für die Analyse von zu simulierenden Systemen bereitstellen.

Wissensorientierte Fabrikmodelle und Werkzeuge, welche die Unterstützung der Kognition durch die oben angegebene Definition als primäres Ziel verfolgen, sind jedoch bisher kaum bekannt. Allerdings existieren Ansätze, bei denen eine informale Wissensrepräsentation mit einem produktionsorientierten Fabrikmodell bzw. eine semi-formale bzw. formale Wissensrepräsentation ohne einem produktionsorientierten Fabrikmodell umgesetzt werden. Beispiele sind die Wissensbereitstellung bzw. Wissensrepräsentation im Rahmen eines VR-Einsatzes im Änderungsmanagement, der Gebäudekonzeption und der Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung.²⁴⁵ Für die Frage, warum Ansätze der wissensorientierten Modellierung, z.B. aus der Produktentwicklung, bisher kaum auf Fabrikssysteme übertragen wurden, gibt es keine eindeutige Antwort. Ein Handlungsbedarf und die Umsetzbarkeit derartiger Modelle scheinen zunächst gegeben zu sein.²⁴⁶

²⁴³ Vgl. Meierlohr (2003), S. 69.

²⁴⁴ Vgl. z.B. ein VR-Fabrikmodell bei Aurich et al. (2005), S. 67-69, in dem an grafischen Objekten Informationen über die Änderungshistorie und weitere Informationen für das Änderungsmanagement angehängt werden. Weiterhin können Beziehungen zwischen den VR-Objekten dokumentiert werden.

²⁴⁵ Vgl. Aurich et al. (2005), S. 67-68, Kraft; Schneider (2005) und Meierlohr (2003), S. 98-100 und 115-117.

²⁴⁶ Vgl. Bley et al. (2006), von denen in einer Unternehmensstudie Handlungsbedarf bzgl. der Hinterlegung von Planungswissen in digitalen Fabrikmodellen festgestellt wurde.

Eine wesentliche Aufgabe bei der Problemlösung in Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb ist die möglichst vollständige Verarbeitung von Informationen über Produkte, Prozesse, Ressourcen, Restriktionen und sonstigen Rahmenbedingungen. Hierzu gehört vor allem auch die Vernetzung dieser Informationen im jeweiligen Problemkontext. Problemorientierte Werkzeuge bieten oftmals die Verwaltung von objektbezogenen Wissen und bilden Beziehungen, wenn überhaupt, nur als feststehende Datenstrukturen ab. Mit dem Nicht-Vorhandensein von wissensorientierten Modellen fehlen somit insbesondere Modelle, die das Fabrikssystem auch auf der Ebene des strukturalen Konzeptes der Allgemeinen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.1.1) beschreiben können.

2.4.2 Anforderungen an eine wissensorientierte Fabrikmodellierung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Instrumentariums, welches zur Erstellung fabrikspezifischer und wissensorientierter Fabrikmodelle angewendet werden kann. Wissensorientierte Fabrikmodelle integrieren Wissen, welches dem Modellnutzer als Eingangsinformation zur Lösung von Problemstellungen dient. An das Instrumentarium sollen die in Tabelle 2-4 aufgezählten Anforderungen gestellt werden. Neben der Beschreibung der Anforderungen findet sich in der Tabelle auch jeweils die Herleitung der Anforderung.

Anforderung	Beschreibung	Herleitung der Anforderung
Allgemeingültigkeit	Entwicklung eines allgemein anwendbaren Instrumentariums zur Erstellung fabrikspezifischer Modelle und der Integration von Wissen unterschiedlicher Wissensdomänen.	Die wissensorientierte Fabrikmodellierung soll, z.B. analog zur Unternehmensmodellierung oder Simulation, als Methode eingeführt werden.
Kognitionsorientierung und Visualisierung	Das Modell stellt Wissen, welches in den Denkprozess des Modellnutzers als Eingangsinformation zum Problemlösen einfließt, kontextbezogen, strukturiert und übersichtlich bereit. Für eine gute Kognition sollen Informationen visualisiert werden.	Der eigentliche Denkprozess des Modellnutzers soll unterstützt und nicht Ergebnisse dokumentiert bzw. verifiziert werden (vgl. Abschnitt 1.3).
Durchgängigkeit	Mit dem Instrumentarium erstellte Modelle sollen durchgängig im Lebenszyklus einer Fabrik eingesetzt werden können.	Eine Forderung der Digitale Fabrik ist die durchgängige Anwendung im Fabriklebenszyklus (vgl. Abschnitt 2.1.6). Der Nutzen der Wissensintegration erhöht sich mit der Häufigkeit der Wissensabfrage, die mit einer durchgängigen Modellnutzung wahrscheinlicher ist.
Abbildung von Relationen Wissensrepräsentation (i.w.S.)	Im Mittelpunkt steht nicht Objektwissen sondern Beziehungswissen zwischen Objekten.	Für die Realisierung einer Wissensrepräsentation müssen objektbezogene Informationen mit ihren Relationen abgebildet werden können (vgl. Abschnitt 2.3.1 und 2.4.1).

Vollständigkeit	Abbildung von Produkten, Prozessen und Ressourcen.	Die Problemlösung in Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb setzt die Verarbeitung von Informationen über Produkte, Prozesse und Ressourcen voraus.
Prozessorientierung	Prozesse sollen als Zugriffspunkt auf Informationsstrukturen und Wissen fungieren.	Prozesse bilden das Konstrukt, das die Funktionen eines Fabriksystems beschreibt und an dem die Leistung des Systems gemessen wird (vgl. Abschnitt 2.1.1 und 2.2.3). ²⁴⁷ Mit dem wissensorientierten Fabrikmodell soll deshalb Wissen prozessbezogen strukturiert werden können.
Integrierbarkeit	Das Instrumentarium soll in bestehende Modelle und Werkzeuge der Digitalen Fabrik integrierbar sein.	Die Integration der wissensorientierten Fabrikmodellierung in bestehende Modelle und Werkzeuge der Digitalen Fabrik können sich positiv auf die Verbreitung dieses neuen Modellierungsansatzes auswirken.
Wiederverwendung und Planungshilfe	Das Instrumentarium soll die Mehrfachnutzung von Modellelementen ermöglichen und wenn möglich, auch als Planungshilfe dienen.	Hierdurch wird die Wirtschaftlichkeit und der Nutzen der wissensorientierten Fabrikmodellierung erhöht (vgl. die Referenzmodellierung im Abschnitt 2.2.3).
Wissensrepräsentation (i.e.S.)	Integration von Ansätzen der formalen Wissensrepräsentation.	Die Wissensrepräsentation (i.e.S.) stellt eine potenzielle Erweiterung der wissensorientierten Fabrikmodellierung dar, weshalb die Machbarkeit und Anwendungen in Kombination mit einem Fabrikmodell eruiert werden sollen.

Tabelle 2-4: Anforderungen an das zu entwickelnde Instrumentarium

Aus den Anforderungen „Kognitionsorientierung und Visualisierung“, „Vollständigkeit“, „Prozessorientierung“ und „Integrierbarkeit“ ergeben sich Bezüge der Wissensrepräsentation zu den im Abschnitt 2.2.5 gegenübergestellten produktionsorientierten und grafischen/virtuellen Fabrikmodellen (vgl. Bild 2-17).

²⁴⁷ Vgl. Kettner et al. (1984), S. 6.

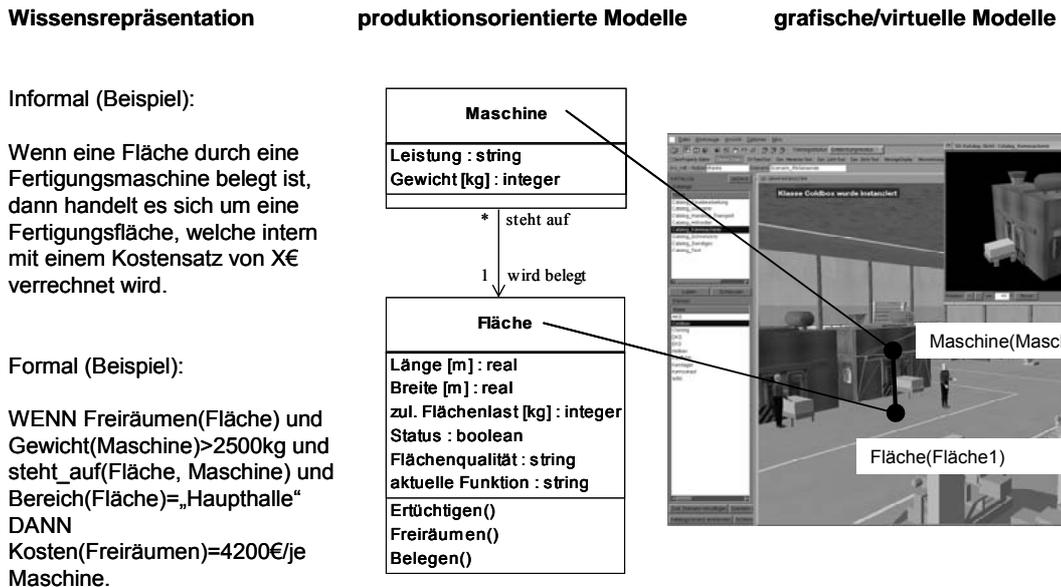


Bild 2-17: Schnittstellen zwischen Wissensrepräsentation und Fabrikmodellen

Für die in dieser Arbeit verfolgte semi-formale und formale Wissensrepräsentation müssen demnach Schnittstellen zu diesen Modellen definiert werden. Im Ergebnis können z.B. auf Basis einer Zuordnung von grafischen Objekten zu Elementen des produktionsorientierten Modells mit der Wissensrepräsentation abgebildetes Wissen visualisiert werden.

Eine wissensorientierte Fabrikmodellierung, welche den in Tabelle 2-4 genannten Anforderungen gerecht wird, muss somit Sprachen der Wissensrepräsentation sowie produktionsorientierte und grafische/virtuelle Modelle integrieren. Die Wissensrepräsentation in dieser Arbeit soll sich vor allem auf die Abbildung von Relationen zwischen den Elementen des Fabriksystems und damit des strukturalen Konzepts der Allgemeinen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.4.1) konzentrieren. Die Visualisierung von Wissen in einem grafischen/virtuellen Fabrikmodell besteht demnach vor allem in der Darstellung von Relationen.

2.4.3 Lösungsansatz und Vorgehensweise

Der prinzipielle Lösungsansatz dieser Arbeit orientiert sich an der Forderung nach einer Darstellung von Elementen und Relationen eines Fabriksystems, weshalb für die Abbildung eine oder ggf. zwei geeignete Modellierungsmethoden gefunden werden müssen. Die Methodenwahl führt letztendlich zu einem hybriden Modellierungsansatz, d.h. der Zusammenführung von zwei, mit unterschiedlichen Modellierungsmethoden erstellten Teilmodellen zu einem Gesamtmodell (vgl. Bild 2-18).²⁴⁸ Dieser Schritt wurde notwendig, da unter den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Methoden keine Methode gefunden wurde, die allein allen im Abschnitt 2.4.2 definierten Anforderungen genügt. Mit den bekannten produktionsorientierten

²⁴⁸ Vgl. Ostermann (2001), S. 10-11 zu hybriden Modellen.

Modellen ist es z.B. nicht möglich, Relationen zwischen Datenobjekten in einem Fabrikssystem willkürlich abzubilden. Auf der anderen Seite bietet die Description Logics eine Wissensrepräsentation auf Basis semantischer Beziehungen, die jedoch kaum Anknüpfungspunkte zu den derzeit vorliegenden Fabrikmodellen aufweist und damit der Forderung nach einer problemlosen Integrierbarkeit nachkommen würde.

Gesamtmodell				
Objektmodell (Teilmodell)			Relationenmodell (Teilmodell)	
Produkt-Modell (Partialmodell)	Prozess-Modell (Partialmodell)	Fabrikelemente-Modell (Partialmodell)		
Modellierungsmethoden (verwendet)	Objektorientierte Modellierung (OOM) Unified Modeling Language (UML)			Description Logics (DL)
Argumente für die Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Abbildung der drei Objekte Produkt, Prozess und Ressourcen möglich - hohe Verbreitung bei der produktionsorientierten Modellierung - Objektorientierung (Vererbung, Attribute, Operationen) führt zu einem hohen Informationsgehalt des Modells 			<ul style="list-style-type: none"> - Relationen zwischen Systemelementen - Wissensrepräsentation (i.e.S.) wird unterstützt

Bild 2-18: Aufbau des Gesamtmodells für die wissensorientierte Fabrikmodellierung

Für das Teilmodell *Objektmodell* wird die Objektorientierte Modellierung (OOM) gewählt, bei der das zentrale Konzept Objekte und ihre Abstraktion zu Klassen sind.²⁴⁹ Für die Wahl dieser Methode ist insbesondere die erprobte Übertragbarkeit der OOM auf die produktionsorientierte Modellierung und ihre Fähigkeit zur Abbildung von Produkten, Prozessen und Ressourcen ausschlaggebend (vgl. Abschnitt 2.2.2). Außerdem existieren bereits Ansätze, welche objektorientierte Modelle für die Abbildung von Planungswissen, insbesondere unter Verwendung der UML (vgl. Abschnitt 2.2.2) einsetzen.²⁵⁰ Die OOM bietet mit den Klassen ein Konzept zur Wiederverwendung von einmal modellierten Objekten und mit den Objekteigenschaften Attribut und Operation zwei Konstrukte zur präzisen Beschreibung von Objektmerkmalen und -funktionen, woraus ein hoher Informationsgehalt des Modells resultiert. Zur besseren Handhabbarkeit wird das *Objektmodell* in die drei Partialmodelle *Produktelemente-Modell (PE-Modell)*, *Fabrikprozess-Modell (FP-Modell)* und *Fabrikelemente-Modell (FE-Modell)* zerlegt.²⁵¹

Das *Relationenmodell* wird mit der Beschreibungssprache Description Logics (DL) erzeugt. Um die willkürliche Abbildung von Relationen zwischen Systemelementen zu realisieren, wäre zunächst eine semi-formale Wissensrepräsentation, z.B. auf Basis von semantischen Netzen (vgl. Abschnitt 2.3.1) ausreichend.²⁵² Für diese Arbeit wird die Description Logics als

²⁴⁹ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 32.

²⁵⁰ Vgl. z.B. Meierlohr (2003), S. 99.

²⁵¹ Vgl. die Verwendung von Partialmodellen bei Schmidt (2002), S. 61-62.

²⁵² Vgl. z.B. die Verwendung von semantischen Beziehungen für das Wissensmanagement in Produktentwick-

weiterentwickelte formalisierte Alternative zur Abbildung semantischer Beziehungen verwendet, da sie als Wissensrepräsentation (i.e.S) zusätzlich Schlussprozesse erlaubt.²⁵³ Von Vorteil ist auch, dass für die Description Logic Sprachen und Werkzeuge zu ihrer informationstechnischen Implementierung existieren.²⁵⁴

Der Lösungsansatz und die Inhalte dieser Arbeit sind in Bild 2-19 zusammenfassend in einem Schalenmodell dargestellt. Die innere Schale bildet die Syntax und Semantik des hybriden Modellierungsansatzes, die zum einen konform zur UML und zum anderen konform zur DL ist. Die mittlere Schale beschreibt mit dem allgemeinen Modellaufbau und den Modellelementen das Modellschema, welches für eine systematische und wissensorientierte Abbildung von Fabriken mit der Syntax und Semantik der inneren Schale genutzt werden kann. Mit dem Modellschema lassen sich beliebige Teilsysteme von Fabriken abbilden. Diese konkreten Schema-Ausprägungen werden der äußeren Schale zugeordnet.

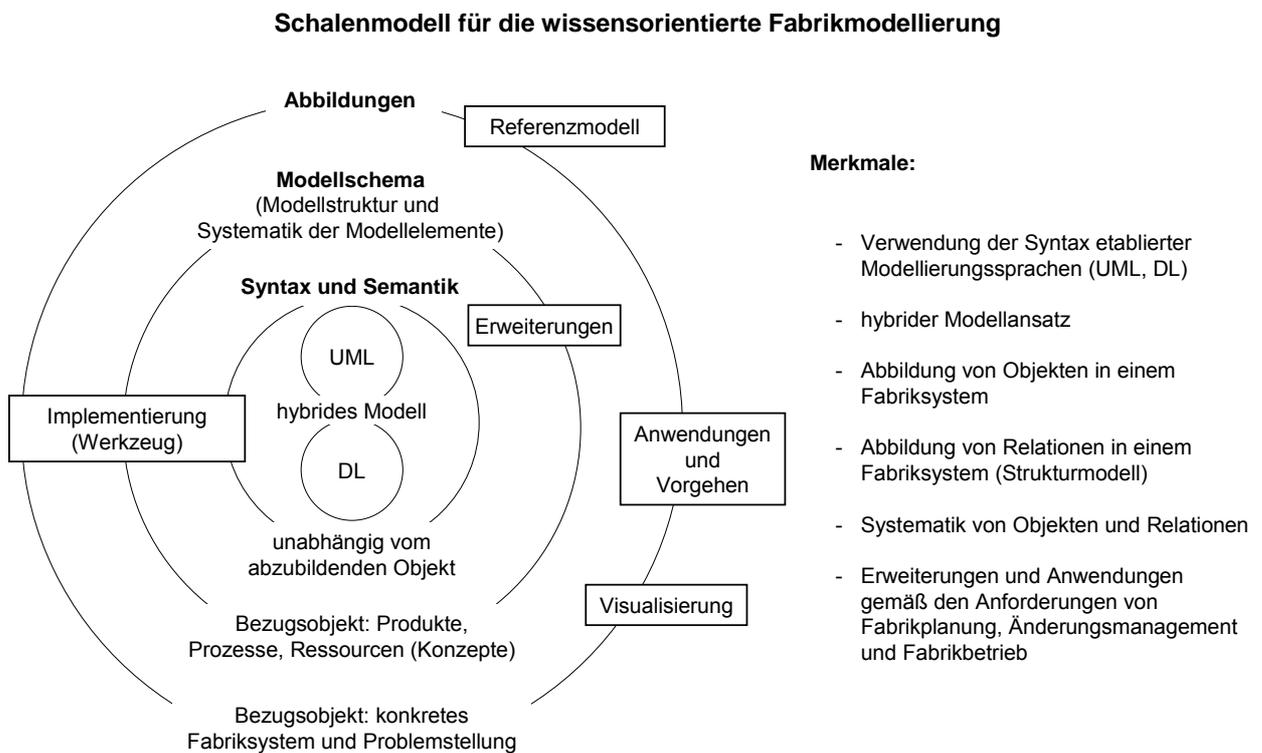


Bild 2-19: Lösungsansatz und Inhalte der Arbeit

In Bild 2-19 sind auf den Schalen weitere zu dieser Arbeit gehörende Inhalte angeordnet. Die Referenzmodellierung, Anwendungen und Vorgehen bei der wissensorientierten Fabrikmodellierung sowie die Visualisierung von Wissen beziehen sich auf die äußere Abbildungsscha-

lungsprozessen bei Weber et al. (2004), S. 6 oder von einfachen Beziehungen bei Fleischer et al. (2006), S. 414 für die Darstellung von Wirkungszusammenhängen bei der Qualitätsprognose.

²⁵³ Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 2-3 zur Entwicklung der Description Logics.

²⁵⁴ Vgl. May (2006), S. 498-500.

le. Mit den Erweiterungen werden zusätzliche Modellstrukturen und Modellelemente für die wissensorientierte Fabrikmodellierung eingeführt, welche deshalb auf der mittleren Modellschale angeordnet sind. Die Implementierung des Modells erfolgt mittels eines Werkzeuges, das Aspekte aller drei Schalen enthält. Alle im Bild dargestellten Inhalte bilden zusammengefasst das Instrumentarium für die wissensorientierte Fabrikmodellierung.

Bei einer näheren Analyse des Instrumentariums lassen sich Analogien zu ganzheitlichen Planungsinstrumenten für die Unternehmensmodellierung feststellen, bei denen z.B. mit einer Verflechtung von Modellarchitektur, Referenzmodell und Vorgehensmodell der wirtschaftliche und systematische Entwurf von Unternehmensmodellen angestrebt wird.²⁵⁵ Übertragen auf die wissensorientierte Fabrikmodellierung entspricht das Schalenmodell dem Architekturmodell, Anwendungen und Vorgehensbeschreibungen dem Vorgehensmodell und das Referenzmodell entsprechend dem Referenzmodell ganzheitlicher Planungsinstrumente.

Bei dem hybriden Gesamtmodell handelt es sich um ein präskriptiv und deskriptiv verwendetes Beschreibungsmodell (vgl. Bild 2-12), bei dem empirisch beobachtbare Tatsachen im Modell festgehalten werden. Zusätzlich enthält es Ansätze zur Wissensrepräsentation (i.w.S.) als auch zur Wissensrepräsentation (i.e.S.), wodurch die Schlussfolgerung von neuen Tatsachen aus bestehenden Tatsachen möglich wird. Das Gesamtmodell hat dabei jedoch nicht die Merkmale von klassischen generativen Modellen, mit denen z.B. Algorithmen und Optimierungsverfahren ausgeführt und zeitlich veränderbare Zustände simuliert werden können.

²⁵⁵ Vgl. zu den ganzheitlichen Planungsinstrumenten Fischer (1995), S. 44-49 und Keller (2000), S. 38-41.

3 Abbildung der Systemelemente mit dem Objektmodell

Das *Objektmodell* ist eines der beiden Teilmodelle zur wissensorientierten Fabrikmodellierung. Mit ihm werden die Planungsobjekte Produkt, Prozess und Ressource und die zugehörigen Produkt-Prozess-Ressourcen-Verknüpfungen abgebildet. Hierbei handelt es sich zunächst um typische Abbildungsinhalte digitaler Fabrikplanungswerkzeuge zur Prozessplanung und Ablaufsimulation.²⁵⁶ Das *Objektmodell* besteht aus drei Partialmodellen, bei welchen aufgrund der Besonderheiten des wissensorientierten Modellierungsansatzes eine Erweiterung und Anpassung der herkömmlichen produktionsorientierten Modellen stattgefunden hat. Ein Beispiel ist, dass sich mit dem Partialmodell *FE-Modell* nicht nur die direkten Ressourcen eines Prozesses, sondern eine Vielzahl physischer und nicht-physischer Objekte eines Fabrik-systems abbilden lassen. Im Abschnitt 3.1 wird zunächst die Syntax und Semantik beschrieben, in der die Abbildung der Elemente des Gesamtsystems mit dem *Objektmodell* vorgenommen wird. In den Abschnitten 3.2 bis 3.4 erfolgt die Entwicklung des Aufbaus der drei Partialmodelle und damit des Schemas des *Objektmodells*. Um die oben genannten Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen abbilden zu können, findet im Abschnitt 3.5 eine integrierte Betrachtung der Partialmodelle statt. Im Abschnitt 3.6 wird letztendlich aufgezeigt, wie das entwickelte Schema zur Abbildung von Systemelementen und objektbezogenen Informationen genutzt werden kann.

3.1 Aufbau des Objektmodells

Das Gesamtsystem wird aus einzelnen Elementen sowie ihren Beziehungen gebildet (vgl. Abschnitt 2.1.1). Nach dem Verständnis der Allgemeinen Systemtheorie können diese Elemente physischer aber auch nicht-physischer Art sein. Das in dieser Arbeit abgebildete Gesamtsystem besteht aus den drei Subsystemen Produkt-, Prozess- und Fabrik-System (vgl. Bild 3-1).²⁵⁷ Die Elemente dieser Subsysteme werden mit den drei Partialmodellen *FE-Modell*, *FP-Modell* und *PE-Modell* abgebildet. Der vielfach in produktionsorientierten Modellen vorhandene Arbeitsauftrag wird im hier vorliegenden wissensorientierten Modell nicht berücksichtigt, da er für die Aufgabe der auftragsunabhängigen Wissensrepräsentation nicht relevant ist.²⁵⁸ In Beziehung stehende Systemelemente, die zu unterschiedlichen Subsystemen gehören, bilden wie im Bild 3-1 dargestellt jeweils eigene Teilsysteme.

²⁵⁶ Vgl. Zäh et al. (2005b), S. 178.

²⁵⁷ Der Interpretation von Produkten und Prozessen als System steht in der Literatur oftmals ein anderes Verständnis gegenüber. Bei Näser; Ackermann (2003), S. 434 werden bspw. die Betrachtungsebenen Produkt/Dienstleistung, Prozess und System unterschieden, wobei das System im dort vorliegenden kompetenzzellenbasierten Produktionssystemmodell durch das System der Produktionsinfrastruktur und seine Subsysteme Ressourcen und Produktionsstätten gebildet wird.

²⁵⁸ Vgl. für die Abbildung von Arbeitsaufträgen z.B. Deuse et al. (2006), S. 66-68.

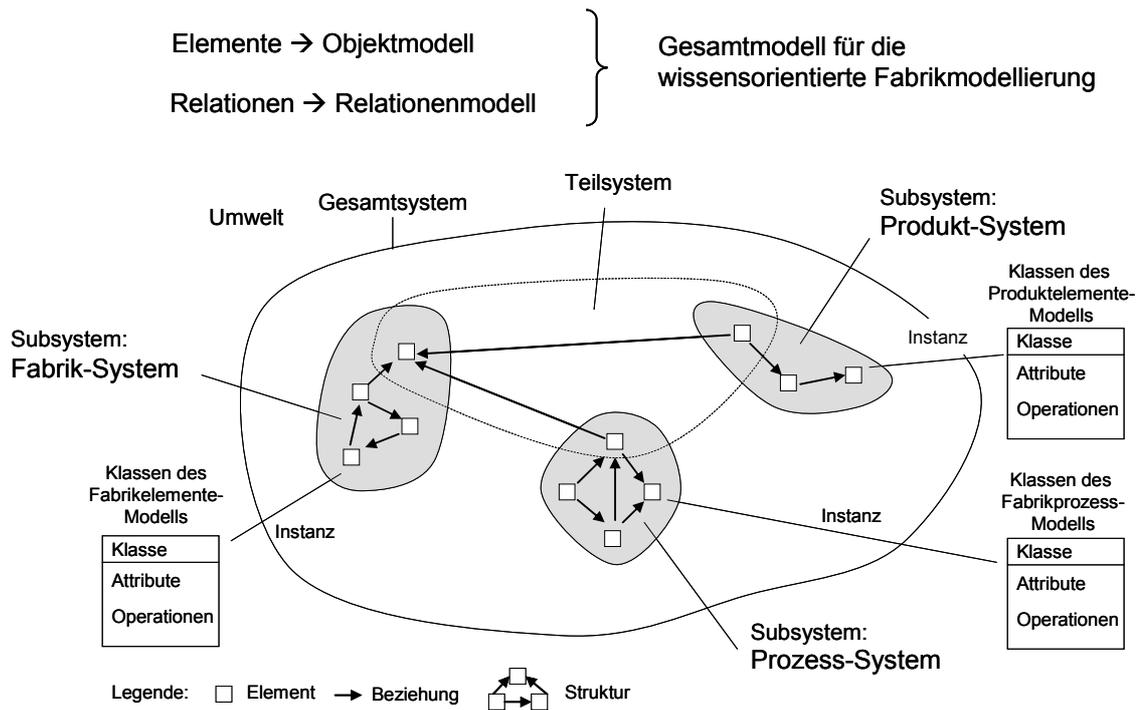


Bild 3-1: Abbildung der Systemelemente mit Klassenbeschreibungen²⁵⁹

Die Elemente des Gesamtsystems werden im Unternehmen z.B. durch

- die Fabrikplanung,
- die Prozessplanung,
- oder die Produktentwicklung

definiert. Jedes dieser Elemente wird im *Objektmodell* durch ein Objekt, das die Instanz einer Klasse ist, repräsentiert.²⁶⁰ Eine Klasse stellt wiederum einen Typ dar, der durch die Summe aller Eigenschaften einer Klasse beschrieben wird. Ob ein Objekt die Ausprägung einer Klasse ist, hängt somit von den Eigenschaften des Objektes ab.²⁶¹ Im Rahmen der Generalisierung wird aus mehreren speziellen Klassen eine allgemeine Klasse abgeleitet. Die allgemeine Klasse besitzt die Gemeinsamkeiten der Ausgangsklassen, jedoch nicht die Unterschiede.²⁶² Weiterhin können abstrakte Klassen unterschieden werden, die nicht konkret genug sind, um eigene Instanzen zu besitzen. Erst von den Unterklassen der abstrakten Klassen können Instanzen erstellt werden.²⁶³

²⁵⁹ Vgl. Wiendahl (1997), S. 9. für die Systemdarstellung. Elemente, die in Beziehung stehen und keine Subsysteme niedriger Ordnung bilden, werden als Teilsysteme bezeichnet.

²⁶⁰ Vgl. die Vorgehensweise bei Milberg et al. (1991), S. 5.

²⁶¹ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 32.

²⁶² Vgl. Burkhardt (1999), S. 30.

²⁶³ Vgl. Burkhardt (1999), S. 37.

Klassen besitzen Attribute, die für spezifische Objekte mit konkreten Wertausprägungen belegt werden. Die Struktur eines Systems wird durch die Beziehungen zwischen Klassen auf der „Makroebene“ definiert. Die innerhalb von einzelnen Klassen definierten Attribute erlauben hingegen eine „Mikrosicht“ auf die modellierten Objekte.²⁶⁴ Bei der objektorientierten Modellierung besteht weiterhin die Möglichkeit, einzelnen Klassen Operationen zuzuordnen. Diese Operationen können Attributwerte desselben Objektes oder anderer zugänglicher Objekte ändern. In diesem Fall spricht man von Operationen auf Objekten. Operationen sind somit Abfolgen von Prozessen, die den Zustand von Objekten ändern.²⁶⁵ Die Verarbeitungsspezifikation für eine Operation wird als Methode bezeichnet.²⁶⁶

Als Modellierungsmethode für die Abbildung der Klassen werden im Folgenden Klassendiagramme der UML verwendet.²⁶⁷ Mit diesen lassen sich neben Generalisierungsbeziehungen weitere Assoziationen zwischen Klassen, wie die Aggregation und Komposition ausdrücken.²⁶⁸

3.2 Partialmodell der Fabrikelemente

Fabrikelemente (FE) werden durch die Fabrikplanung und das Änderungsmanagement gestaltet und bilden das Umfeld und die Ressourcen für die in der Fabrik stattfindenden und die Anforderungen an das Fabrikssystem determinierenden Prozesse. Im Abschnitt 3.2.1 werden *Fabrikelemente* zunächst definiert und dann in eine systematische Ordnung überführt. Gemäß dem im Abschnitt 3.1 dargestellten objektorientierten Ansatz zur Abbildung von Systemelementen können *Fabrikelementen* Attribute und Operationen zugewiesen werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Das UML-Klassendiagramm im Abschnitt 3.2.3 stellt das *FE-Modell* schließlich schematisch dar.

3.2.1 Definition und Systematik von Fabrikelementen

Die *Fabrikelemente* bilden den Teil der Elementmenge des Gesamtsystems, die zum eigentlichen Fabrikssystem gehören. Sie werden im *FE-Modell* abgebildet. Bevor auf den Aufbau dieses Partialmodells eingegangen wird, soll zunächst der Begriff *Fabrikelement* definiert werden.²⁶⁹

Unter einem Fabrikelement (FE) wird ein für Fabrikplanung, Änderungsmanagement oder Fabrikbetrieb relevantes physisches oder nicht-physisches Element des Fabriksystems verstanden, welches soweit detailliert ist, dass es eindeutig einem der drei Gestal-

²⁶⁴ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 34-35.

²⁶⁵ Vgl. Martin; Odell (1999), S. 195 und S. 214-215 sowie Jeckle et al. (2004), S. 56-57.

²⁶⁶ Vgl. Martin; Odell (1999), S. 214-215.

²⁶⁷ Die UML 2.0 stellt neben den Klassendiagrammen eine Vielzahl weiterer Diagrammartentypen zur Verfügung. Hierzu gehören z.B. Objektdiagramme, Use-Case-Diagramme oder Sequenzdiagramme.

²⁶⁸ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 76-89.

²⁶⁹ In Anlehnung an Nofen et. al. (2005), S. 18-19 sowie Nofen et. al. (2003), S. 238-239.

tungsbereiche - Betriebsmittel, Raum und Gebäudetechnik oder Organisation - zugeordnet werden kann. Ein Fabrikelement lässt sich in weitere Fabrikelemente zerlegen.

Nach der gegebenen Definition können *Fabrikelemente* auch Elemente sein, die nicht durch die Fabrikplanung oder das Änderungsmanagement gestaltet werden, jedoch für diese relevant sind. Hierzu zählen z.B. *Fabrikelemente*, welche durch die Prozess- und Technologieplanung oder die gestalterischen Gebäudeplanung vorbestimmt werden und somit Rahmenbedingungen und Restriktionen für die nachfolgenden Gestaltungsaktivitäten bilden. Der Begriff der *Fabrikelemente* ist weitergefasst, als z.B. der klassische Ressourcenbegriff des Industrial Engineering.²⁷⁰ Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Produkte, die typische Inputs und Outputs eines Fabriksystems sind, werden allerdings genauso wenig zu den „gestaltbaren“ *Fabrikelementen* gezählt wie der einzelne Mensch. Seine Anforderungen an die Arbeitsumgebung werden in der Fabrikplanung jedoch durch die entsprechende Wahl und Gestaltung der für ihn relevanten *Fabrikelemente* berücksichtigt.²⁷¹ Somit lassen sich indirekt auch arbeitswissenschaftliche Aspekte mit dem *FE-Modell* erfassen.²⁷²

Mit der Definition wird ein Detailgrad für ein *Fabrikelement* gefordert, der die Zuordnung zu einem der drei Gestaltungsbereiche der Fabrik – Betriebsmittel, Raum und Gebäudetechnik oder Organisation – ermöglicht (vgl. Tabelle 3-1). Zum Gestaltungsbereich Betriebsmittel gehören physische *Fabrikelemente* in Form von Maschinen, Anlagen, Werkzeugen und sonstigen Ausrüstungen. Der Gestaltungsbereich Raum und Gebäudetechnik umfasst alle physischen *Fabrikelemente*, die nicht zum Gestaltungsbereich Betriebsmittel gehören und dem Gestaltungsbereich Organisation werden alle nicht-physischen *Fabrikelemente* zugeordnet, die Elemente und Strukturen der Aufbau- oder Ablauforganisation repräsentieren.²⁷³

physisch		nicht-physisch
Betriebsmittel	Raum und Gebäudetechnik	Organisation
Maschine	Tragwerk	Schichtmodell
Krananlage	Gebäudehülle	Schichtleiter
Lagerregal	Grundstück	Steuerungsprinzip
Transportmittel	Fertigungsfläche	Flächenstruktur
Messmittel	Sozialraum	Materialflusstruktur
Werkzeug	Energieversorgungsanlage	Informationsflusstruktur
...

Tabelle 3-1: Einteilung der Fabrikelemente nach Gestaltungsbereichen

²⁷⁰ Vgl. Deuse et al. (2006), S. 66-67 zum Industrial Engineering.

²⁷¹ Vgl. Nofen et. al. (2005), S. 19 für die Rolle der Mitarbeiter im Unternehmen.

²⁷² Vgl. Spieker (2006), S. 171 für die Abgrenzung zur Arbeitswissenschaft.

²⁷³ Die Ablauforganisation veranschaulicht die logische Aufeinanderfolge von Prozessen, die zur Erfüllung einer Gesamtaufgabe führen. Durch die Aufbauorganisation werden die Zusammenhänge zwischen Elementen definiert, ohne dass daraus ein zeitlicher Bezug abgeleitet werden kann. Vgl. REFA (1991), S. 96.

Die Zuordnung zu den Gestaltungsbereichen bildet die Grenze für eine weitergehende Abstraktion der *Fabrikelemente*, wie sie z.B. mit den Fabrikebenen erfolgt, bei denen technische, räumliche und organisatorische Teilelemente in einem Element zusammengefasst werden.²⁷⁴

Der Nutzen dieser Einschränkung liegt in einer erzwungenen Spezifizierung von *Fabrikelementen*, welche eine Klassifizierung zulässt.²⁷⁵

Die Vielzahl der unterschiedlichen Elemente in einem Fabrikssystem erfordert eine weitergehende Systematisierung der *Fabrikelemente*. Das *FE-Modell* beinhaltet deshalb insgesamt drei systematisierende Kriterien:

- Zuordnung zu einem Gestaltungsbereich (vgl. Tabelle 3-2)
- Einordnung in eine hyponomische Ordnung
- Zuordnung zu einer Fabrikebene

Die hyponomische Ordnung ist eine Subklassenbeziehung zwischen *Fabrikelementen*, wobei *Fabrikelemente* 1. Ordnung, 2. Ordnung und 3. Ordnung unterschieden werden sollen.²⁷⁶ Von den *Fabrikelementen* der 3. Ordnung können Instanzen zur Abbildung konkreter Objekte der Fabrik erzeugt werden. Sie sollen deshalb auch als *Basis-FE* bezeichnet werden.

Im Rahmen der Abbildung eines konkreten Fabriksystems werden Instanzen der Fabrikebenen Arbeitsplatz, Bereich, Fabrik oder Werk (vgl. Abschnitt 2.1.1) erzeugt. Diesen können *Basis-FE* zugewiesen werden, wodurch auch eine räumliche Zuordnung physischer und nicht-physischer *Fabrikelemente* in einem Fabrikssystem vorgenommen wird.

Gestaltungsbereich	FE 1. Ordnung	FE 2. Ordnung	Basis-FE 3. Ordnung	Ebenen-zuordnung
Betriebsmittel	Produktionsmittel	Fertigungsmaschinen	Drehmaschine Dreh-Fräs-Zentrum	z.B. Arbeitsplatz XYZ
	Logistikmittel	flurgebunden	Gabelstapler Handwagen	z.B. Fabrik XYZ

Tabelle 3-2: Systematik der Fabrikelemente

²⁷⁴ Bei Harms (2004), S. 12 findet sich z.B. eine Definition, welche die Arbeitsstation als kleinstes Element im Fabrikssystem aufweist. In diesem werden Betriebsmittel, Mitarbeiter und die Arbeitsfläche zu einer Einheit zusammengefasst.

²⁷⁵ Für die Systematisierung finden sich in der Literatur auch weitere Kriterien, wie bspw. die periphere Nähe zum Produktionshauptprozess. Vgl. Wirth (1989), S. 24-25. Hier werden Anlagen und Flusssysteme in drei Peripheriestufen gemäß ihrer Nähe zu den Hauptprozessen Teilefertigung und Montage eingeteilt.

²⁷⁶ Vgl. Hernández (2003), S. 66 bei dem die 1. und 2. Ordnung für Wandlungsobjekte eingeführt wird oder Meier; Homuth (2005), S. 20, die Objekte auf den Systemebenen einer Fabrik, ebenfalls in 1. und 2. Ordnung klassifizieren.

In Tabelle 3-2 wird die Systematik der *Fabrikelemente* in einer Matrix mit beispielhaften Einträgen für den Gestaltungsbereich Betriebsmittel dargestellt.²⁷⁷ Mit der Systematik wird eine Klassifizierung von *Fabrikelementen* vorgenommen, welche für die Verwaltung in Klassenbibliotheken genutzt werden kann.

Die *Fabrikelemente* können weiterhin unterschiedlichen Planungsfeldern zugeordnet werden, zwischen denen ein Netzwerk von Beziehungen besteht. Dieses Netzwerk ergibt sich aus Input-Informationen, die für ein bestimmtes Planungsfeld notwendig sind und durch ein anderes Planungsfeld generiert werden. Planungsfelder sind z.B. die Standort-, Generalbebauungs-, Fertigungs-, Struktur-, Bautechnik-, Einrichtungs- und Energieversorgungsplanung.²⁷⁸ Auch die drei Gestaltungsfelder können als Planungsfelder interpretiert werden.

Die Generierung und Gestaltung der *Fabrikelemente* für eine konkrete Fabrik erfolgt in den einzelnen Phasen des Fabrikplanungsprozesses (vgl. Abschnitt 2.1.2) bzw. im Rahmen des Änderungsmanagements (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die exakte Ausprägung eines *Fabrikelements* wird gewöhnlich in der Detailplanungsphase bestimmt. Im Vorfeld findet, insbesondere im Verlauf der Generalbebauungs- und Strukturplanung, die Bestimmung der Ebeneninstanzen statt, denen dann konkrete *Fabrikelemente* zugeordnet werden können (vgl. Bild 3-2). Bei einer Planung von „innen nach außen“ werden die Fabrikstrukturen auch von den Planungsergebnissen für die untergeordneten Fabrikebenen beeinflusst.

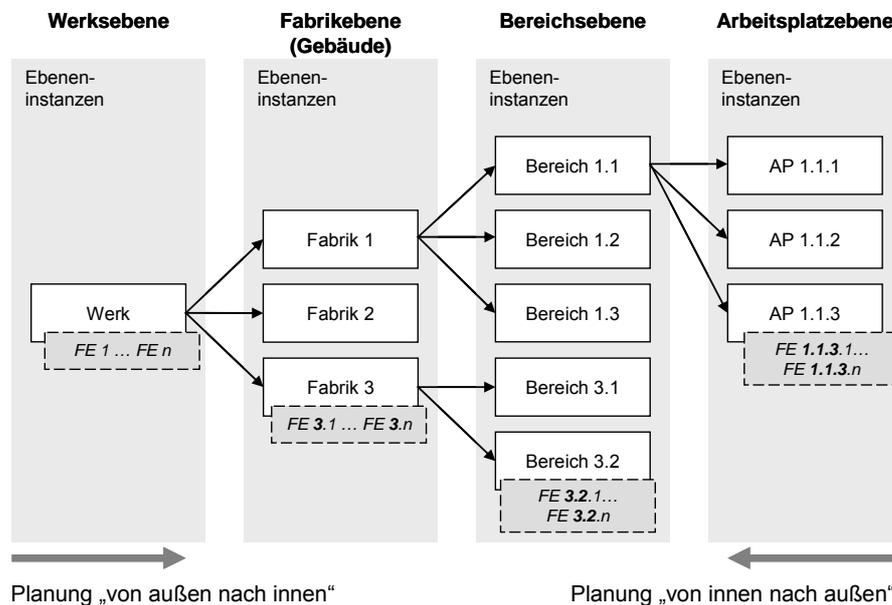


Bild 3-2: Ebeneninstanzen und zugeordnete Fabrikelemente im FE-Modell

Mit den *Basis-FE* werden Planungseinheiten für die modellgestützte Fabrikplanung vorgegeben, die - sofern die Abbildung mit dem *FE-Modell* erfolgt - eine Transformation der i.d.R.

²⁷⁷ In Anlehnung an Nofen et. al. (2005), S. 20.

²⁷⁸ Vgl. Felix (1998), S. 68.

vorliegenden nicht-modellgestützten Planungsergebnisse erforderlich macht.²⁷⁹ Die Planungsergebnisse müssen dementsprechend mit dem vorgegebenen Schema des *FE-Modells* ausgedrückt werden.

3.2.2 Attribute und Operationen von Fabrikelementen

Zur Eigenschaftsbeschreibung von *Fabrikelementen* können im *FE-Modell* Attribute und Operationen angegeben werden (vgl. Abschnitt 3.1). Analog zum objektorientierten Ansatz vererben sich diese nacheinander von den *Fabrikelementen* der ersten Ordnung bis auf die *Fabrikelemente* der dritten Ordnung.

Die Angabe von Attributausprägungen kann quantitativ oder qualitativ erfolgen. Dem *Fabrikelement* „Fertigungsmaschine“ könnten z.B. die quantitativen Attribute Länge, Breite, Höhe, Gewicht und Stromverbrauch und dem *Fabrikelement* „Drehmaschine“, das als Subklasse der Klasse „Fertigungsmaschine“ abgebildet wird, zusätzlich das spezifische Attribut „max. Drehzahl“ zugewiesen werden. Zwei Beispiele für Attribute mit qualitativen Ausprägungen sind die Universalität und die Mobilität einer Fertigungsmaschine.²⁸⁰

In Übereinstimmung mit dem Operationenverständnis der OOM werden im *FE-Modell* zwei Arten von Operationen unterschieden.²⁸¹ Funktionsoperationen beschreiben die Funktionen, die von einem *Fabrikelement* ausgeführt werden, z.B. „Drehen“ oder „Einspannen“. Objektoperationen stehen für die Aktivitäten, die mit dem *Fabrikelement* selbst ausgeführt werden können, z.B. „Versetzen“ oder „Instandhalten“. Während Attribute die Merkmale der *Fabrikelemente* beschreiben, werden mit Operationen funktionale Aspekte ausgedrückt. In Tabelle 3-3 sind die Eigenschaften von *Fabrikelementen* noch einmal zusammenfassend aufgeführt.

Attribute	Operationen
quantitative Attribute	Funktionsoperationen
qualitative Attribute	Objektoperationen

Tabelle 3-3: Eigenschaften von Fabrikelementen

Den *Fabrikelementen* des Gestaltungsbereiches Organisation lassen sich Funktionsoperationen nicht sinnvoll zuweisen, da sie als abstrakte Konzepte selbst keine Funktion besitzen.²⁸²

²⁷⁹ Das Planungsergebnis „Es kommen flurgebundene Logistikmittel zum Einsatz.“ Genügt z.B. nicht zur Abbildung mit dem *FE-Modell*. Dieses Planungsergebnis müsste z.B. mit der Angabe „Das *Basis-FE* Gabelstapler kommt im Bereich Fabrik X zum Einsatz.“ weiter präzisiert werden.

²⁸⁰ In Anlehnung an Hernández (2004), S. 80 bei dem für Wandlungsobjekte verschiedene Wandlungsbefähiger vorgegeben werden.

²⁸¹ Jede Klasse kann wahlfrei Operationen definieren. Die einer Operation zugeordneten Methoden können eine bestimmte Zustandsänderung des Objektes (hier als Objektoperation bezeichnet) oder eine definierte Reaktion (hier als Funktionsoperation bezeichnet) herbeiführen. Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 34. Milberg et al. (1991), S. 5 verwenden für Operationen auch den Begriff prozedurale Attribute.

²⁸² Das *Fabrikelement* „Schichtmodell“ besitzt z.B. als Objekt keine Funktion. Eine Objektoperation ist jedoch z.B. mit „Schichtmodelländerung“ denkbar.

3.2.3 UML-Klassendiagramm

In Bild 3-3 wird das Klassendiagramm für das *FE-Modell* abgebildet. Die *Fabrikelemente* der ersten Ordnung werden bereits einem Gestaltungsbereich zugeordnet, der dementsprechend für die abgeleiteten Klassen gilt. *Ein Basis-FE* gehört jeweils zu einer Fabrikebene. Instanzen können von den hervorgehobenen Klassen erzeugt werden.

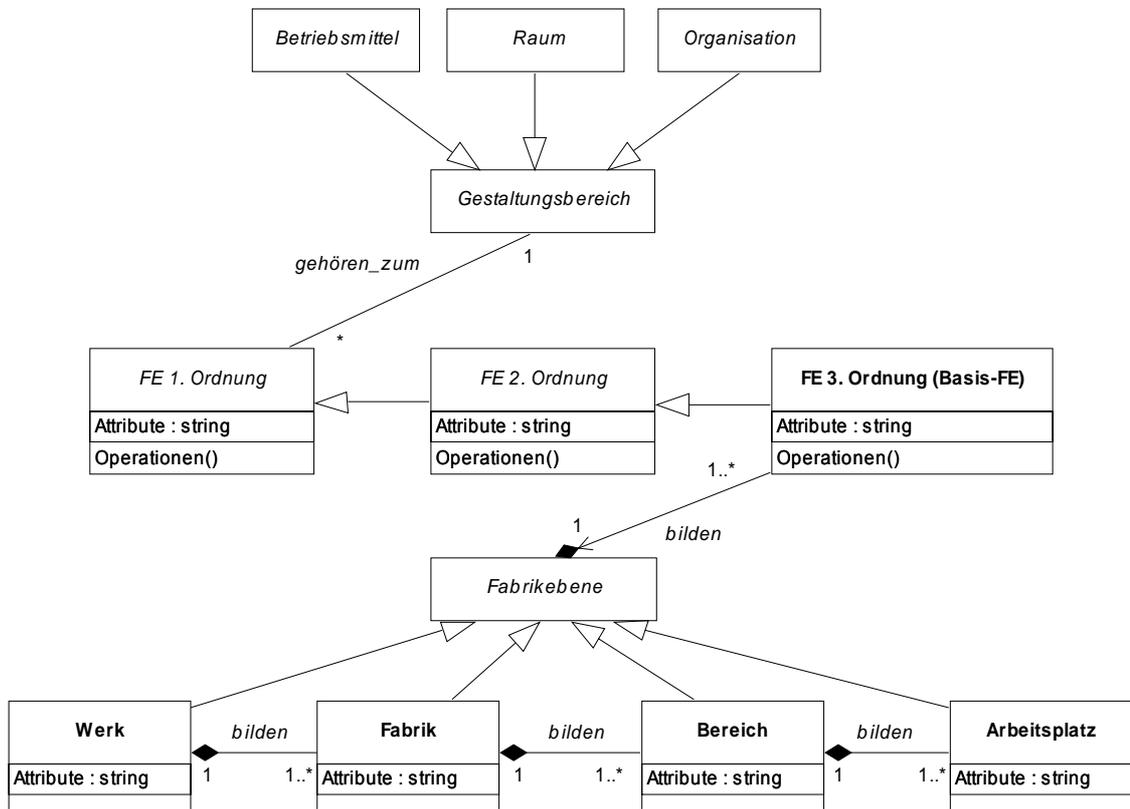


Bild 3-3: UML-Klassendiagramm für das FE-Modell

In dem UML-Diagramm ist die Ordnungsstruktur für *FE-Klassen* abgebildet. Spezifische *FE-Klassen* würden über eine Generalisierungsbeziehung in das Modell aufgenommen werden.

3.3 Partialmodell der Fabrikprozesse

Prozesse besitzen für die wissensorientierte Fabrikmodellierung eine besondere Bedeutung, da sie als strukturbildendes Konzept für Wissen und Informationen über ein Fabrikssystem eingesetzt werden sollen. Aufgrund des besonderen Verwendungskontextes des Prozess-Konzeptes liegt dem *Fabrikprozess-Modell (FP-Modell)* mit dem *Fabrikprozess (FP)* eine eigene Definition des Prozessbegriffs zugrunde. Bevor die Definition von *Fabrikprozessen* im Abschnitt 3.3.2 erfolgt, wird im Abschnitt 3.3.1 zunächst auf die Grundlagen der Prozessbetrachtung eingegangen. Eine Beschreibung von Modellierungsmöglichkeiten mit Prozessket-

tenelementen, Prozessketten und Prozessgruppen erfolgt im Abschnitt 3.3.3. Diese drei Modellelemente werden für einen systematischen und hierarchischen Aufbau des *FP-Modells* genutzt (vgl. Abschnitt 3.3.6). Die Zuweisung von Attributen und Operationen zu *Fabrikprozessen* (vgl. Abschnitte 3.3.4 und 3.3.5) sowie die Abbildung des *FP-Modells* mit einem UML-Klassendiagramm (vgl. Abschnitt 3.3.7) erfolgen analog zur Vorgehensweise bei dem *FE-Modell* (vgl. Abschnitt 3.2).

3.3.1 Grundlagen der Prozessbetrachtung

Das Prozesskonzept bildet ein theoretisches Konstrukt für die Modellierung der Leistungserbringung eines Unternehmens. Ein Prozess kann aus einer Menge von Teilprozessen bestehen, für die eine temporale bzw. kausale Ordnung festgelegt ist. Diese Eigenschaft ergibt sich aus der rekursiven Begriffsfestlegung in der Prozessdefinition (vgl. Abschnitt 2.2.3) die entsteht, wenn Aktivitäten als Synonyme für Prozesse interpretiert werden. Eine Dekomposition oder Komposition von Prozessen kann im Prinzip solange durchgeführt werden, bis eine Differenzierung bzw. Abstrahierung für eine Anwendung obsolet erscheint. Gewöhnlich ist ein Strukturierungsgrad zwischen vier und sechs Abstraktionsebenen ausreichend, um die Unternehmensprozesse detailliert genug abzubilden.²⁸³

Die logische Aufeinanderfolge von Teilprozessen bildet eine Ablaufstruktur, die der Erfüllung einer Gesamtaufgabe dient.²⁸⁴ Die prinzipiell möglichen Beziehungen zwischen Teilprozessen können durch sieben Grundformen für Ablaufstrukturen beschrieben werden. Hierzu gehören z.B. Strukturen mit Und- bzw. Oder-Verzweigungen. Weiterhin lassen sich die auf einer Abstraktionsebene beschriebenen Einzelprozesse in Prozessabschnitte strukturieren.²⁸⁵

Für Fertigungsprozesse ergeben sich die Ablaufstrukturen aus technischen und organisatorischen Vorgaben.²⁸⁶ Die technischen Abläufe werden z.B. durch die Vergenz des Objektflusses, die sich aus der notwendigen Kombination von Werkstoffen zur Herstellung eines materiellen Gutes ableiten lässt, bestimmt. Ablaufstrukturen sind deshalb produktspezifisch, sofern für mehrere Produkte nicht identische Operationenfolgen, d.h. die gleiche Art und Reihenfolge der Verrichtungen vorliegen.²⁸⁷ Die organisatorischen Vorgaben ergeben sich z.B. aus der Ablauforganisation, die im Rahmen der Fabrikplanung festgelegt wird.

Die in der Literatur beschriebenen Prozesse reichen von stark abstrahierten Geschäftsprozessen bis hin zu technologischen Verfahrensketten in der Fertigung. Erstere bilden den Untersu-

²⁸³ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S.45 und S. 84-87 und Ulrich; van Laak (2003), S. 35-37 und S. 45.

²⁸⁴ Vgl. REFA (1991), S. 90. Hier wird der Begriff Ablauf als Synonym für den Prozessbegriff verwendet.

²⁸⁵ Vgl. REFA (1991), S. 91-94. Die sieben Grundformen sind einfache Strukturen ohne Verzweigung, Strukturen mit Und- bzw. Oder-Verzweigung, Strukturen mit Zusammenführung nach Und- bzw. Oder-Verzweigungen und Strukturen mit Und- bzw. Oder-Rückführung.

²⁸⁶ Vgl. Arnold (2003), S. 1.

²⁸⁷ Vgl. Küpper et al. (1995), S. 13-14 und S. 16 zur Übereinstimmung von Operationsfolgen und Strukturmerkmalen von Vorgängen.

chungsgegenstand für das Geschäftsprozessmanagement während Letztere, ergänzt um logistische Prozesse, den Fertigungsprozess für ein materielles Gut beschreiben.²⁸⁸

Die Abgrenzung zwischen Geschäftsprozessen und „sonstigen“ Prozessen im Unternehmen erfolgt nicht immer eindeutig. Oftmals sprechen Autoren von Geschäftsprozessen, wenn sie diese als Instrument für die Prozessoptimierung und -standardisierung funktionsübergreifender Abläufe in Unternehmen verwenden. Nach Gausemeier und Fink handelt es sich bei Geschäftsprozessen bspw. um funktionsübergreifende Verkettungen wertschöpfender und gerichteter Aktivitäten, die zu einer vom Kunden erwarteten Leistung führen. Geschäftsprozesse werden oftmals mit weiteren Angaben, wie Kundenanforderungen, verantwortlichen Mitarbeitern oder Ziel- und Messgrößen versehen.²⁸⁹ Die Geschäftsprozesse stellen in ihrer Gesamtheit den Wertschöpfungsprozess des Unternehmens dar, der alle unternehmerischen Aktivitäten zur Lösung eines Kundenproblems beinhaltet.²⁹⁰

Geschäftsprozesse können in primäre Prozesse, z.B. dem Produktentwicklungs- oder Auftragsabwicklungsprozess und sekundäre Prozesse, z.B. dem Personalmanagement- oder IT-Prozess unterteilt werden.²⁹¹ Die primären Prozesse bilden den eigentlichen arbeitsteiligen industriellen Produktionsprozess, durch den mit seinen direkt auf das Produkt bezogenen Aktivitäten die Wertschöpfung erbracht wird. Sekundäre Prozesse sind Unterstützungsprozesse, die vorbereitend oder ergänzend zu den direkten Prozessen durchgeführt werden müssen.²⁹² Fertigungsprozesse lassen sich bspw. dem Auftragsabwicklungsprozess und seinem Teilprozess „Make“ zuordnen.²⁹³

Prozesse können weiterhin in operative Prozesse, die unmittelbare Aktivitäten am herzustellenden Produkt einschließen sowie dispositive Prozesse, welche die zur Ausführung operativer Prozesse notwendigen planenden und steuernden Aktivitäten umfassen, unterschieden werden.²⁹⁴

Für die Modellierung von Prozessen steht eine Vielzahl von Konstrukten zur Verfügung. Drei Beispiele hierfür sind Prozesstypen, Beziehungen und Ereignisse:

- *Prozesstypen*: Prozesse können Prozesstypen zugeordnet werden, die eine Abstraktion über die Menge seiner möglichen Instanzen darstellen. Der Prozesstyp beschreibt so-

²⁸⁸ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 54 und S. 56 sowie Wirth (1989), S. 26-35. Logistikprozesse können in materialflussorientierte und informationsflussorientierte Prozesse untergliedert werden.

²⁸⁹ Vgl. Gausemeier; Fink (1999), S. 324-326 und Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 46-47.

²⁹⁰ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 54. Wertschöpfung ist die Differenz zwischen dem Marktpreis für das hergestellte Produkt und den durch Kauf erworbenen Rohstoffen, Zulieferungen und Leistungen. Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 48.

²⁹¹ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 132-156.

²⁹² Vgl. Binner (1997), S. 1-12 und Schenk; Wirth (2004), S. 49.

²⁹³ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 145 zur Unterteilung des Auftragsabwicklungsprozesses in die Teilprozesse Plan, Source, Make und Deliver.

²⁹⁴ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 46-47.

mit Eigenschaften, die für seine Instanzen gelten müssen.²⁹⁵

- *Beziehungen*: Zwischen Prozessen können Beziehungen ausgedrückt werden. Die Aggregationsbeziehung zeigt bspw. an, dass ein Prozess aus anderen Prozessen zusammengesetzt ist, wobei von der Reihenfolge der Teilprozesse abstrahiert wird. Die „benutzt“-Beziehung weist darauf hin, dass ein Prozess einen anderen Prozess zur Ausführung benötigt.²⁹⁶
- *Ereignisse*: Einem Prozess können Ereignisse zugeordnet werden, welche Bedingungen für sein Auslösen sind. Ein Prozess erzeugt selbst Ereignisse, z.B. wenn der definierte Output erzeugt ist oder die Ausführung unterbrochen wird. Ein Ereignis ist das Eintreten eines Zustandes, der für die Durchführung eines Prozesses von Bedeutung ist.²⁹⁷ Eine alternative Sichtweise ist diejenige, dass Prozesse selbst als Sequenz von Ereignissen bzw. Zustandsänderungen interpretiert werden.²⁹⁸

Im Rahmen der Prozessplanung und Prozessanalyse werden Angaben über die zeitliche Dauer, Ressourcen, Kosten oder die Ausführung von Prozessen verarbeitet.²⁹⁹ Die Prozessplanung beinhaltet neben der Planung des Prozessinhaltes, der Ressourcen und Abfolge von Teilprozessen auch die Aufgabenblöcke Auswahl der Leistungsparameter, Festlegung des Messsystems sowie Planung der Prozessziele.³⁰⁰ Letztere schaffen die Voraussetzung für die Messung und Verbesserung der Prozessleistung. Bei der Prozessanalyse werden Prozesse aus der Innenansicht heraus betrachtet. Inhalte der Prozessanalyse sind bspw. Problemanalysen, Zeitvergleiche oder Prozessaudits.³⁰¹

3.3.2 Rolle und Definition von Fabrikprozessen

Die vorherrschenden Denkmuster bei der Analyse von Fabrikssystemen sind das Denken in Objekten und Prozessen bzw. Flüssen.³⁰² Das im Abschnitt 3.2 entwickelte *FE-Modell* oder die Unterteilung einer Fabrik in Planungsfelder sind Beispiele für das Denken in Objekten. Auch die Strukturplanung, bei der Funktionseinheiten der Fabrik zunächst gemäß ihrer Beziehungen angeordnet und dann in einem Groblayout und später in einem Feinlayout dargestellt werden, unterliegt dem objektorientierten Paradigma.³⁰³ Das Denken in Prozessen wird bei der materialflussorientierten Layoutplanung deutlich, bei der Arbeitsplätze, zwischen denen hohe Materialflussintensitäten bestehen, möglichst nah zueinander angeordnet werden. Die

²⁹⁵ Vgl. Ulrich; van Laak (2003), S. 47-48.

²⁹⁶ Vgl. Ulrich; van Laak (2003), S. 45.

²⁹⁷ Vgl. Dangelmaier (1999), S. 25-31 und Ulrich; van Laak (2003), S. 45 und S. 48.

²⁹⁸ Vgl. Schenk et al. (2007), S. 224.

²⁹⁹ Vgl. Ulrich; van Laak (2003), S. 45.

³⁰⁰ Vgl. Eversheim (1996c), S. 7.74-7.75 und Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 176.

³⁰¹ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 213.

³⁰² Vgl. z.B. Fischer (2005), S. 22 für die Denkweisen der Objekt- und Prozessorientierung.

³⁰³ Die Funktionseinheiten (Flächen) der Fabrik können als Objekte angesehen werden.

Struktur und die Materialflüsse einer Fabrik ergeben sich maßgeblich aus dem ausgewählten Fertigungstyp sowie der für ein Produktspektrum vorteilhaft befundenen Strukturlösung.³⁰⁴ Die systematische Anwendung des Prozesskonstruktes erfolgt vor allem bei der Fabrikplanung und hier im Rahmen:

- der Abbildung der Prozesse in Prozessplänen,
- der Materialflussdarstellung und -analyse,
- der Ressourcen- und Kapazitätsplanung,
- der ereignisorientierten Prozesssimulation,
- sowie der Modellierung kontinuierlicher Prozesse in Flusssystemen.

Die genannten Methoden greifen mehrheitlich auf die Ergebnisse der Prozess- und Arbeitsplanung zurück. Die benötigten Eingangsdaten werden bspw. oftmals den Arbeitsplänen entnommen. Dies führt dazu, dass die Prozessbetrachtung i.d.R. produktbezogen erfolgt und nur die in den Arbeitsplänen enthaltenen Fertigungs-, Montage-, Prüf- und Logistikprozesse eine Berücksichtigung finden.

Ein eigenständiges Prozessmodell für die Fabrikplanung und das Änderungsmanagement, mit dem alle wesentlichen Funktionen einer Fabrik auch unter einer anderen Ordnung als der produktbezogenen Ablauffolge als Prozesse abgebildet werden, liegt gewöhnlich nicht vor. Als Beispiel soll die Planung eines Werkzeuglagers angeführt werden. Dieses wird im Regelfall als Raumobjekt bei der Planung berücksichtigt, aber der Planung kein explizit dokumentierter Prozessplan für die Werkzeuglagerung mit seinen Teilprozessen vorangestellt.

Mit dem *Fabrikprozess* soll nun die Anwendung des Prozesskonstruktes für eine wissensorientierte Fabrikmodellierung erweitert werden. Der *Fabrikprozess* wird wie folgt definiert:

Unter einem Fabrikprozess wird ein operativer Fertigungs-, Montage- oder Logistikprozess oder ein operativer oder dispositiver Hilfsprozess dieser drei Hauptprozesse innerhalb der Fabrik verstanden. Fabrikprozesse sind auch aus den Hauptprozessen und Hilfsprozessen zusammengesetzte Prozesse oder Teilprozesse dieser Prozesse. Elementarprozesse sind Fabrikprozesse, die im FP-Modell nicht weiter zerlegt werden.

Die Elementarprozesse bilden die unterste Abstraktionsstufe im Prozess-Modell. Sie sind weniger detailliert als Handhabevorgänge und unmittelbar in ein Arbeitssystem eingebunden.³⁰⁵ In Tabelle 3-4 sind Beispiele für die in der Definition erwähnten Haupt- und Hilfsprozesse aufgeführt.

³⁰⁴ Vgl. Harms (2004), S. 16 und 22. Fertigungstypen sind die Werkstattfertigung, Inselfertigung, Baustellenfertigung sowie Fließfertigung. Strukturlösungen sind die Fertigungsart-, Produkt- und Technologieorientierung.

³⁰⁵ Vgl. REFA (1994), S. 17-18 zur Beschreibung von Handhabevorgängen und Zangemeister (2000), S. 101-102. zum Begriff des Arbeitssystems.

Fabrikprozesse			
Hauptprozesse		Hilfsprozesse	
Logistikprozesse ³⁰⁶	Fertigungs- und Montageprozesse ³⁰⁷	operativ ³⁰⁸	dispositiv ³⁰⁹
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fördern ▪ Transportieren ▪ Lagern ▪ Umschlagen ▪ Puffern ▪ Kommissionieren ▪ Verpacken ▪ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Urformen ▪ Umformen ▪ Trennen ▪ Beschichten ▪ Fügen ▪ Justieren ▪ Kontrollieren ▪ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rüsten ▪ Prüfen, Messen ▪ Vorrichtungsbau ▪ Bereitstellung von Materialien ▪ Instandhaltung ▪ Hilfsstofflagerung ▪ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ technische Fertigungsplanung ▪ zeitlich-kapazitive Fertigungsplanung ▪ ...

Tabelle 3-4: Übersicht über Fabrikprozesse

Fabrikprozesse werden nicht nur als typische produktbezogene Eingangsinformation aus der Arbeitsplanung für die Fabrikplanung gesehen, die ggf. um logistische Prozesse ergänzt werden. Vielmehr sind sie ein strukturierendes Element sämtlicher durch die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb zu berücksichtigenden Funktionen in einer Fabrik (vgl. Bild 3-4).³¹⁰ Zu bemerken ist, dass die Prozessdefinition (vgl. Abschnitt 2.2.3) auch für *Fabrikprozesse* gültig ist und durch die Einführung des Begriffes lediglich auf die erweiterte und systematisierte Verwendung des Prozesskonstruktes im Rahmen der wissensorientierten Fabrikmodellierung hingewiesen werden soll.

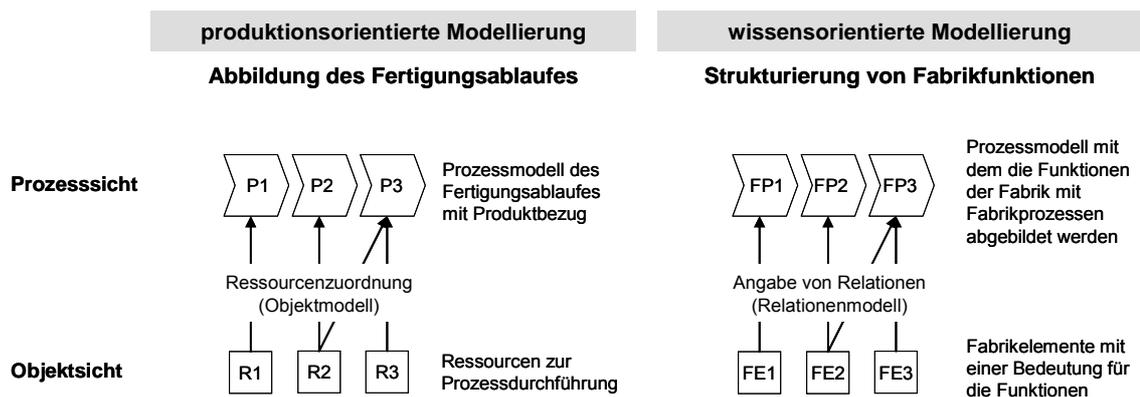


Bild 3-4: Anwendung des Prozesskonstrukts für die wissensorientierte Fabrikmodellierung

³⁰⁶ Vgl. Arnold et. al. (2004), S. A 1-7 bis A 1-8; Gudehus (2005), S. 356-361; Koether et. al. (2004), S. 48-53 und DIN 30781 (1989).

³⁰⁷ Vgl. DIN 8580 (2003); Fritz; Schultze (1998), S. 2. und REFA (1994), S. 18.

³⁰⁸ Vgl. DGQ (1989), S. 24-26.

³⁰⁹ Vgl. Frese; Theuvsen (1996), S. 462.

³¹⁰ Vgl. Fischer (1995), S. 63-64. Hier wird darauf hingewiesen, dass mit dem Prozess üblicherweise ein dynamischer Aspekt verbunden wird, der eine zeitliche Realisierung einer Funktion beinhaltet. Demnach kann ein Prozess als raumzeitliche Ausprägung einer Funktion aufgefasst werden.

Analog zur Prozessplanung können die Funktionen einer Fabrik auf der Prozessebene mit den *Fabrikprozessen* im Vorfeld der Objektplanung konzipiert werden. Zur Erfüllung dieser Funktionen werden physische und nicht-physische Objekte, z.B. die *Fabrikelemente* des *FE-Modells* identifiziert und gestaltet. Die klassische Prozess-Ressourcen-Beziehung wird, wie in Bild 3-4 dargestellt, zu einer *Fabrikprozess-Fabrikelement-Beziehung* ausgebaut. Mit dem *Relationenmodell* werden später die Beziehungen abgebildet, die über die reine Ressourcenzuordnung zu Prozessen hinausgehen.

Die Prozessmodellierung mit *Fabrikprozessen* hat Ähnlichkeiten mit der Flussystemtheorie und den dort verwendeten Flussfunktionen, Flussystemelementen und Flussystemkomplexen.³¹¹ Sie unterscheidet sich jedoch darin, dass nicht die technischen Funktionsketten und Flüsse an einem Arbeitsplatz oder mehreren Arbeitsplätzen dargestellt werden sollen. Vielmehr wird die Erfassung der Abläufe und Funktionen in einer Fabrik auf einer mittleren Abstraktionsebene zwischen Geschäftsprozessen und Handhabevorgängen angestrebt.

Mit der Abbildung von *Fabrikprozessen* im Rahmen der wissensorientierten Fabrikmodellierung werden im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

- *Systematisierung*: Mit dem *FP-Modell* lassen sich die Funktionen der Fabrik jeweils im Vorfeld der *FE-Gestaltung* abbilden. Die *FE-Gestaltung* kann somit nach Funktionen systematisiert durchgeführt werden und die Ergebnisse dem Strukturierungskonstrukt *Fabrikprozess* zuordnen. Der Einstieg in Informationsstrukturen über den Prozess entspricht auch den Anforderungen der drei Anwendungsgebiete, weil Information über einen Prozess und seine Einflussgrößen öfter abgefragt werden, als über ein einzelnes Objekt.³¹²
- *Bewertbarkeit*: Prozesse fokussieren auf die Leistungserstellung in einer Fabrik und machen diese operabel. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Fabrik, z.B. hinsichtlich Durchlaufzeit, Wandlungsfähigkeit oder Kosteneffizienz lässt sich nicht direkt an den *Fabrikelementen* der Fabrik durchführen.³¹³ Methoden zur Produktionsoptimierung, wie die kontinuierliche Prozessverbesserung setzen ihr Messsystem am Prozess an. Der Zugriff auf Informationsstrukturen eines Fabriksystems sollte somit auch über das Bewertungsobjekt „Prozess“ zielgerichtet möglich sein. Die Abbildung

³¹¹ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 81-90.

³¹² Eine Frage während des Fabrikbetriebes lautet z.B.: Welches Transportmittel übernimmt die Bereitstellung für einen bestimmten Arbeitsplatz? Diese Frage könnte täglich gestellt werden, um z.B. den Bereitstellungsprozess zu steuern. Die Frage: „Welche Bereitstellungsprozesse übernimmt ein bestimmtes Transportmittel?“ wird hingegen seltener gestellt, z.B., wenn dieses defekt ist und die Auswirkungen auf die Produktion erfasst werden sollen. Eine Ausnahme bildet die Instandhaltung, bei der die Objektinformationen im Vordergrund stehen und Informationen über den Prozess, von dem die instanzzusetzende Ressource verwendet wird, weniger relevant sind.

³¹³ Einzelne Objekte der Fabrik können z.B. höchst wandlungsfähig sein. Die Wandlungsfähigkeit eines einzelnen Objektes sagt jedoch nichts über die anforderungsgerechte Anpassbarkeit der Produktionsprozesse aus. Hierzu müssen die auf einen Prozess wirkenden Fabrikelemente in ihrer Gesamtheit analysiert und auf die anforderungsgerechte Anpassungsfähigkeit des Prozesses deduktiv geschlossen werden.

von Prozessen erlaubt die Darstellung des Einflusses von *Fabrikelementen* auf die Leistungserstellung.

- *Arbeitshilfe*: Aufgrund der Tatsache, dass die *Fabrikprozesse* vor der *FE-Gestaltung* bestimmt sind, lassen sich z.B. Gestaltungsempfehlungen und sonstige Planungshilfen für die optimale Prozessrealisierung bereitstellen. Dies ist insbesondere hilfreich, wenn noch keine *Fabrikelemente* im ersten Planungsstand vorliegen und zunächst identifiziert und ausgewählt werden müssen. Die Realisierung der Arbeitshilfe erfolgt über die Prozessplanung mit Referenzprozessen (vgl. Abschnitt 2.2.3), welche bereits mit entsprechenden allgemeingültigen Informationen verknüpft sind.
- *Abbildung eines Produkt-FE-Bezugs*: Über Prozesse kann eine Beziehung zwischen Produkten und den *Fabrikelementen* hergestellt und somit deutlich werden, an welchem Ort und mit welchen Ressourcen die Produktion erfolgt.

In den folgenden Abschnitten wird ein Prozessmodell-Schema entwickelt mit dem *Fabrikprozesse* systematisiert werden können. Der Verwendungszweck des Modells ist der gezielte und praktikable Zugriff auf Informationsstrukturen. Im Mittelpunkt soll dabei die Erfassung von Informationen zu den im konkreten Fall wesentlichen Fertigungs-, Montage- und Logistikprozessen sowie den Hilfsprozessen stehen.³¹⁴ Das *FP-Modell* erhebt dementsprechend nicht den Anspruch, die Produktionsprozesse in einer Fabrik umfassend und detailliert abbilden zu können. Energie- und Informationsflüsse werden z.B. vernachlässigt und Stoffflüsse nur indirekt über Prozessketten abgebildet.

3.3.3 Prozesskettenelemente, Prozessketten und Prozessgruppen

Im Abschnitt 2.2.3 wurden Prozesskettenmodelle bereits als Möglichkeit zur Prozessabbildung vorgestellt.³¹⁵ Für die Entwicklung des *FP-Modells* wird teilweise auf die Modellelemente und -eigenschaften des Prozessketteninstrumentariums zurückgegriffen, welche an die Anforderungen der wissensorientierten Fabrikmodellierung adaptiert werden. Gemäß diesem Prozessketteninstrumentarium besitzt jedes Prozesskettenelement die Strukturelemente Quellen, Senken, Prozesse, Lenkungsebenen, Ressourcen und Strukturen.³¹⁶ Quellen sind in der Terminologie des Prozesskettenmodells Basisobjekte einer Prozesskette, die die Prozesskette durchlaufende Informationen und Materialien sein können. Senken beschreiben den Abfluss an Basisobjekten aus dem betrachteten Prozess.³¹⁷ In Bild 3-5 ist der *Fabrikprozess* als Prozesskettenelement dargestellt. Für das *FP-Modell* wurde das Prozesskettenelement dahinge-

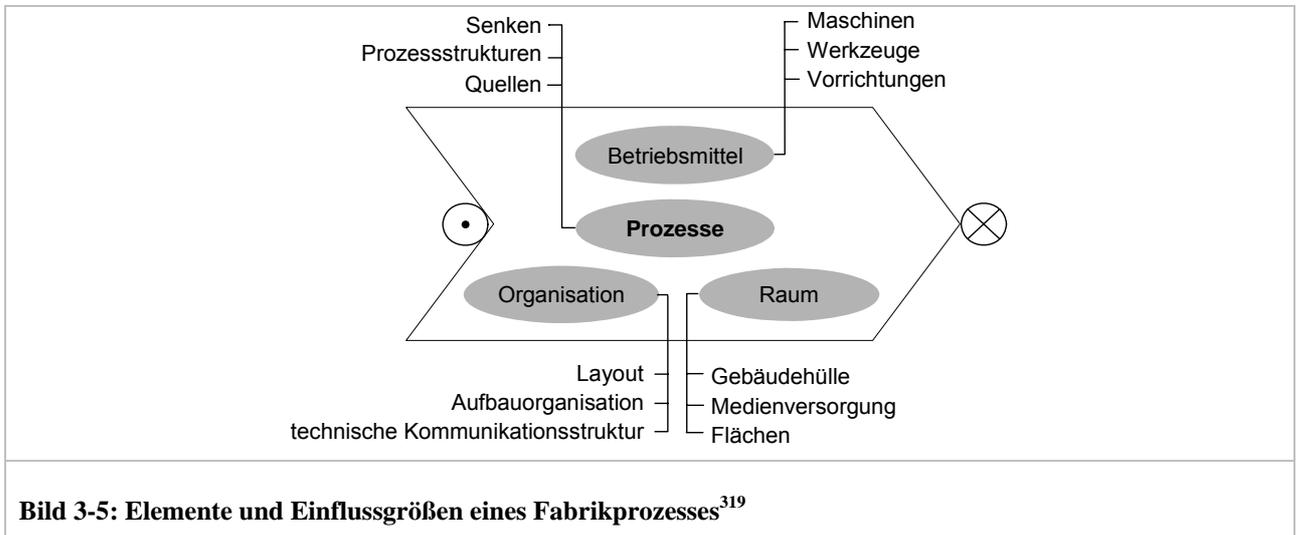
³¹⁴ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 93-94 zur Beschreibung von Hilfsprozessen.

³¹⁵ Vgl. zusätzlich Fischer (1995), S. 65-71 für verschiedene Ansätze zum Vorgehen bei der Prozesskettenmodellierung.

³¹⁶ Vgl. Kuhn (1995), S. 42-46.

³¹⁷ Kuhn unterscheidet mit bearbeiten, transportieren, puffern und lagern vier Prozesstypen. Nur der Bearbeitungsprozess wird innerhalb einer Prozesskette als wertschöpfend angesehen. Die anderen Prozesstypen sind, sofern nicht technologisch bedingt, möglichst zu eliminieren.

hend angepasst, dass die Strukturelemente Lenkungsebene, Ressourcen und Strukturen durch die Gestaltungsbereiche der Fabrikplanung – Betriebsmittel, Raum- und Gebäudetechnik sowie Organisation – ersetzt wurden.³¹⁸



Im *FP-Modell* sollen mit der Prozesskette und der Prozessgruppe zwei Strukturformen angewendet werden:³²⁰

- *Prozesskette*: Verknüpfung von *Fabrikprozessen* in Form einer Ablaufstruktur ohne Verzweigung.³²¹
- *Prozessgruppe*: Einfache Gruppierung von *Fabrikprozessen* ohne Ablaufstruktur.³²²

Prozessketten und Prozessgruppen sind selbst wiederum *Fabrikprozesse* auf einer höheren Ordnungs- bzw. Aggregationsebene (vgl. Bild 3-6). Einzelne *Fabrikprozesse* können in mehreren Prozessketten oder Prozessgruppen vorkommen und in einer Prozesskette mehrfach aufgenommen werden. Neben der sachlogischen Gruppierung von *Fabrikprozessen* bietet eine Prozessgruppe durch Einbindung in eine Prozesskette weitere Abbildungsmöglichkeiten. So können ablauflogisch gleich in eine Prozesskette integrierte Prozesse abgebildet werden, ohne eine separate Prozesskette anlegen zu müssen. Dies bietet sich bspw. an, wenn alternative Leistungsstellen für den gleichen Prozess oder Alternativprozesse vorhanden sind. In Bild 3-6 wird die Bildung von Prozessketten und Prozessgruppen aus Prozesskettenelementen schematisch verdeutlicht.

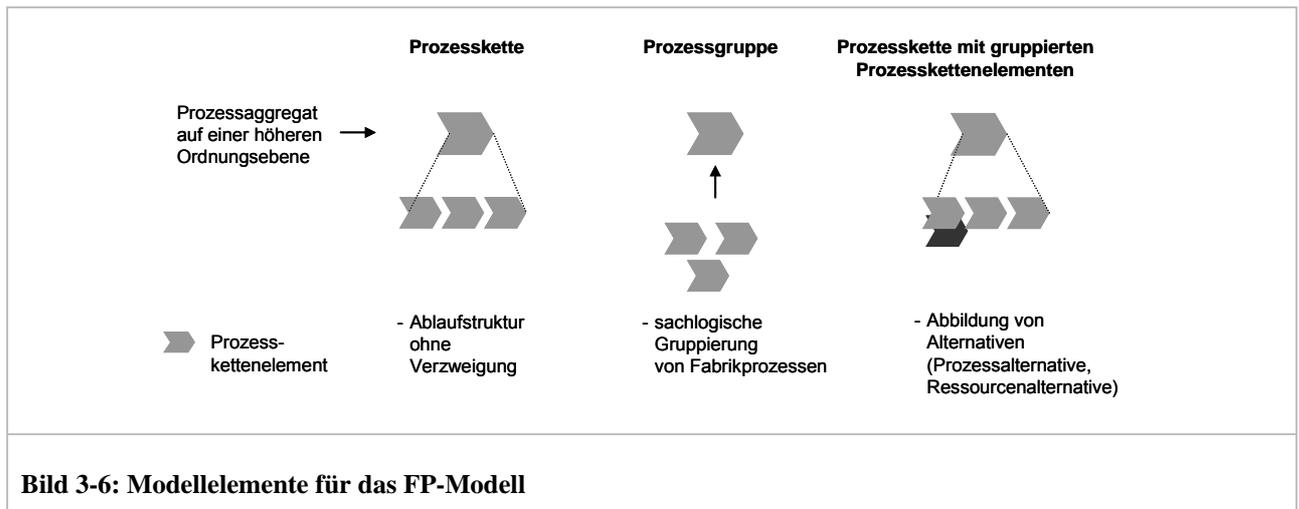
³¹⁸ Vgl. Zäh et al. (2004), S. 174 mit einer Zuordnung von Betriebsmitteln, Personal, Gebäude und Kapital.

³¹⁹ In Anlehnung an Kuhn; Hellingrath (2002), S. 116.

³²⁰ Vgl. die Verwendung von Prozessketten und Prozessgruppen bei Fischer (1995), S. 94-98.

³²¹ Vgl. Abschnitt 3.3.1 sowie REFA (1991), S. 91 zu den Grundformen von Ablaufstrukturen.

³²² Mit der Strukturform Prozessgruppe sollen *Fabrikprozesse* unabhängig von ihrer Abfolge nach thematischen Fragestellungen gruppiert werden können, z.B. alle Prozesse, die einen Kapazitätsengpass darstellen, alle Prozesse die kritisch hinsichtlich der Qualität sind oder alle Prozesse, die einer bestimmten Fabrikebeneninstanz zugeordnet sind.



Die Prozessketten wurden bisher unabhängig von ihren Basisobjekten, z.B. Bauteile und Baugruppen, beschrieben. Prozessketten können auch jeweils für ein Produkt oder eine Produktfamilie Gültigkeit besitzen, welche die Einzelprozesse in der angegebenen Sequenz durchlaufen.³²³ Mit dem Modellelement der Gruppierung lässt sich eine Prozesskette, sofern die Differenz nur das Prozesskettenelement und nicht die Sequenz betrifft, auf ein breiteres Produktspektrum anwenden.³²⁴ Bei Abweichungen in der Sequenz müssen für weitere Produkte neue Prozessketten abgebildet werden. Mehrere Prozessketten, die für ein Produkt gelten, können beliebig verknüpft und damit verlängert werden, um den Produktionsprozess durchgehend zu erfassen.

3.3.4 Attribute von Fabrikprozessen

Prozessmodelle erlauben i.d.R. die Angabe von Prozesseigenschaften in Form von Attributen und ergänzenden prozessbezogenen Informationen. Im *FP-Modell* können *Fabrikprozesse* analog der Eigenschaftsvergabe bei FE mit quantitativen und qualitativen Attributen beschrieben werden. Hierdurch erfolgt eine wesentliche Erweiterung gegenüber herkömmlichen Prozessmodellen, bei denen lediglich quantitative Attribute Verwendung finden.³²⁵

Quantitative Attribute sind Kenngrößen wie Prozesszeit, Prozesskapazität, Prozesskosten, Automatisierungsgrad oder Mitarbeiterintensität, welche auf einer Nominalskala gemessen werden können. Qualitative Attributausprägungen lassen sich hingegen lediglich mit qualitativen Messverfahren auf einem niedrigeren Skalenniveau bestimmen.³²⁶ Die Zuweisung von

³²³ Ein Unterschied in der Anzahl ggf. vorhandener Schleifenprozesse ist zugelassen, wenn ein und dieselbe Prozesskette hintereinander durchgelaufen wird.

³²⁴ Für die Einzelprozesse einer Prozessgruppe wird jeweils separat angegeben, welches Produkt diesen Einzelprozess durchläuft.

³²⁵ Vgl. VDI 3637 (1996).

³²⁶ Qualitative Messverfahren sind z.B. die Nutzwertanalyse, Verfahren mit Punktevergabe oder Befragungen.

qualitativen Attributen zu Prozessen basiert auf den Ansätzen zur Bewertung qualitativer Kriterien in der Fabrikplanung.³²⁷ Zu den Kriterien gehören bspw. die Wandlungsfähigkeit, Mitarbeiterorientiertheit, Transparenz oder Stabilität einer Fabrik. Diese Eigenschaften wurden im Abschnitt 3.2.2 auch an FE vergeben. Eine weitere Möglichkeit ist die Charakterisierung von Fabrikebenen mit qualitativen Attributen.³²⁸ Die im *FP-Modell* realisierte Variante zeichnet sich nun durch eine Projizierung qualitativer Kriterien auf *Fabrikprozesse* aus. *Fabrikelemente*, *Fabrikebenen* und *Fabrikprozesse* sollen als Merkmalsträger bezeichnet werden. Sie sind das mit einer Attributausprägung qualitativ bewertete Konstrukt. Die Ausprägung eines qualitativen Attributs wird durch die geplanten Basis-FE in einem Fabrikssystem bestimmt, welche mit einem Merkmalsträger in Beziehung stehen. Die Attribuierung unterschiedlicher Merkmalsträger mit qualitativen Kriterien wird mit Bild 3-7 verdeutlicht.

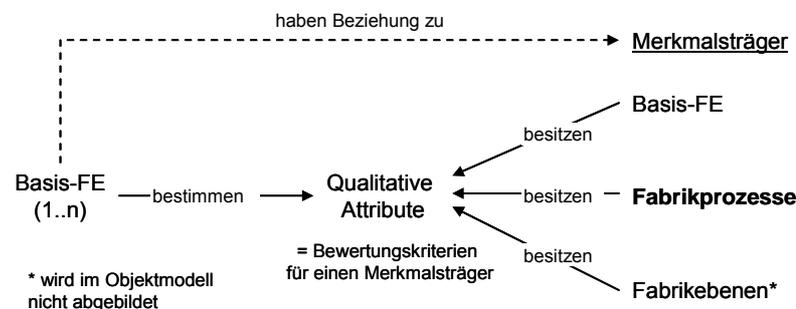


Bild 3-7: Merkmalsträger für qualitative Kriterien

Mit der Verwendung von *Fabrikprozessen* als Merkmalsträger für qualitative Attribute entsteht eine Reihe von Vorteilen:

- Fokussierung der qualitativen Bewertung auf den Prozess und damit auf das für die Leistungsbewertung eines Fabriksystems relevante Konstrukt. Durch eine Kumulation von Einzelausprägungen können auch Attributausprägungen für Prozessketten und Prozessgruppen generiert werden.
- Möglichkeit einer prozessbezogenen Zielvorgabe für qualitative Kriterien, die bereits im Rahmen der Zielplanung auf Basis in der Prozessplanung definierter Prozesse erfolgen kann und durch die qualitative Anforderungen an die zu planenden FE systematisch vorgebar werden.
- Wenn eine kausale Beziehung zwischen quantitativen und qualitativen Größen hergestellt wird, kann die Wirkung nach der Veränderung eines qualitativen Merkmals direkt am Prozess mit Hilfe der quantitativen Merkmale gemessen werden. Wird z.B. die Mitarbeiterorientierung für einen Prozess erhöht, dann kann die Wirkung am quantita-

³²⁷ Vgl. Kolakowski et al. (2007).

³²⁸ Vgl. die Vorgehensweise bei Kolakowski et al. (2007), S. 228-229.

tiven Prozessattribut Krankenstand oder Leistung abgelesen werden.

- Zuordnung qualitativ beschreibbarer Wirkungen zu Produkten, die eine Prozesskette durchlaufen. Ein Produkt, das z.B. einen sehr stabilen oder umweltfreundlichen Prozess durchläuft, besitzt eine hohe Versorgungssicherheit bzw. wurde umweltfreundlich gefertigt.
- Erweiterte Analysemöglichkeiten durch die konkrete Verknüpfung mit weiteren Prozessinformationen. Ist z.B. bekannt, dass der Absatz und der Produktionsablauf eines Produktes stabil bleibt, spielt unter Umständen die Wandlungsfähigkeit eines Prozesses eine untergeordnete Rolle. Die Relevanz eines qualitativen Kriteriums hinsichtlich seines wirtschaftlichen Potenzials lässt sich aufgrund von prozessbezogenen Informationen besser abschätzen.

Neben der Differenzierung in quantitative und qualitative Attribute lassen sich die Prozessattribute in produktabhängige und produktunabhängige sowie betriebsabhängige und betriebsunabhängige Attribute differenzieren (vgl. Tabelle 3-5).

Differenzierungskriterium	Ausprägungen	
Bestimmbarkeit	quantitativ	qualitativ
Produktabhängigkeit	unabhängig	abhängig
Konstanz	betriebsabhängig	betriebsunabhängig

Tabelle 3-5: Differenzierungskriterien für Prozessattribute

Produktunabhängige Prozessmerkmale sind quantitative oder qualitative Attribute, die weitgehend unabhängig vom Basisobjekt sind. Beispiele für quantitative produktunabhängige Attribute sind die zeitliche Kapazität, der Krankenstand oder der Automatisierungsgrad. Zudem sind i.d.R. alle qualitativen Attribute produktunabhängig. Produktabhängige Attribute sind vom Basisobjekt abhängige quantitative Attribute wie die Prozesszeit, Prozessqualität oder die mengenbezogene Kapazität. Bei einem produktabhängigen Attribut existiert somit für jedes Produkt, das den *Fabrikprozess* durchläuft, jeweils eine Attributausprägung.

Bei betriebsabhängigen Attributen steht die Ausprägung zu einem Zeitpunkt t in Abhängigkeit zum Fabrikbetrieb und ergibt sich demnach aus der zeitlichen und mengenmäßigen Verteilung von Tätigkeiten und Basisobjekten. Betriebsabhängige Attribute ändern ihre Ausprägung während des Fabrikbetriebs, d.h. ohne eine Umgestaltung des Fabriksystems durch Tätigkeiten der Fabrikplanung oder des Änderungsmanagements und zeigen den aktuellen Ist-Zustand zum Zeitpunkt t auf. Qualitative Attribute sind zumeist betriebsunabhängig, sofern ein Arbeitssystem nicht mehrere Varianten der Prozessausführung zulässt.³²⁹

³²⁹ Das Entgraten eines Bauteiles kann z.B. auf dem Boden oder auf einem Arbeitstisch liegend stattfinden. Ist

3.3.5 Operationen von Fabrikprozessen

Im *FP-Modell* können Prozessen neben Attributen auch Operationen zugewiesen werden (vgl. Abschnitt 3.1). Dieses Modellelement stellt, genau wie die Abbildung von qualitativen Prozessattributen, eine Erweiterung gegenüber herkömmlichen Prozessmodellen dar (vgl. Abschnitt 3.3.4). Während die Prozessattribute die statischen oder zeitabhängigen Merkmale eines *Fabrikprozesses* abbilden, ist es mit den Operationen möglich Änderungen an den *Fabrikprozessen* und den Rahmenbedingungen der Prozessdurchführung zu erfassen. *FP-Operationen* stehen jeweils für Maßnahmen, die potenziell umgesetzt werden können. Sie stoßen mit ihrer Ausführung Wandlungs- und Änderungsvorgänge im Fabrikssystem an. Der Start einer Operation erfolgt aufgrund eines Planungsgrundes, der im Folgenden als Änderungstreiber bezeichnet werden soll und internen oder externen Ursprungs sein kann (vgl. Bild 3-8).³³⁰

Die Abbildung von Operationen im *FP-Modell* setzt die Antizipation zukünftiger Fabrikssystemänderungen durch den Modellnutzer voraus. Im wissensorientierten Fabrikmodell verweisen *FP-Operationen* auf für diese Änderungen relevante Informationen.

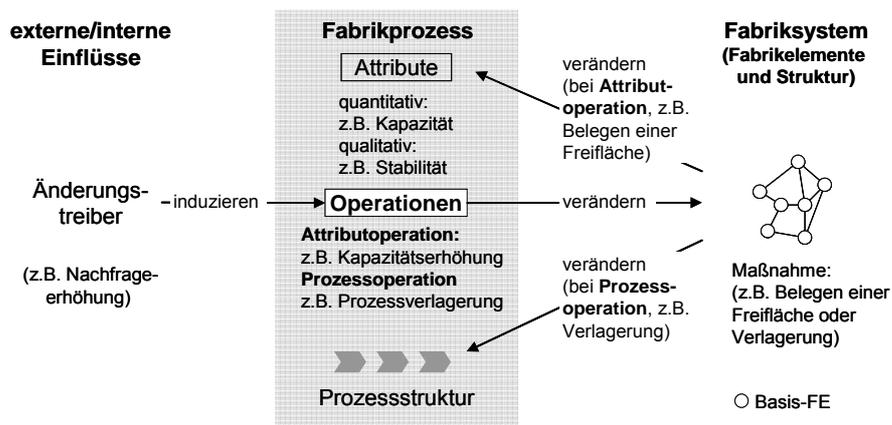


Bild 3-8: Operationen im FP-Modell

Ähnlich wie bei den Operationen des *FE-Modells* (vgl. Abschnitt 3.2.2) werden mit den Attributoperationen und Prozessoperationen zwei Operationsarten unterschieden. In Tabelle 3-6 sind beispielhaft jeweils drei Operationen aufgeführt. Attributoperationen ändern die Ausprägungen der zu einem Prozess zugeordneten Attribute. Eine Attributoperation ist bspw. die Operation „Kapazitätserhöhung“, die Maßnahmen wie einen Hallenanbau für zusätzliche Maschinenkapazitäten oder die Substitution einer bestehenden Maschine durch eine Maschine mit höherer Leistungsfähigkeit repräsentieren kann.

letzterer zum Zeitpunkt t belegt und wird deshalb auf dem Boden entgratet, ändert sich das Prozessattribut Mitarbeiterorientiertheit während des Fabrikbetriebs und ist damit betriebsabhängig.

³³⁰ Vgl. Hernández (2003), S. 46 zu einem Wirkungsschema von Veränderungen in einem Fabrikssystem.

Attributoperationen	Prozessoperationen
Kapazitätserhöhung DLZ-Verringerung Erhöhung der Produktflexibilität	Prozessverlagerung ³³¹ Prozessintegration ³³² Parallelisierung ³³³

Tabelle 3-6: Beispiele für Attribut- und Prozessoperationen

Das Verständnis von Prozessoperationen in dieser Arbeit besitzt Analogien zur Modulation von logistischen Prozessketten, wenn hier auch nicht die Planung und Optimierung von Prozessketten im Vordergrund stehen soll.³³⁴ Allerdings lässt sich das Prinzip der Prozessmodulation für die Abbildung von potenziellen Änderungsvorgängen im Fabrikssystem übernehmen. Im Gegensatz zu Attributoperationen repräsentieren Prozessoperationen dabei Maßnahmen, durch welche die Prozessstruktur verändert wird.

3.3.6 Aufbau des Fabrikprozess-Modells

Im Abschnitt 3.3.1 wurde auf die Möglichkeit der Dekomposition und Komposition von Prozessen hingewiesen, welche nun für den Aufbau von *FP-Modellen* genutzt werden soll. Dem *FP-Modell* liegt ein selbstähnliches Instrumentarium zu Grunde, mit dem sich einzelne Prozesskettenelemente durch Dekomposition hierarchisch verfeinern bzw. durch Komposition zusammenfassen lassen.³³⁵ Mit der Prozesskomposition gehen die Informationen über die innere Prozessstruktur verloren, woraus eine höhere Abstraktionsstufe resultiert. Wie in Bild 3-9 dargestellt, bilden die Elementarprozesse die unterste Ebene. Die maximale Anzahl der Kompositionsstufen wird durch das Modellschema nicht begrenzt. Sie sollte jedoch durch den Modellnutzer möglichst gering gehalten werden, um die Modellkomplexität nicht unnötig zu erhöhen.

Grundsätzlich wird sich bei der Abbildung von *Fabrikprozessen* und der Wahl der Kompositions- bzw. Dekompositionsstufen am Bedarf der wissensorientierten Fabrikmodellierung orientiert und damit an den abzubildenden Informationen und ihrer gewünschten Strukturierung. Sollen bspw. Informationen zur potenziellen Verlagerung einer Prozesskette mit dem

³³¹ Verlagerung eines Prozesses aus der Fabrik.

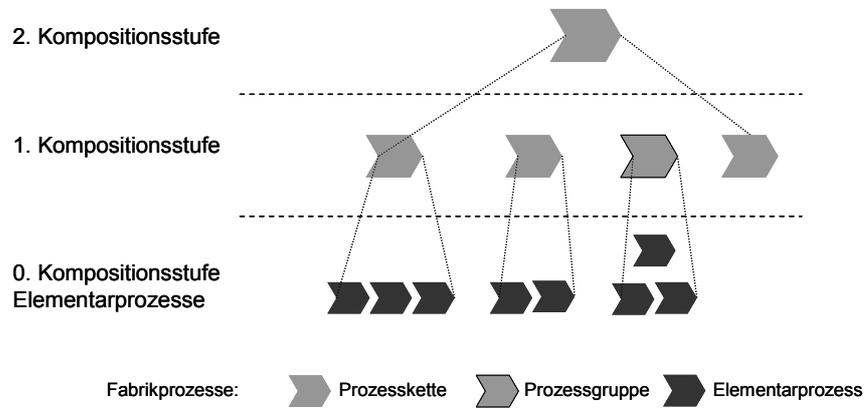
³³² Integration eines zusätzlichen Prozesses in eine bestehende Prozesskette.

³³³ Parallelisierung von Prozessen in einer Prozesskette.

³³⁴ Vgl. Pielok (1995), S. 163-165; Zäh et. al. (2004), S. 176. Prozessmodulationen für Prozessketten sind z.B. Parallelisieren, Zusammenfassen, Beschleunigen, Eliminieren, Ver- und Auslagern, Verbessern, Verlängern oder Verkürzen. Bei Näser; Ackermann (2003), S. 436 wird die Prozessmodulation auch im Zusammenhang mit der Definition der Prozess- und Funktionsflexibilität einer Produktionsstätte gebraucht.

³³⁵ Vgl. Kuhn (1995), S. 42 und Pielok (1995), S. 39-40. Die *Fabrikprozesse* aller Kompositionsstufen besitzen den gleichen Aufbau und unterliegen den gleichen Prinzipien. Durch fortlaufendes Aufbrechen der Prozesse werden gleiche Details auf immer kleineren Skalen iterativ detailliert. Mit wenigen Konstruktionselementen können somit komplexe Prozessstrukturen abgebildet und dabei auf jeder Detaillierungsebene dieselben Denkweisen und Methoden angewendet werden.

Modell erfasst werden, so ist der entsprechende *Fabrikprozess* mit der Prozessoperation „Verlagerung“ ohne die einzelnen Teilprozesse abzubilden.



Hinweis: Der Detailgrad der abzubildenden Prozessinformationen determiniert die Anzahl der Kompositionsstufen.

Bild 3-9: Prozesskomposition im FP-Modell

Die Abbildung der Teilprozesse ist erst notwendig, wenn spezifische Informationen zu den Teilprozessen zu erfassen sind. In Bild 3-9 ist bspw. der vierte Prozess auf der 1. Kompositionsstufe nicht weiter untersetzt. Zur weiteren Erläuterung findet sich in Bild 3-10 ein Beispiel für ein konkretes *FP-Modell*, bei dem Elementarprozesse, Prozessketten und Prozessgruppen verwendet wurden.

3. Kompositionsstufe	2. Kompositionsstufe	1. Kompositionsstufe	Elementarprozess
Anlieferung (<i>Gruppe</i>)	JIT-Anlieferung (<i>Kette</i>)	Eingangskontrolle Bereitstellungen (<i>Gruppe</i>)	Bereitstellung Fläche 1, Bereitstellung Fläche 2, Bereitstellung Fläche 3
	Anlieferung normal (<i>Kette</i>)	Eingangskontrolle Einlagerung Auslagerung Bereitstellung (<i>Kette</i>)	Kommissionierung Abstellen auf Bereitstellungsfläche
Produkt A (<i>Prozess</i>)	Vorbereitung mechanische Bearbeitung (<i>Gruppe</i>)	Alternative AP 1 (<i>Kette</i>), Alternative AP 2 (<i>Kette</i>)	Vordrehen Mittelfeindreihen Feindreihen Vordrehen Feindreihen
	Oberflächenbehandlung		

Bild 3-10: Beispiel für ein FP-Modell

Die Komposition von *Fabrikprozessen* erfolgt unabhängig von der in einer Fabrik vorhandenen Aufbauorganisation. Hierdurch wird es z.B. möglich mehrere Prozesse, die an unterschiedlichen Leistungsstellen ausgeführt werden, in einer Prozessgruppe zusammenzufassen oder bereichsübergreifende Prozessketten anzulegen.

Für *Fabrikprozesse* wird, analog der Vorgehensweise bei den FE in Abschnitt 3.2.1, eine Ordnung eingeführt. Diese dient der Systematisierung von *Fabrikprozessen* in Klassenbibliotheken. Von Klassen der höheren Ordnung können Unterklassen gebildet werden. Im *FP-Modell* werden *Fabrikprozesse* erster, zweiter und dritter Ordnung differenziert. *Fabrikprozesse* der dritten Ordnung werden als *Basis-Fabrikprozesse* (*Basis-FP*) bezeichnet. Nur von diesen können Instanzen gebildet werden. Dem Modellnutzer steht es frei, eine eigene auf die Produktion seines Unternehmens angepasste Ordnung für *Basis-FP* zu entwickeln. In Tabelle 3-7 wird beispielhaft eine Ordnung von *Fabrikprozessen* aus Bild 3-10 angegeben.

Fabrikprozesse 1. Ordnung	Fabrikprozesse 2. Ordnung	Basis-Fabrikprozesse 3. Ordnung
Tätigkeiten	Hilfsprozesse Fertigung	Eingangskontrolle Vordrehen
Prozessketten	produktbezogene Prozessketten produktunabhängige Prozesskette	Produkt A Anlieferung normal
Prozessgruppen	Gruppe von Tätigkeiten mit einheitlichem Merkmal Alternativprozesse	Bereitstellung mechanische Bearbeitung

Tabelle 3-7: Systematik von Fabrikprozessen (Beispiel)

Die *Basis-FP* dienen als Vorlage für die Erstellung eines *FP-Modells* für eine spezifische Fabrik. Dabei wird das Modell aus einzelnen Instanzen konfiguriert, welche die für ihre Klasse sinnvollen Attribute und Operationen besitzen. Die innere Prozessstruktur kann gemäß den Prinzipien des Prozessketteninstrumentariums bei jedem Prozess unterschiedlich sein.

3.3.7 UML-Klassendiagramm

Das Schema des *FP-Modells* wird analog zum *FE-Modell* (vgl. Abschnitt 3.2.3) mit dem UML-Klassendiagramm abgebildet (vgl. Bild 3-11).³³⁶ Folgende Elemente weist das Modell auf:

³³⁶ Vgl. die prinzipielle Verwendung des UML-Klassendiagramms für die Prozessabbildung z.B. bei Mehnert (2004), S. 74 im Zusammenhang mit einem Analysemodell für eine Prozessvariantengenerierung.

- Prozesskettenelemente, Prozessketten und -gruppen
- Prozessattribute und -operationen
- Kompositionsstufen
 - (0. Kompositionsstufe = Elementarprozess bis n-te Kompositionsstufe)
- Ordnungen (1. Ordnung, 2. Ordnung, 3. Ordnung=*Basis-FP*)

Jeder Elementarprozess bzw. jede Prozesskette oder Prozessgruppe ist ein *Basis-FP*, der im konkreten Modell als Instanz von einer *Basis-FP-Klasse* abgeleitet wird. Eine Prozesskette ist somit eine gerichtete Abfolge der Instanzen von *Basis-FP*. Komplexe Ablaufstrukturen und Ereignisse lassen sich mit dem *FP-Modell* nicht abbilden.³³⁷

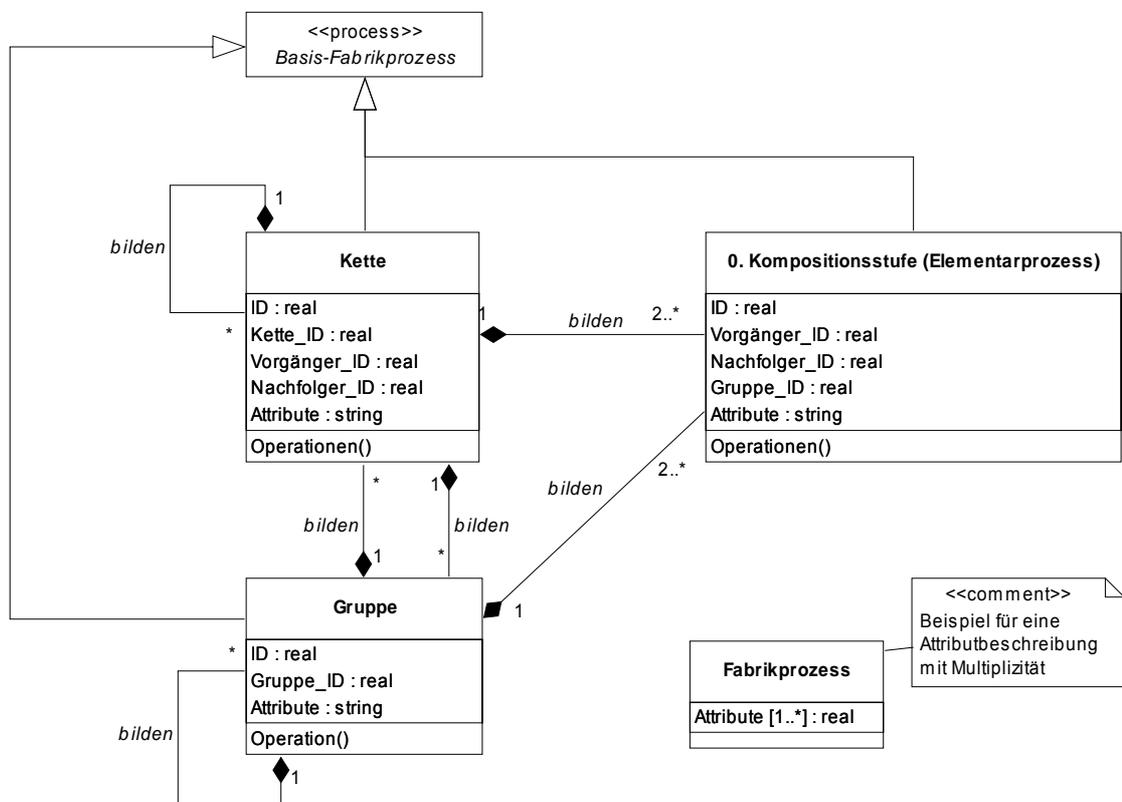


Bild 3-11: FP-Modell als UML-Klassendiagramm

Mit dem Modell werden Prozessketten mit Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen sowie die Zugehörigkeit von *Fabrikprozessen* zu Prozessgruppen auf der Ebene der Elementarprozesse sowie von Kompositionsstufen erfasst. Für den Fall, dass Attribute produktabhängig sind, lassen sich mehrere Ausprägungen durch die Spezifikation der entsprechenden Attribute mit Multiplizitäten berücksichtigen (vgl. Bild 3-11).

³³⁷ Die Analyse des dynamischen Verhaltens und die Quantifizierung des Materialflusses sind deshalb nicht möglich. Vgl. Arnold (2003), 47-48 für Modellarten zur Abbildung von Materialflusssystemen in Modellen.

Die Prozessklassen der verschiedenen Kompositionsstufen stehen für *Fabrikprozesse* von denen Instanzen erzeugt werden können. Diese *Basis-FP* werden in Bild 3-12 in die Systematik der *Fabrikprozesse* als Prozesse der 3. Ordnung aufgenommen. Sie übernehmen die Eigenschaften von den abstrakten Klassen der ersten bzw. zweiten Ordnung, von denen sich keine Instanzen ableiten lassen.

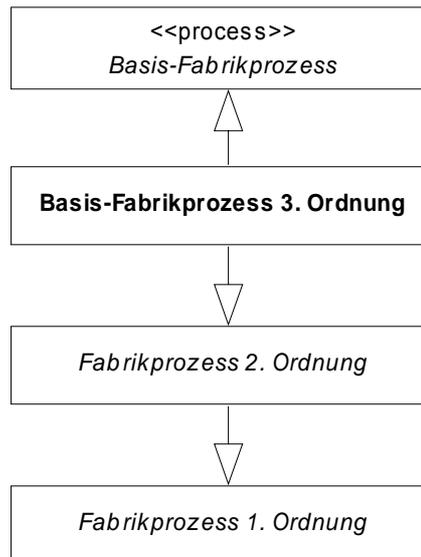


Bild 3-12: Aufbau einer Klassenbibliothek für Fabrikprozesse

Der Aufbau einer Klassenbibliothek ermöglicht die einmalige Abbildung und Wiederverwendung von typischen *Basis-FP*, die Wiederverwendung von Teilbeschreibungen von *Basis-FP*, welche durch die Klassen der ersten und zweiten Ordnung gegeben ist, sowie ihre systematische Ablage in Klassenbibliotheken.

3.4 Partialmodell der Produktelemente

Das *Produktelemente-Modell (PE-Modell)* ist das dritte Partialmodell des *Objektmodells*. Mit der Abbildung von Produkten wird die Darstellung von Beziehungen zwischen den in diesem Abschnitt definierten *Produktelementen (PE)* und *Fabrikprozessen* bzw. *Produktelementen* und *Fabrikelementen* ermöglicht.

Ein Produkt durchläuft i.d.R. mehrere Prozesskettenelemente, welche in Arbeitsplänen dokumentiert sind (vgl. Abschnitt 2.2.3).³³⁸ Eine reine Produkt-Prozess-Referenz verweist auf eine Prozesskette, die für das gesamte Produkt gilt und nicht auf einzelne Prozesskettenelemen-

³³⁸ Bauteile, Baugruppen und komplette Erzeugnisse werden im Folgenden als Produkt bezeichnet.

te.³³⁹ Für die wissensorientierte Fabrikmodellierung stellt dies einen Nachteil dar, da mit dem Modell nicht gezielt Bezüge zwischen Produktmerkmalen und Prozesskettenelementen hergestellt werden können. Auswirkungen von Produktänderungen auf die Produktion würden sich damit bspw. nicht direkt erfassen lassen.

Gegenüber den typischen in der Produktion verwendeten Stücklistenmodellen erfährt das *PE-Modell* für die wissensorientierte Fabrikmodellierung deshalb eine aus der rechnerintegrierten Produktentwicklung bekannte Erweiterung.³⁴⁰ In Anlehnung an den Ansatz der Featuretechnologie erlaubt es auch die Abbildung von Merkmalen eines Produktes, welche in Beziehung zu spezifischen Prozesskettenelementen stehen können.³⁴¹

Die Produktstruktur wird in der Produktion üblicherweise mit Stücklisten, den formalisierten Verzeichnisse der in einer Baugruppe bzw. einem Erzeugnis enthaltenden Elemente und Mengen, für die weitere Informationsverarbeitung festgehalten.³⁴² Im Prinzip können die drei Stücklistenarten Mengestückliste, Strukturstückliste und Baukastenstückliste unterschieden werden. In der Mengestückliste sind einmalig alle Teile unter Angabe ihrer Gesamtmenge enthalten. Bei der Strukturstückliste werden alle Baugruppen und Einzelteile eines Erzeugnisses bis zur untersten Strukturebene aufgelöst. Ihr Nachteil liegt in der mehrfachen Auflösung gleicher Baugruppen, wenn diese mehrfach in der Produktstruktur vorkommen. Die Baukastenstückliste enthält jeweils nur Baugruppen und Teile, die sich auf der nächsten tieferen Strukturebene befinden. Die genannten Stücklisten können jeweils zu einer Variantenstückliste erweitert werden. Für das *PE-Modell* wird die Baukastenstückliste aufgrund ihrer Vorteilhaftigkeit hinsichtlich des Erstellungs-, Speicher- und Änderungsaufwandes verwendet. Weiterhin bietet die Baukastenstückliste die Möglichkeit, die beiden anderen Stücklistenarten aus ihr abzuleiten.

Im Rahmen ihrer Anwendung im *PE-Modell* wird die Baukastenstückliste mit Produktmerkmalen nach dem Verständnis der Featuretechnologie erweitert. Der Grundgedanke der Feature-Technologie besteht darin, komplexe Produkte in einfachere Elemente – den Features – zu gliedern und diesen eine Bedeutung zuzuordnen, die auch als Feature-Semantik bezeichnet wird.³⁴³ Die Feature-Technologie ist ein informationstechnisches Mittel, das durch die Repräsentation von Wissen zu geometrischen Objekten in CAD-Systemen den automatisierten Konstruktionsprozess sowie die technologische Prozessplanung unterstützt.³⁴⁴ Mit den Features wird angestrebt, zusätzliche Informationsmengen für die Produktentwicklung zu erfassen, indem Informationskonstrukte mit ingenieurtechnischer Bedeutung in vorhandene werk-

³³⁹ Vgl. Mehnert (2004), S. 74.

³⁴⁰ Vgl. auch Fischer (1995), S. 176-177 für die Abbildung einer Erzeugnisstruktur mit der Beschränkung auf die Objekttypen Bauteil, Baugruppe und Erzeugnis.

³⁴¹ Vgl. Wehner (2003), S. 50.

³⁴² Vgl. Eversheim (1996b), S. 7-46 bis 7-49.

³⁴³ Vgl. Mendgen (1999), S. 13.

³⁴⁴ Vgl. Zuber et al. (2001), S. 311 und Wehner (2003), S. 29.

zeug- bzw. produktorientierte Datenstrukturen eingebaut werden.³⁴⁵

Die Feature-Technologie hat ihren Ursprung in der Arbeitsplanung, wo die Notwendigkeit bestand, bestimmten geometrischen Teilbereichen entsprechende Fertigungsanweisungen zuzuordnen, um dadurch automatisiert Fertigungsdaten, z.B. in Form von NC-Programmen, erzeugen zu können. Bereits die Anwendung geometrieorientierter Features, d.h. die vorausgehende Deklaration geometrischer Regionen und Formen, erhöht die Effizienz bei der Erstellung von Geometrien in CAD-Systemen. Weitere Anwendungen der Feature-Technologie sind das Abbilden von funktionalen Zusammenhängen und Lösungsprinzipien oder Berechnungen und Optimierungen im Konstruktionsprozess.³⁴⁶ Features können in Geometriefeatures, Konstruktionsfeatures, Analysefeatures, Berechnungsfeatures sowie Fertigungs- und Montagefeatures unterschieden werden.³⁴⁷

Features beschreiben im *PE-Modell* Produktmerkmale, die über die Beschreibung der Zusammensetzung eines Produktes aus Baugruppen und Bauteilen hinausgehen. Beispiele für Features sind Schweißnähte, Oberflächen, Bohrungen oder Nuten. Sie können in jede Baukastenstückliste, wie eine Baugruppe oder ein Bauteil, aufgenommen werden. In Bild 3-13 wird eine um Features erweiterte Baukastenstückliste dargestellt. Die Baukastenstückliste wird im *PE-Modell* nicht als Verzeichnis der Elementtypen und Mengen genutzt. Vielmehr ist sie ein Verzeichnis aller individuellen Teile und Features eines Produktes, weshalb in der dritten Tabelle z.B. den beiden Teilen T4 jeweils eine eigene *Element_ID* zugeordnet wird. Für jede *Element_ID* ist die Anzahl somit 1.

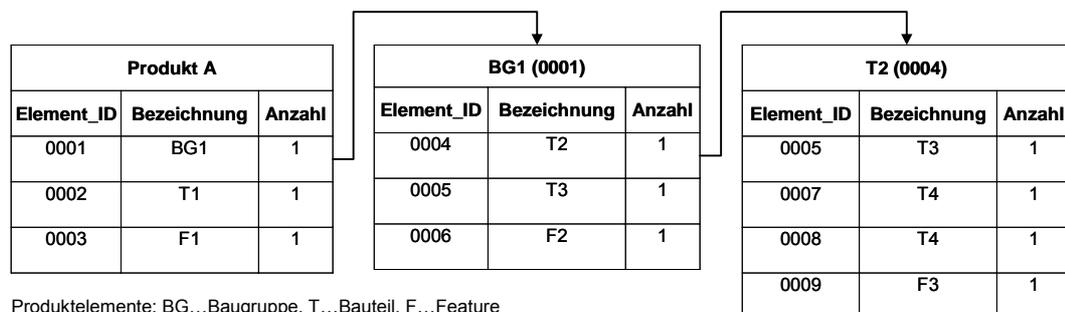


Bild 3-13: Baukastenstückliste mit Features

Die einzelnen Produkte, Baugruppen, Bauteile und Features werden im *PE-Modell* als *Produktelement (PE)* bezeichnet. Das UML-Klassendiagramm eines *Produktelements* ist in Bild 3-14 dargestellt.

³⁴⁵ Vgl. Wehner (2003), S. 48.

³⁴⁶ Vgl. Wehner (2003), S. 26-29.

³⁴⁷ Vgl. Mendgen (1999), S. 13.

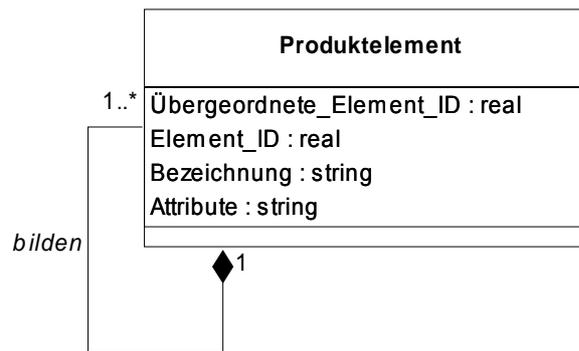


Bild 3-14: UML-Klassendiagramm für das PE-Modell

Jedem Produktelement können weiterhin Attribute zugewiesen werden. Eine Baugruppe kann bspw. ein Gewicht, eine Oberfläche, eine Farbe oder die Tiefe einer Bohrung als Attribut besitzen.

3.5 Integration der Partialmodelle des Objektmodells

Die drei Partialmodelle des *Objektmodells* wurden bisher unabhängig voneinander entwickelt. Im Folgenden wird eine Integration von *FE-Modell*, *FP-Modell* und *PE-Modell* vorgenommen. Diese Integration erfolgt über die Zuordnung von

- *Produktelementen* zu *Fabrikprozessen* und
- *Fabrikelementen* zu *Fabrikprozessen*.

Einem *Fabrikprozess* können beliebig viele *Produktelemente* zugewiesen werden. Diese bilden dann das Basisobjekt dieses Prozesses (vgl. Bild 3-15). Die Zuordnung der *Produktelemente* erfolgt i.d.R. zu produktbezogenen Prozessketten. In dem Fall, dass produktbezogenen Prozessketten von mehreren *Produktelementen* durchlaufen werden, besitzen die produktabhängigen Attribute des Prozesses mehrere Ausprägungen. Ein *Produktelement* kann mehrere Prozesse durchlaufen.

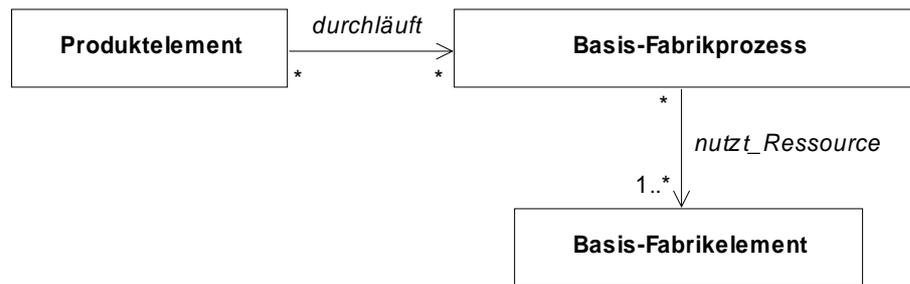


Bild 3-15: Integration der Partialmodelle

Mit der Zuordnung von *Fabrikelementen* zu den *Fabrikprozessen* erfolgt eine Verknüpfung zu den Prozessressourcen. Ein *Fabrikprozess* muss mindestens einer Ressource und eine Ressource kann mehreren *Fabrikprozessen* zugeordnet werden.

Mit der Integration der drei Partialmodelle besteht nun die Möglichkeit, den Produktionsablauf des Produktes abzubilden.³⁴⁸ Dabei lässt sich dieser anhand der dem *Fabrikprozess* zugeordneten *Fabrikelemente*, wie z.B. Flächen und Betriebsmittel, im Layout der Fabrik nachvollziehen. Ein Prozess erhält damit einen räumlichen Bezug in der Fabrik.

3.6 Modellparametrierung

In dieser Arbeit wird ein allgemeingültiges Modellschema entwickelt, das für die Erstellung von unternehmensspezifischen und wissensorientierten Fabrikmodellen geeignet ist. Die Parametrierung der Modellelemente, d.h. die Anlage von Klassen oder die Zuordnung von Attributen und Operationen zu diesen Klassen sollen vor dem Hintergrund des jeweils vorliegenden Abbildungsinhaltes, des Fabriktyps etc. durch den Modellnutzer selbst erfolgen. In diesem Abschnitt erfolgt dementsprechend keine Vorgabe von Klassen oder Eigenschaftszuordnungen, sondern es werden im Abschnitt 3.6.1 lediglich Hinweise für die Parametrisierung der Partialmodelle und im Abschnitt 3.6.2 Hinweise für die Bestimmung der Attributausprägungen für ein konkretes Fabrikmodell gegeben. Im Abschnitt 3.6.3 wird zusätzlich auf die Möglichkeit der Dokumentation von objektbezogenen Informationen als informale Wissensrepräsentation in digitalen Fabrikmodellen eingegangen.

³⁴⁸ Ein ähnlicher Integrationsansatz von Produkt- und Prozessmodell ist bei Jiao; Tseng (2000) mit der Bill-of-Materials-and-Operations (BOMO) zu finden.

3.6.1 Erstellung von Fabrikelementen, Fabrikprozessen und Produktelementen

Fabrikelemente, *Fabrikprozesse* und *Produktelemente* werden durch den Modellnutzer angelegt. Dabei sind durch ihn zunächst

- *FE-Klassen* und *FP-Klassen* erster und zweiter Ordnung, welche eine Ordnungsfunktion besitzen und
- die Klassen der *Basis-FE*, *Basis-FP* und *Produktelemente* von denen Instanzen erstellt werden können

zu bestimmen. Die speziellen Klassen „Fertigungsprozesse“ und „Anlieferungsprinzip“ im Bild 3-16 sind jeweils Spezialisierungen der darüber angegebenen Klassen des *Objektmodell-Schemas*.

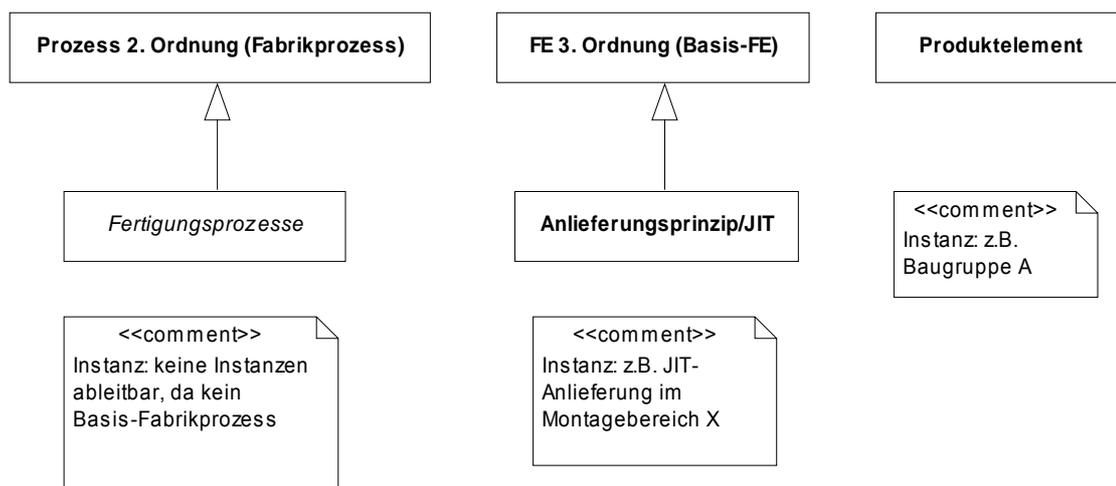


Bild 3-16: Spezielle Klassen und Instanzen im Objektmodell

Den Klassen des *Objektmodells* können Attribute und Operationen zugewiesen werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Eigenschaften der höheren Ordnung an die untere Ordnung weitergegeben, d. h. die Attribute und Operationen der übergeordneten Klasse auch sachlogisch sinnvoll der untergeordneten Klasse zugewiesen werden können. Im Zweifelsfall bietet es sich an, die Eigenschaften erst in der zweiten oder dritten Ordnung zu spezifizieren.

Für eine systematische Modellanwendung sollte die Vergabe von Attributen und Operationen nur sachlogisch begründet erfolgen. Das qualitative Attribut Arbeitsergonomie lässt sich bspw. sinnvoll einem einzelnen Montageprozess oder einer Gruppe von Montageprozessen aber nicht einer produktbezogenen Prozesskette zuordnen. Die Transparenz der Materialflüsse hingegen ist lediglich für Prozessketten relevant, die den Materialfluss einer oder mehrerer

Produkte abbilden. Der Nutzen einer Verwendung von Attributen und Operationen kann im konkreten Fall von anderen Attributen einer Klasse abhängen. Weist ein Montageprozess bspw. einen hohen Automatisierungsgrad auf, so kann das diesem Prozess ebenfalls zugeordnete Attribut Arbeitsergonomie im weiteren Verlauf ggf. vernachlässigt werden.

Das *Objektmodell* erlaubt weiterhin die Abbildung von Attributausprägungen. Neben der Information über den Ist-Wert eines Attributs, kann bspw. der Zielerreichungsgrad durch den Vergleich mit einem Soll-Wert ermittelt werden. Weiterhin ist es möglich – z.B. bei Prozessattributen – Ausprägungen unterer Kompositionsstufen zu kumulieren und damit den Attributwert für einen *Fabrikprozess* der höheren Kompositionsstufe zu bestimmen. Ein Beispiel hierzu ist die Ermittlung der Durchlaufzeit einer Prozesskette aus den Durchlaufzeiten der Einzelprozesse. Werden dabei produktabhängige Attribute einbezogen, so ergeben sich mehrere kumulierte Werte. Dieselbe Vorgehensweise ist prinzipiell für Prozessgruppen möglich. Sind bspw. alle Montageprozesse in der Fabrik sehr flexibel, dann kann die Prozessgruppe „alle Montageprozesse“ insgesamt als flexibel bezeichnet werden.

3.6.2 Bestimmung von Attributausprägungen

Die Ausprägungen quantitativer Attribute sind Mengen- und Messwerte. Neben quantitativen Attributen werden im *FE-Modell* sowie im *FP-Modell* qualitative Attribute verwendet. Für qualitative Attribute werden Messmodelle aufgestellt, welche die empirischen Begriffe mit dem theoretischen Begriff des qualitativen Merkmals verbinden. Durch diese Messmodelle erfolgt die Definition des qualitativen Attributs und präzisiert es gegenüber einem subjektiven Begriffsverständnis bzw. einem definitorisch unterschiedlich interpretierbaren Begriff.³⁴⁹ Um die Ausprägung eines qualitativen Attributs bestimmen zu können, müssen im Rahmen der Aufstellung des Messmodells geeignete Skalen festgelegt werden. Als Skalenniveaus kommen prinzipiell die Nominalskala, Ordinalskala, Intervallskala und Verhältnisskala in Frage. Durch das Skalenniveau werden sowohl der Informationsgehalt der Daten als auch die Anwendbarkeit von Rechenoperationen festgelegt.³⁵⁰ Das erzielbare Skalenniveau ergibt sich aus den Instrumenten, die für die Ermittlung der Ausprägung eingesetzt werden können. Die Ausprägung einiger Merkmale lässt sich bspw. über Messwerte, z.B. Schalldruckpegel oder K-Wert herleiten, während für andere Attribute lediglich die Bewertung anhand von Erfüllungskriterien bzw. subjektiven Einschätzungen möglich ist.

Im Prinzip lassen sich drei Ansätze zur Ausprägungsbestimmung unterscheiden, die einen unterschiedlichen analytischen Aufwand und eine unterschiedliche Qualität der Eingangsdaten erfordern.³⁵¹

³⁴⁹ Vgl. Steyer; Eid (1993), S. 3.

³⁵⁰ Vgl. Backhaus et. al. (1994), S. XIII-XV.

³⁵¹ Vgl. Zangemeister (2000), S. 120.

- *Analytisch berechnende Vorgehensweise*: Berechnung der Ausprägung eines qualitativen Attributs auf Grundlage von mathematisch-statistisch beschriebenen Wirkungszusammenhängen. Hier können Simulations-, Prognose- und/oder kriterienspezifische Berechnungsverfahren zu Anwendung kommen.
- *Analytisch beschreibende Vorgehensweise*: Abschätzung auf Basis im Unternehmen vorhandener Erfahrungen, ggf. unter Einbeziehung einfacher Berechnungen und Parameter.
- *Analytisch bewertende Vorgehensweise*: Abschätzung, z.B. durch Diskussion der Vor- und Nachteile von Gestaltungsalternativen für das Fabrikssystem im Projektteam. Das Ergebnis der Diskussion wird durch Zuweisung einer Ausprägung je Alternative auf einer vorzugebenden Punkteskala festgehalten.

3.6.3 Angabe von ergänzenden Objektinformationen

Bezogen auf die Elemente von Fabrikssystemen übernimmt das *Objektmodell* eine strukturierende und eine beschreibende Funktion.³⁵² Während die Modellschemata die Elemente strukturieren, werden sie mit den Klasseneigenschaften näher beschrieben. Allen Elementen der drei Partialmodelle, also Klassen, Instanzen, Attributen und Operationen können Informationen angehängt werden. Hierbei kann es sich z.B. um Planungswissen in Form von Listen, Tabellen, Grafiken, Flussdiagrammen, Berichten, Gedankenmodellen etc. handeln.³⁵³ Grundsätzlich lässt sich damit Wissen aller Wissensarten aus Abschnitt 2.3.1 objektbezogen strukturieren. Die Informationen lassen sich dabei wie folgt gliedern:

- *Allgemeingültige Informationen zu Objektklassen*: Hierbei handelt es sich um eine Klasse und ihre Eigenschaften betreffende Informationen, die für mehrere konkrete Modelle relevant sind und damit allgemeingültige und die Klasse beschreibende Grundinformationen liefern.
- *Spezifischen Informationen zu Instanzen*: Hierbei handelt es sich um Informationen zu Instanzen und ihren Eigenschaften sowie mit dem *Objektmodell* abgebildeter Relationen. Diese Informationen sind für ein bestimmtes Fabrikssystem bzw. bestimmte Aufgaben relevant.
- *Metainformationen über Modellelemente*: Diese Informationen geben Auskunft über die Bedeutung der Begriffe im Modell und die dem Modell zugrunde liegende Taxonomie.

³⁵² Vgl. Meierlohr (2003), S. 86 für die Unterteilung der Planungsinformationen bei der Fabrikgestaltung in strukturierende und beschreibende Informationen.

³⁵³ Vgl. Meierlohr (2003), S. 61 zu Wissensformen für die Erfassung und Aufbereitung von Planungswissen.

4 Abbildung der Relationen mit dem Relationenmodell

Die Struktur eines Systems bilden Systemelemente und die Relationen zwischen diesen Elementen. Im dritten Kapitel wurde das *Objektmodell* mit den drei Partialmodellen *FE-Modell*, *FP-Modell* und *PE-Modell* konzipiert. Mit dem *Objektmodell* werden die Elemente des Systems erfasst. Im vierten Kapitel wird nun das *Relationenmodell* entwickelt, mit dem die Zusammenhänge zwischen den Elementen abgebildet werden können. Die Zusammenführung des *Objekt-* und des *Relationenmodells* ergibt das Gesamtmodell der wissensorientierten Fabrikmodellierung (vgl. Abschnitt 2.4.3). Im Abschnitt 4.1 werden mit den semantischen Netzen und der Description Logics die Repräsentationsarten auf denen das *Relationenmodell* maßgeblich aufbaut sowie der hybride Modellansatz beschrieben. Im Abschnitt 4.2 erfolgt eine Systematisierung der Relationen, die zwischen den Elementen im Fabrikssystem bestehen können. Letztendlich wird im Abschnitt 4.3 eine Erweiterung des *Relationenmodells* mit zusätzlichen Informationen bis hin zu ersten formalen Repräsentationsansätzen für Fabrikplanungswissen vorgenommen, bevor im Abschnitt 4.4 eine Diskussion des hybriden Modellansatzes erfolgt.

4.1 Konzeption des hybriden Gesamtmodells

In den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 werden die Grundzüge der Wissensrepräsentation mit semantischen Netzen und der Description Logics aufgeführt. Beide Formalismen werden später für die Entwicklung des *Relationenmodells* verwendet. Die Ausführungen sind in Umfang und Tiefe dem ingenieurwissenschaftlichen Anwendungsbereich dieser Arbeit angepasst. Für tiefer gehende Ausführungen wird auf die in den Abschnitten angegebene einschlägige Fachliteratur der Informatik verwiesen. Im *Relationenmodell* werden zum großen Teil Konzepte verwendet, welche aus der Transformation der Modellkonstrukte der OOM in Konzepte der DL resultieren. Die Verknüpfung der OOM des *Objektmodells* und der DL des *Relationenmodells* im Rahmen eines hybriden Modellansatzes erfolgt im Abschnitt 4.1.3.

4.1.1 Semantische Netze und Ontologien

Mit einem semantischen Netz werden Beziehungen zwischen Konzepten mit lexikalisch-semantischen Relationen widergespiegelt.³⁵⁵ Bei dem Netz handelt es sich um einen gerichteten Graphen, der eine Menge von Konzepten über Relationen in Verbindung setzt. In einer grafischen Darstellung werden Konzepte durch Knoten und Relationen durch Kanten repräsentiert. Die Verwendung der Begriffe Knoten und Kanten erfolgt in Analogie zur Graphentheorie. Existieren in einem Netzwerk unterschiedliche Kantentypen spricht man von einem semantischen, andernfalls lediglich von einem assoziativen Netz. Die Stärke der assoziativen

³⁵⁵ Vgl. Chaffin (1992), S. 253.

Bindung kann durch numerischen Angaben oder die Liniendicke angegeben werden.³⁵⁶

Mit semantischen Netzen lassen sich unter anderem Suchanfragen auf Konzepte effektiver als auf unstrukturierte Informationen und Daten gestalten, z.B. weil die Anzahl der Kanten zwischen zwei Konzepten tendenziell einen Schluss über ihre inhaltliche Nähe erlaubt.

In einem semantischen Netz können mit den Konzeptklassen, den zu diesen gehörenden Individualkonzepten und Attributen drei unterschiedliche Knotenarten auftreten.³⁵⁷ Konzepte haben Eigenschaften, die als Attribute bezeichnet und die über Kanten mit dem Konzeptbegriff verbunden werden. Die Individualkonzepte besitzen die Eigenschaften ihrer Konzeptklasse, die um spezifische Eigenschaften ergänzt werden können. In Bild 4-1 ist ein semantisches Netz beispielhaft abgebildet.

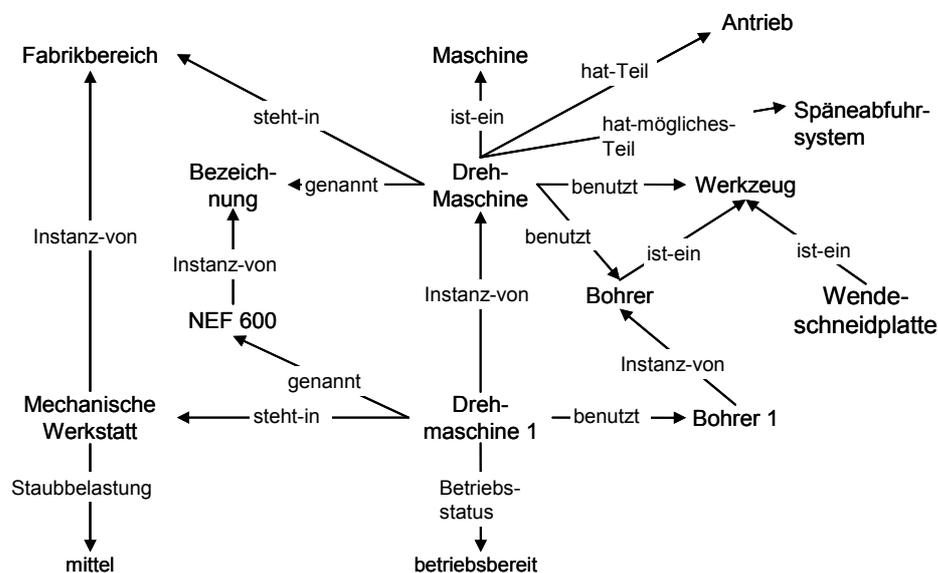


Bild 4-1: Beispiel für ein semantisches Netz

Konzeptklassen können durch Gruppierung zu Konzeptklassen höherer Ordnung auf Basis eines Gruppierungskriteriums, z.B. einer Eigenschaftsklasse, zusammengefasst werden. Bei der Beziehung zwischen Drehmaschine-1 und Drehmaschine handelt es sich bspw. um eine Instanzierung und zwischen Drehmaschine und Maschine um eine Gruppierung.³⁵⁸

Auf der Symbolebene von semantischen Repräsentationen können Operationen, d.h. Inferenzen ausgeführt werden. Bild 4-2 zeigt ein entsprechendes Anfragenetz für die Frage „Welche Drehmaschine in der mechanischen Werkstatt benutzt den Bohrer 1?“.

³⁵⁶ Vgl. Reimer (1991), S. 79.

³⁵⁷ Vgl. Reimer (1991), S. 79 und S. 85.

³⁵⁸ Vgl. Reimer (1991), S. 92.

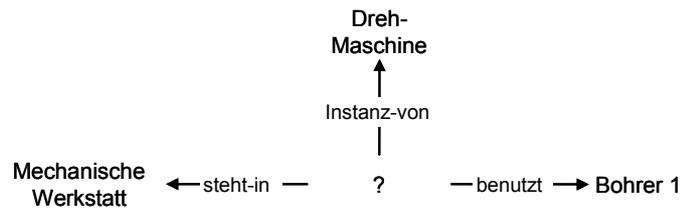


Bild 4-2: Beispiel für eine Anfrage an ein semantisches Netz

Auf diese Frage gibt es zunächst nur die Antwort „Drehmaschine 1“, denn dies ist die einzige Belegungsmöglichkeit für den Knoten „?“ . Wird der Knoten Drehmaschine derart interpretiert, dass auf die vorhandene Beziehung „genannt“ weiterverwiesen wird, so erzielt man das Anfrageergebnis „NEF 600“ .³⁵⁹

Neue Forschungsfelder in der Informationstechnik, denen der Ansatz der semantischen Netze zugrunde liegt, sind Ontologien und im Besonderen das Semantic Web.³⁶⁰ Ontologien dienen dazu, Metadaten über Daten zu erzeugen, die dabei helfen, Daten nicht nur als Text sondern als Information und somit in ihrem Bedeutungszusammenhang zu verarbeiten. Ontologien werden außer für das Semantic Web für weitere Zwecke, wie die natürliche Sprachverarbeitung oder das Wissensmanagement genutzt.³⁶¹ In der Literatur werden verschiedene Ontologie-Typen z.B. nach den Kriterien Komplexität der internen Struktur und Gegenstand der Konzeptualisierung unterschieden.³⁶² Mit dem Aufkommen des Semantic Web wurden neue, webbasierte Auszeichnungssprachen wie SHOE, RDF oder OWL entwickelt, mit denen Ontologien erstellt werden können.³⁶³ Weiterhin eignet sich die Description Logics in Verbindung mit der OWL zur Repräsentation von Ontologien.³⁶⁴ Die Differenzierung von Ontologien zu anderen Begriffen wird an dieser Stelle mit Hilfe folgender Definition vorgenommen:

*“An ontology may take a variety of forms, but it will necessarily include a vocabulary of terms and some specification of their meaning. This includes definitions and an indication of how concepts are inter-related which collectively impose a structure on the domain and constrain the possible interpretation of terms.”*³⁶⁵

³⁵⁹ Vgl. Reimer (2001), S. 121-126.

³⁶⁰ Vgl. Shadbolt et al. (2006) zum Semantic Web und den Standards RDF, XML und OWL.

³⁶¹ Vgl. Gómez-Pérez et al. (2004), S. 8 und Berger et al. (2004), S. 84. Berger et. al. verwenden Ontologien z.B. im Rahmen des Wissensmanagements und der Entwicklung eines Dokumentenmanagementsystems für eine wandlungsfähige Montage.

³⁶² Vgl. Gómez-Pérez et al. (2004), S. 26-34. Ontologie-Typen werden bspw. nach der Struktur: Glossare, informelle „ist-ein“-Hierarchien, Frames bzw. nach dem Gegenstand: Wissensrepräsentationen, Top-level Ontologien oder Domänen-Ontologien systematisiert.

³⁶³ Vgl. Gómez-Pérez et al. (2004), S. 201. Die Syntax webbasierter Auszeichnungssprachen basiert auf existierende Auszeichnungssprachen wie HTML oder XML.

³⁶⁴ Vgl. May (2006), S. 488.

³⁶⁵ Uschold; Jasper (1999).

Das Begriffsverständnis des Zitats zu Grunde legend haben die Arbeiten zum *Objektmodell* aus dem dritten Kapitel als auch zum *Relationenmodell* in diesem Kapitel nicht den Aufbau einer Ontologie zum primären Ziel, weil die Semantik der verwendeten Konzepte nicht im Vordergrund steht. Die neu entwickelten webbasierten Auszeichnungssprachen für Ontologien können jedoch prinzipiell dazu genutzt werden, dass in dieser Arbeit entwickelte Gesamtmodell mit Hilfe eines Werkzeuges zu implementieren.³⁶⁶

4.1.2 Description Logics

Semantische Netze werden mit zunehmender Komplexität ihrer Strukturen schwer interpretierbar und rechnerisch verarbeitbar. Die Notwendigkeit einer präzisen Charakterisierung der Bedeutung von Konzepten und Relationen führte zur Entwicklung von Beschreibungssprachen, welche die Syntax und eine entsprechende Semantik zur Interpretation der Syntax vorgeben. Diese Beschreibungssprachen wurden in den letzten Jahren unter dem Namen Description Logics (DL) bekannt.³⁶⁷ Die meisten dieser Beschreibungssprachen sind eine Untermenge der Prädikatenlogik erster Stufe und entscheidbar. Das ermöglicht es, über eine Beschreibungslogik zu schließen und somit aus vorhandenem Wissen neues Wissen zu generieren.³⁶⁸ Hiermit wird ein früher genannter Nachteil von semantischen Netzen, die eingeschränkte Mächtigkeit in Bezug auf die Abbildung logischer Ausdrücke, aufgehoben.³⁶⁹

Die grundlegenden syntaktischen Bausteine der DL sind atomare Konzepte, atomare Rollen und Individuen. Atomare Konzepte sind unäre Prädikate, atomare Rollen binäre Prädikate und Individuen Konstanten.³⁷⁰ Atomare Konzepte werden als eine Menge von Individuen und atomare Rollen als eine Menge von Paaren zwischen Individuen interpretiert.³⁷¹ Wird die Begrifflichkeit semantischer Netze auf die DL übertragen, so können atomare Konzepte mit Konzeptklassen, Individuen mit Individuumkonzepten und atomare Rollen mit Relationen verglichen werden. Der originäre Anwendungsbereich der DL ist die Repräsentation von konzeptbezogenen Wissen durch die Beschreibung von Beziehungen zwischen diesen Konzepten. Charakteristisch für die DL ist die Fähigkeit, eine Vielzahl unterschiedlicher Relationen auch zwischen Individuen abbilden zu können.³⁷²

Eine typische DL Wissensbasis (WB) besteht aus den zwei Komponenten TBox und ABox

³⁶⁶ Vgl. Kraft; Schneider (2005), S. 6-8 zur Abbildung von Ontologien mit dem Werkzeug Protégé.

³⁶⁷ Als Ausgangsbasis dient i.d.R. eine der Logiken AL (attributive language) oder ALC (attributive language with complement). Vgl. hierzu Schmidt-Schauß; Smolka (1991) für Grundlagen zur AL und May (2006), S. 493.

³⁶⁸ Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 2-3 und S. 9-12.

³⁶⁹ Vgl. Reimer (1991), S. 108 und S. 136-144. Reimer verweist bereits darauf, dass es über erweiterte Modellierungsformen prinzipiell möglich ist, die Mächtigkeit der Prädikatenlogik erster Ordnung mit semantischen Netzen darzustellen. Nach May (2006), S. 492 sind Semantische Netze dennoch primär ein grafischer Formalismus.

³⁷⁰ Vgl. Baader; Nutt (2003), S. 44.

³⁷¹ Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 7.

³⁷² Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 22-23.

(vgl. Bild 4-3). Erstere beinhaltet allgemeingültiges Wissen über eine Problemdomäne und beschreibt die Eigenschaften von Konzepten, während die ABox spezifisches Wissen über Individuen des konkreten Betrachtungsbereiches enthält. Das allgemeingültige Wissen ist gewöhnlich konstant, während das Wissen der ABox von spezifischen Situationen abhängig ist und einer kontinuierlichen Veränderung unterliegt.³⁷³

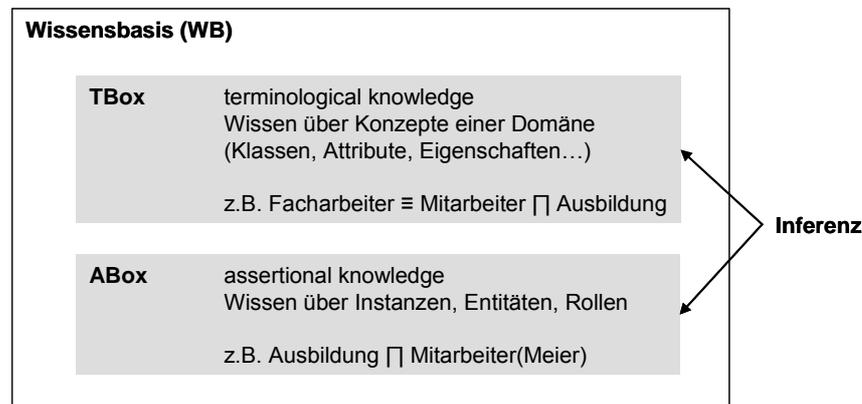


Bild 4-3: TBox und ABox der Description Logics³⁷⁴

Konzeptbeschreibungen bzw. komplexe Sätze werden in der DL durch die logische Verknüpfung von atomaren Sätzen, das sind atomare Konzepte und atomare Rollen, mit den Operatoren $\neg, \cap, \cup, \forall, \exists, \bar{}$ aufgebaut.³⁷⁵ Neben der „Grundvariante“ der DL gibt es eine Reihe von Erweiterungen, die sich in den jeweils durch die Sprache zur Verfügung gestellten logischen Verknüpfungen und Konstrukten unterscheiden.³⁷⁶ In der Grundvariante werden die Konzeptbeschreibungen C und D z.B. mittels folgender Syntaxregeln aufgebaut:³⁷⁷

C, D	$\rightarrow A$		(atomares Konzept)
	Δ		(universales Konzept)
	\perp		(leeres Konzept)
	$\neg A$		(Negation)
	$C \cap D$		(Schnittmengenbildung)
	$\forall RC$		(Wertebereichsbeschränkung)
	$\exists R\Delta$		(existenzielle Quantifizierung)

³⁷³ Vgl. Nardi; Brachman (2003), S. 12-13.

³⁷⁴ In Anlehnung an Baader; Nutt (2003), S. 46.

³⁷⁵ Grundlagen der Logik siehe z.B. Russel; Norvig (2004), S. 256-270 oder Schöning (2000), S. 13-22 und S. 49-58. Die Symbole stehen der Reihe nach für Negation (nicht), Konjunktion (und), Disjunktion (oder), Allquantor („für alle...“) und Existenzquantor („es gibt ein...“). Das Symbol $\bar{}$ steht für die Inversion.

³⁷⁶ Für Erweiterungen siehe bspw. *ALCN* bei Baader; Nutt (2003), S. 90-91; *ALCQI* bei Calvanese et al. (1998) oder *ALCNH_{R+}* bei Haarslev et al. (2001).

³⁷⁷ Vgl. Baader; Nutt (2003), S. 47-48.

Die Äquivalenz von zwei Konzepten wird mit $C \equiv D$ ausgedrückt. Eine spezifische Domäne wird mit Aussagen über Individuen in der ABox beschrieben. Die Aussage $C(a)$ drückt aus, dass a ein Individuum des Konzepts C ist und $R(a,b)$ gibt an, dass das Individuum b die Rolle R für das Individuum a erfüllt.

Die DL wird in dieser Arbeit als Beschreibungssprache für das *Relationenmodell* verwendet und damit gegenüber potenziellen Alternativen wie der Graphentheorie³⁷⁸, MultiNet³⁷⁹ oder der Prädikatenlogik erster Stufe³⁸⁰ aus folgenden Gründen bevorzugt:

- Die Trennung der Wissensbasis in TBox und ABox ist konsistent zu dem hybriden Modellansatz dieser Arbeit, bei dem Konzeptbeschreibungen mit dem *Objektmodell* und Relationen vorwiegend mit dem *Relationenmodell* abgebildet werden. Die T-Box enthält die aus dem *Objektmodell* abgeleiteten Konzepte und die A-Box das *Relationenmodell* mit dem Wissen über Instanzen und Relationen.
- Die Mächtigkeit der Logik erster Stufe ermöglicht das logische Schließen über die Repräsentation. Somit kann von einer vorliegenden Wissensrepräsentation neues, nicht explizit beschriebenes Wissen abgeleitet werden.³⁸¹
- Der logische Formalismus der DL liegt zu großen Teilen den mit dem Semantic Web entstandenen Auszeichnungssprachen wie OIL, DAML+OIL und OWL zugrunde.³⁸² Diese Sprachen und zukünftige Weiterentwicklungen können somit zur Implementierung der Wissensrepräsentation in digitale Fabrikplanungswerkzeuge genutzt werden.

4.1.3 Verknüpfung von Objektorientierter Modellierung und Description Logics

Mit dem in Kapitel 3 entwickeltem Modellschema für ein *Objektmodell* werden die für die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb relevanten objektbezogenen Informationen erfasst. Weiterhin erfolgt die Vorgabe ausgewählter Relationen, z.B. zwischen Prozessen und Prozessressourcen oder Klassen und Unterklassen und von Klasseneigenschaften in Form von Attributen und Operationen. Mit der Erstellung von Instanzen der im *Objektmodell* vorgegebenen *Basis-FE*, *Basis-FP* und *Produktelemente* werden die Elemente eines konkreten Fabriksystems erzeugt.

Mit dem *Objektmodell* werden Objekte und Objektinformationen für ein konkretes Fabrikssystem systematisch abgebildet, eine semi-formale oder formale Wissensrepräsentation für dieses

³⁷⁸ Vgl. Beierle; Kern-Isberner (2006), S. 451-465.

³⁷⁹ Vgl. Helbig (2006).

³⁸⁰ Vgl. Russel, Norvig (2004), S. 301-327.

³⁸¹ Die DL besitzt eine entsprechende Mächtigkeit, die der Weiterentwicklung der Wissensrepräsentation in digitalen Fabrikmodellen weniger Grenzen auferlegt, als es alternative Sprachen täten. Das logische Schließen wird in dieser Arbeit beispielhaft für erste Anwendungen demonstriert.

³⁸² Vgl. Baader et al. (2004), S. 7 und S. 13-15 sowie May (2006), S. 498-500.

Fabrikssystem findet bisher jedoch nicht explizit statt.³⁸³ Diese wird erst mit der Verknüpfung von *Objekt-* und *Relationenmodell* realisiert. Das *Objektmodell* basiert auf einer objektorientierten Modellierungsmethode, während das zweite Modell auf der im Abschnitt 4.1.2 eingeführten Description Logics beruht, weshalb auch von einem hybriden Modellansatz gesprochen werden kann.³⁸⁴ Bei diesem hybriden Modellansatz erfolgen die Abbildung der Dinge und deren allgemeingültige Beziehungen mit der UML und die der konkreten Beziehungen mit der DL.

Zwischen den beiden Modellierungsarten bestehen Parallelen, z.B. bei den verwendeten Modellelementen und -eigenschaften. Hierzu gehören bspw. die Instanzierung oder semantisch-lexikalische Relationen. In der Informatik wurden bereits erfolgreich objektorientierte Datenmodelle in die DL überführt oder die Machbarkeit von Transformationen nachgewiesen.³⁸⁵ Die Speicherung von Daten und Informationen in Datenbanksystemen und ihre Verwendung für Wissenssprachen wurde in der Literatur ebenfalls beschrieben und in dieser Arbeit in vergleichbarer Weise umgesetzt.³⁸⁶ Das für diese Arbeit ein hybrider Modellansatz verfolgt wird und z.B. nicht das komplette Modell auf der DL aufbaut, hat folgende zwei Gründe:

- Die OOM besitzt eine closed-world-Semantik und führt damit zu einem konstanten Datenmodell, welches in Datenbanken leicht nachgebildet werden kann.³⁸⁷ Sie liegt bestehenden Werkzeugen der Digitalen Fabrik zugrunde und erweist sich als praktikablere Alternative zur systematischen Erzeugung und Verwaltung von Objekten.
- Die DL besitzt eine open-world-Semantik, die es für ein konkretes Fabrikssystem erlaubt, beliebige Relationen zwischen Individuen zu beschreiben oder neue spezielle Konzepte zu erzeugen. Sie unterscheidet sich damit von datenbankorientierten Modellen, bei denen davon ausgegangen wird, dass die modellierte Struktur vollständig ist. Über eine DL-Repräsentation kann aufgrund des Übergangs zur Logik erster Stufe zudem geschlossen werden. Beide Sachverhalte sind mit der OOM nicht realisierbar.³⁸⁸

Die Verknüpfung der beiden Modelle erfolgt über die Transformation der Klassen der OOM zu Konzepten der DL und den Instanzen der OOM zu Individuen der DL. Erstere werden in

³⁸³ Vgl. Abschnitt 2.3.1 zum Wissensbegriff und zur Wissensrepräsentation.

³⁸⁴ Nardi und Brachman (2003), S. 16 verweisen auf hybride Wissensbasen, bei denen z.B. für die A-Box Logische Programmierung und für die T-Box die DL Anwendung finden. Die Wissensbasis in dieser Arbeit ist selbst nicht hybrid, da die Klassen aus dem OOM in Konzepte der DL transformiert werden.

³⁸⁵ Vgl. Calvanese et al. (1998); Calvanese et al. (1999); Artale et al. (1996) und Sattler et al. (2003).

³⁸⁶ Vgl. Debenham (1998), S. 25-28.

³⁸⁷ Die Semantik von Datenmodellen wird als closed-world semantic bezeichnet, da exakt eine Interpretation der Welt abgebildet wird. Das bedeutet, dass die Informationen in Datenbanken als vollständig angenommen werden, während in der DL jederzeit von unvollständigen Informationen ausgegangen werden muss. Vgl. Baader; Nutt (2003), S. 68.

³⁸⁸ Vgl. Sattler et al. (2003), S. 164; Baader; Nutt (2003), S. 68; Russel; Norvig (2004), S. 439.

der TBox und Letztere in der ABox der DL-Wissensbasis abgelegt.³⁸⁹ Im Detail erfolgt die Transformation der Klassen und Instanzen der OOM durch eine Interpretation des Klassennamens sowie der zugehörigen Attributnamen und Operationennamen als Konzepte der DL.³⁹⁰ Dieser Ansatz ist entscheidend dafür, dass nicht nur Relationen zwischen ganzen Klassen bzw. Instanzen, sondern auch zwischen einzelnen Attributen und Operationen abgebildet werden können und der Informationsgehalt des Modells somit deutlich erweitert wird. Der Transformationsansatz ist in Bild 4-4 schematisch dargestellt.

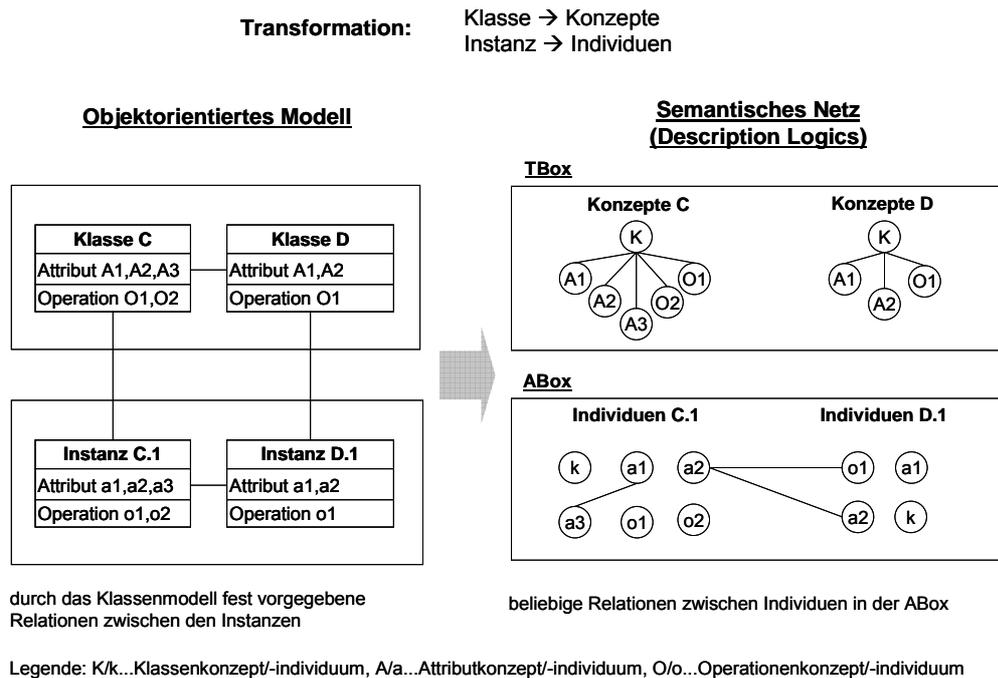


Bild 4-4: Schematische Darstellung des Transformationsansatzes

In der Darstellung wird gezeigt, dass eine Klasse in die drei Konzeptarten Klassenkonzept, Attributkonzept und Operationenkonzept transformiert wird. Während bei der OOM die Relationen zwischen Instanzen durch das Klassenmodell limitiert werden, lassen sich die Individuen, welche das Pendant zu den Instanzen sind, beliebig in Relation setzen.

Von *Basis-FE*, *Basis-FP* oder *Produktelementen* im *Objektmodell* erzeugte Instanzen werden als Individuen in Form von Klassenindividuen, Attributindividuen oder Operationenindividuen in die ABox aufgenommen. Klassen des *Objektmodells*, die lediglich eine ordnende und systematisierende Funktion haben, also nicht zu den aufgezählten Objekten gehören, werden in die TBox als Konzeptbeschreibung überführt.

³⁸⁹ Vgl. Wehner (2003), S. 29 zur Notwendigkeit der Transformation von Informationen am Beispiel von Featureinformationen in eine für die Wissensrepräsentation geeignete Darstellungsform.

³⁹⁰ Vgl. Abschnitt 4.1.1. und Reimer (1991), S. 84. Eigenschaften wie Attribute werden in semantischen Netzen mit Konzeptknoten abgebildet. Diese Vorgehensweise wird auf Operationen übertragen, welche nun ebenfalls wie Konzepte behandelt werden.

In Tabelle 4-1 sind die grundlegenden im *Relationenmodell* verwendeten atomaren Konzepte sowie entsprechende Symbole aufgeführt.

atomares Konzept	Symbol	Erläuterung
transformiertes Konzept	T	aus dem OOM transformiertes Konzept
FE-Konzept	FE	Menge aller transformierten Konzepte aus <i>FE-Klassen</i> mit $FE \subseteq T$
FP-Konzept	FP	Menge aller transformierten Konzepte aus <i>FP-Klassen</i> mit $FP \subseteq T$
PE-Konzept	PE	Menge aller transformierten Konzepte aus <i>PE-Klassen</i> mit $PE \subseteq T$
Klassenkonzept	K	Menge aller Klassen des OOM abstrahiert von der Eigenschaftsbeschreibung mit $(K \subseteq FE) \cup (K \subseteq FP) \cup (K \subseteq PE)$
Attributkonzept	A, A^K	Menge aller Attribute und Attribute einer bestimmten Klasse
Operationenkonzept	O, O^K	Menge aller Operation und Operationen einer bestimmten Klasse

Tabelle 4-1: Grundlegende atomare Konzepte des Relationenmodells

Die Anbindung an das objektorientierte Schema erfolgt durch das Mapping von Klassen, Attributen und Operationen zu Konzeptausdrücken der DL.³⁹¹ Jede Klasse des *Objektmodells* wird zunächst zu einem atomaren Konzept K_i und jedes Attribut bzw. jede Operation, unabhängig von der Klasse in der sie verwendet werden, zu A_j bzw. O_k zugeordnet. Bei den Konzepten K_i wird von der Eigenschaftsbeschreibung der Klassen des *Objektmodells* abstrahiert. Alle K_i werden als atomare Klassenkonzepte, alle A_j als atomare Attributkonzepte und alle O_k als atomare Operationenkonzepte bezeichnet. Die atomaren Klassenkonzepte sind eine Teilmenge entweder des *FE-Konzeptes*, des *FP-Konzeptes* oder des *PE-Konzeptes*.

Die Klassen und Klasseneigenschaften des *Objektmodells* werden wie folgt mit komplexen Sätzen in Konzepte der TBox überführt:

Klassenkonzepte

K_{100} , z.B. flurfreie Fördermittel mit $K_{100} \subseteq FE$

K_{101} , z.B. Elektrohängebahn mit $K_{101} \subseteq K_{100}$

³⁹¹ Vgl. eine ähnliche Vorgehensweise bei Sattler et al. (2003), S. 169.

Attributkonzepte

A_i , z.B. Kapazität mit $A_i \subseteq A$

$$A_{10}^{K_{101}} \equiv K_{101} \cap \exists \text{hatAttribut}.A_i \text{ mit } A_i^{K_{101}} \subseteq FE, A_i^{K_{101}} \subseteq A_i$$

z.B. Kapazität einer Elektrohängebahn

Operationenkonzepte

O_i , z.B. Verlängern mit $O_i \subseteq O$

$$O_5^{K_{101}} \equiv K_{101} \cap \exists \text{hatOperation}.O_i \text{ mit } O_i^{K_{101}} \subseteq FE, O_i^{K_{101}} \subseteq O_i$$

z.B. Verlängerung der Elektrohängebahn

Die gewählten Symbole sind atomar, d.h. es haben z.B. A, K und i als Bestandteile des Symbols keine Bedeutung. Sie geben dem Leser jedoch einen mnemonischen Hinweis, in diesem Fall z.B. darauf, dass das Konzept $A_{10}^{K_{101}}$ das k-te von der Klasse K_i abgeleitete Attributkonzept ist.³⁹² Die Instanzen von Klassen werden in die ABox (z.B. für eine spezifische Elektrohängebahn) mit

$K_{101}(EHBxyz)$,

$A_{10}^{K_{101}}(\text{Kapazität_}EHBxyz)$

$O_5^{K_{101}}(\text{Verlängern_}EHBxyz)$

aufgenommen. Hiermit kann aus der Wissensbasis geschlussfolgert werden, dass z.B. *Verlängern_EHBxyz* eine Operation darstellt oder dass es sich bei der *EHBxyz* um ein flurfreies Fördermittel handelt. Dies wäre bereits aus dem *Objektmodell* für den Modellnutzer ersichtlich, kann nun jedoch logisch aus der Wissensbasis geschlossen werden.

4.2 Abbildung von Relationen in der ABox

In diesem Abschnitt erfolgt die Spezifikation der Verwendung von Relationen im *Relationenmodell*. Hierzu wird im Abschnitt 0 zunächst eine Systematik erarbeitet, welche die differenzierte Betrachtung von Relationen erlaubt. Während im Abschnitt 0 lexikalisch-semantiche Relationen und ihre Verwendung in Abhängigkeit von den in Relation stehenden Konzeptarten vorgeschlagen werden, wird im Abschnitt 4.2.3 die Nutzung in Abhängigkeit von den in Relation stehenden Partialmodellen aufgezeigt.

4.2.1 Systematik der Relationen

Der Relationsbegriff steht im engen Zusammenhang mit den Begriffen Struktur und System

³⁹² Vgl. Russel; Norvig (2004), S. 261.

aus der Systemtheorie, bei der unter der Struktur eines Systems die Menge aller Relationen zwischen den Systemelementen verstanden wird (vgl. Abschnitt 2.1.1). Er ist nicht mit dem Begriff Zusammenhang oder Korrelation gleichzusetzen. Letztere implizieren, dass die Veränderung eines Objekts oder Elements direkt im Zusammenhang mit der Veränderung eines anderen Objektes steht. Eine Relation besteht jedoch bereits, wenn kein unmittelbarer Zusammenhang vorliegt und zwei Objekte lediglich in Beziehung etwa hinsichtlich ihrer Größe oder Lage gesetzt werden.

Relationen können zwischen mehreren Objekten bestehen, wobei von n-stelligen Relationen gesprochen wird, oder einen Selbstbezug bei 1-stelligen Relationen aufweisen.³⁹³ Für die Abbildung des Semantischen Netzes mit dem Relationenmodell, soll die Verwendung 2-stelliger Relationen genügen. Diese lassen sich prinzipiell in die Grundformen „relationship of equivalence“, „relationship of hierarchy“ und „relationship of association“ differenzieren lassen.³⁹⁴ Das *Relationenmodell* wird vor allem „relationships of association“ und im Besonderen Ursache-Wirkungs-Relationen enthalten.³⁹⁵

Mit der Transformation der Klassen der drei objektorientierten Partialmodelle zu Konzepten der DL wird die TBox mit einer Vielzahl von Konzeptbeschreibungen gefüllt. Diese gehören jeweils einer der drei im vorangegangenen Abschnitt abgeleiteten Konzeptarten Klassen-, Attribut- oder Operationenkonzept an. Die Individuen der Konzepte können in der ABox vom Prinzip her durch die Definition von Rollen beliebig in Relation gesetzt werden. Diese Beliebigkeit hat jedoch eine Reihe von Nachteilen. Hierzu gehören das leichte Auftreten inkonsistenter Beziehungen, ein reduziertes Verständnis insbesondere bei unterschiedlichen Modellnutzern und eine unhandliche Modellkomplexität. Für das *Relationenmodell* wird deshalb

- eine sachlogisch begründete Einschränkung des Freiheitsgrades bei der Erstellung von Knotenpaaren,
- eine das *Objektmodell* ergänzende, d.h. Redundanz vermeidende Relationenabbildung sowie
- die Verwendung eines Grundvokabulars, welches möglichst so formuliert ist, dass es domänenunabhängig und damit unabhängig vom dargestellten Weltausschnitt ist³⁹⁶

angestrebt. Um diese Ziele zu erreichen, ist es zunächst notwendig, die potenziellen Relationen systematisch zu betrachten. Hierzu ist in Bild 4-5 ein morphologisches Schema mit

³⁹³ Vgl. Reimer (1991), S. 36-37.

³⁹⁴ Vgl. Bean et al. (2002), S. viii-ix. Wissenschaftliche Arbeiten zur Semantik haben bisher noch nicht zu einer allgemein anerkannten Typologisierung des vielfältigen Relationstyps „relationships of association“ geführt, weshalb im Relationenmodell auf eine Differenzierung zwischen Typen verzichtet wird.

³⁹⁵ Vgl. et al. Khoo (2002).

³⁹⁶ Vgl. Reimer (1991), S. 81-82. Es ist sinnvoll, ein Grundvokabular zu vereinbaren, um die Lesbarkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Netzausschnitte durch unterschiedliche Modellnutzer sicherzustellen.

Merkmale von Relationen und ihren Ausprägungen dargestellt.

verbundene Konzeptarten ³⁹⁷	<i>Klasse zu Klasse</i>	Klasse zu Attribut	Klasse zu Operation	Attribut zu Attribut	Attribut zu Operation	Operation zu Operation
zugrunde liegendes Partialmodell ³⁹⁸	PE zu PE	PE zu FP	PE zu FE	FP zu FP	FP zu FE	FE zu FE
Klassen-zugehörigkeit	intern (Konzepte sind von der selben Klasse abgeleitet)		extern (Konzepte sind von unterschiedlichen Klassen abgeleitet)			
Relationstyp	relation of equivalence (hyponomie) z.B. „ist-eine“- Beziehungen	<i>relation of hierarchy (meronomy)</i> z.B. <i>Teil-Ganzes- Beziehungen</i>		relation of association z.B. Ursache- Wirkungs-Beziehung		

Bild 4-5: Merkmale und ihre Ausprägungen für Relationen im Relationenmodell

Aus den in Bild 4-5 aufgeführten Merkmalen und ihren Ausprägungen wird die Vielfalt der Beziehungen zwischen den Konzepten deutlich. Nur Merkmalsausprägungen die grau hinterlegt sind, werden im *Relationenmodell* berücksichtigt. Die Merkmalsausprägungen „Klasse zu Attribut“ und „Klasse zu Operation“ wurden ausgeschlossen, da die Beziehungen keinen hohen Informationsgehalt aufweisen und durch die in der Zeile folgenden Knotenpaare spezifischer ausgedrückt werden können.³⁹⁹ Außerdem werden klasseninterne Relationen dieser Art bereits mit dem *Objektmodell* erzeugt. Die Beziehungen zwischen Elementen werden im *PE-Modell* vernachlässigt, da sie keine Relevanz für die Anwendungsgebiete der wissensorientierten Fabrikmodellierung besitzen. Und der Relationstyp „relationship of equivalence“ wird durch das *Objektmodell* und seinen Klassenbeschreibungen hinreichend abgedeckt und folglich nicht mit der DL nachgebildet.

Eine Besonderheit bilden die in dunklem grau hinterlegten Felder „Klasse zu Klasse“ und „relationship of hierarchy“. Beide Ausprägungen dürfen nur in Kombination angewendet werden. Sie dienen dazu, Gruppierungen von *Fabrikelementen* abzubilden. Mit der Beziehung „ist-Teil-von“ kann dem Konzept „Drehmaschine“ z.B. das Konzept „Antrieb“ zugeordnet werden. Für Konzepte des *PE-Modells* und des *FP-Modells* wird keine „relationship of hierarchy“ zugelassen, da diese bereits mit der OOM abgebildet werden kann.

³⁹⁷ Klasse, Attribut und Operation stehen der Reihe nach für Klassen-, Attribut- und Operationenkonzept.

³⁹⁸ Das zugrunde liegende Partialmodell ist das Modell, zu dem die Klasse gehört von der das Konzept abgeleitet wurde. PE, FP und FE stehen dementsprechend der Reihe nach für das *PE-Modell*, *FP-Modell* und *FE-Modell*.

³⁹⁹ Die Relation „Das Werkzeug ist maßgeblich für die Prozessdauer“ hat z.B. eine geringe Aussagekraft gegenüber der mehr spezifischen Relation „Der Werkstoff des Werkzeugs ist maßgeblich für die Prozessdauer“.

4.2.2 Relationen nach verbundenen Konzeptarten

Mit Verwendung von Relationenbezeichnungen erhöht sich die Komplexität des *Relationenmodells* trotz der im Abschnitt 0 getroffenen Einschränkungen. In diesem Abschnitt wird deshalb ein Grundvokabular erarbeitet, mit dem eine begrenzte Anzahl lexikalisch-semantischer Relationen zur Verwendung vorgeschlagen werden.

Die Knoten eines Knotenpaares können Klassen-, Attribut- oder Operationenkonzepte sein. In Abhängigkeit von der vorliegenden Knotenkombination unterscheiden sich auch die sachlogisch sinnvoll verwendbaren Bezeichnungen, weshalb das Grundvokabular entsprechend der vorliegenden Kombination differenziert aufgeführt wird (vgl. Tabelle 4-2). Alle Relationen sind gerichtete Beziehungen, um die Vereinbarkeit mit dem Rollenkonzept der DL sicherzustellen, bei der ein Individuum der Träger einer Rolle für ein anderes Individuum ist.⁴⁰⁰ Das hier erarbeitete Grundvokabular ist nicht abgeschlossen und somit als exemplarisches Vokabular zu verstehen, welches durch den Modellnutzer erweitert und angepasst werden kann.

Relationen zwischen Klassenkonzepten		$R(a,b)$, $K_i(a)$ und $K_j(b)$ mit $i \neq j$, K_i, K_j sind FE
In Übereinstimmung mit der Festlegung aus Abschnitt 0 können Relationen zwischen Klassenkonzepten nur für <i>Fabrikelemente</i> angelegt werden.		
KK1	ist-Teil-von(a,b)	Das Individuum b ist ein fester Bestandteil von Individuum a.
KK2	gehört-zu(a,b)	Individuum b ist ein unabhängiges Objekt, jedoch funktional auf Individuum a limitiert.
KK3	wird-benutzt-von(a,b)	Individuum b ist ein unabhängiges Objekt und wird (derzeit) vom Individuum a genutzt.
KK4	muss-entfernt-sein(a,b)	Individuum b muss von Individuum a einen bestimmten Abstand haben.

Relationen zwischen Attributkonzepten		$R(a,b)$, $A_i(a)$ und $A_j(b)$ mit $a \neq b$
Eine Relation zwischen zwei Attributkonzepten beschreibt die Abhängigkeit zwischen Attributen qualitativ und gibt unter anderem einen Aufschluss über die Veränderung einer Ausprägung bei Veränderung einer anderen Ausprägung.		
AA1	ist-Restriktion-für(a,b)	Das Individuum b ist eine nicht beeinflussbare Restriktion für das Individuum a.

AA2	ist-Eingangsgröße-für(a,b)	Individuum b ist eine Eingangsgröße bei der Planung von Individuum a.
AA3	wirkt-auf(a,b)	Die Veränderung von Individuum b wirkt sich auf Individuum a aus. Wirkt auch a auf b, dann muss eine zusätzliche Relation $R(b,a)$ in der ABox erzeugt wer-

⁴⁰⁰ Vgl. Baader; Nutt (2003), S. 59-60.

4 Abbildung der Relationen mit dem Relationenmodell

		den.
AA4	wirkt-möglicherweise-auf(a,b)	Die Veränderung von Individuum b wirkt sich unter bestimmten Bedingungen auf Individuum a aus. Diese können von der Art der Änderung von Individuum b als auch bestimmten Restriktionen abhängig sein.
AA5	wirkt-bestimmend-auf(a,b)	Das Individuum b hat einen bestimmenden Einfluss auf das Individuum a, wobei weitere Individuen existieren, die auf a einwirken.
AA6	ist-unabhängig-von(a,b)	Individuum a ist unabhängig von Individuum b.

Relationen zwischen Operationenkonzepten		$R(a,b)$, $O_i(a)$ und $O_j(b)$ mit $a \neq b$
Operationen sind Aktivitäten, die mit Objekten durchgeführt werden können. Die semantischen Ausdrücke zwischen den Knoten beschreiben somit funktionale und zeitliche Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten.		
OO1	ist-erforderlich-für(a,b)	Individuum b ist eine Voraussetzung für Individuum a, d.h. eine Operation hat vor einer anderen Operation zu erfolgen.
OO2	wird-ausgelöst-durch(a,b)	Individuum b löst Individuum a aus.
OO3	wird-gefolgt-von(a,b)	Individuum b folgt i.d.R. Individuum a.
OO4	läuft-parallel-zu(a,b)	Individuum b wird parallel zu Individuum a durchgeführt.
OO5	kann-parallel-laufen-zu(a,b)	Individuum b kann parallel zu Individuum a durchgeführt werden.

Relationen zwischen Attribut- und Operationenkonzepten		$R(a,b)$, $A_i(a)$ und $O_j(b)$
Kanten zwischen Attribut- und Operationsknoten bilden den Einfluss von Operationen auf Attribute ab.		
AO1	wirkt-auf(a,b)	Individuum b wirkt auf Individuum a.
AO2	wirkt-nicht-auf(a,b)	Ein Individuum b wirkt nicht auf ein Individuum a.

Relationen zwischen Operationen- und Attributkonzepten		$R(a,b)$, $O_i(a)$ und $A_j(b)$
Kanten zwischen Operations- und Attributknoten bilden den Einfluss von Attributen auf Operationen ab.		
OA1	wird-eingeschränkt-durch(a,b)	Die Ausführbarkeit eines Individuums a ist von einem Individuum b abhängig.
OA2	löst aus(a,b)	Eine bestimmtes Individuum b ist verantwortlich für die Durchführung eines Individuum a.
OA3	bestimmt-Aufwand-von(a,b)	Ein bestimmtes Individuum b bestimmt den Aufwand eines Individuum a.

Tabelle 4-2: Grundvokabular für das Semantische Netz

Bei den Relationen handelt es sich um gerichtete Beziehungen, wobei die Umkehrung der Richtung mit semantischen Mitteln möglich ist. Aus der Beziehung „wirkt-auf“ kann z.B. die Beziehung „wird-beeinflusst-von“ hergeleitet werden. Weiterhin können zwischen zwei Knoten mehrere Relationen bestehen, sofern diese widerspruchsfrei sind.

Mit dem Grundvokabular wurden semantische Begriffe eingeführt, die auch einen nicht vorhandenen Einfluss ausdrücken. Ihre Angabe ist z.B. sinnvoll, wenn der Sachverhalt so nicht zu vermuten wäre und durch die Modellierung eine zusätzliche Information aufgenommen wird.

Die Abbildung von Relationen im wissensorientierten Fabrikmodell durch den Modellnutzer entspricht der Dokumentation und damit der Explizierung von Wissen über ein Fabrikssystem. Dabei lassen sich nicht nur den Zustand eines geplanten oder realisierten Fabriksystems beschreibende Informationen festhalten, sondern auch in die Zukunft gerichtete antizipierte Sachverhalte abbilden.

4.2.3 Relationen nach verbundenen Partialmodellen

Mit dem *Relationenmodell* abgebildete Relationen werden in diesem Abschnitt hinsichtlich der Verknüpfung der drei Partialmodelle betrachtet. In Bild 4-6 wurde ein *Relationenmodell* schematisch dargestellt. Die zwischen den Konzeptarten prinzipiell zugelassenen Relationen wurden bereits mit dem morphologischen Schema in Bild 4-5 vorgegeben.

Die Instanzen der im *Objektmodell* erfassten *Basis-FE*, *Basis-FP* und *Produktelemente* sind in der Abbildung durch Kreise und ihre Relationen mit durchgängigen Linien dargestellt.⁴⁰¹ An den Kreisen sind die mit a, o und k bezeichneten Individuen der aus dem *Objektmodell* transformierten Konzepte angeordnet.

⁴⁰¹ Vgl. Abschnitt 3.5 für die Relationen im Objektmodell.

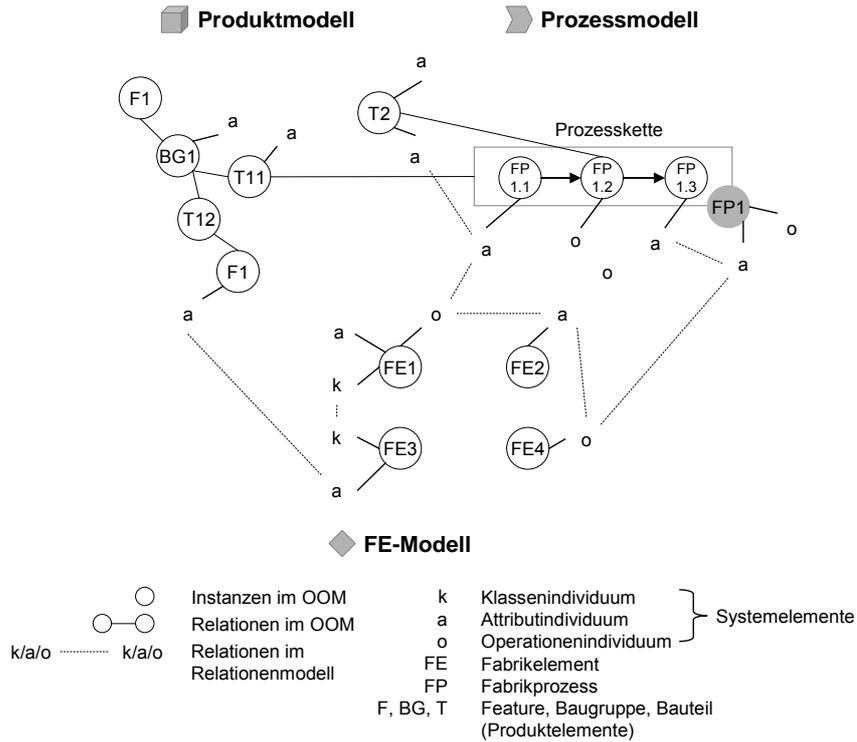


Bild 4-6: Elementen und ihren Relationen im Gesamtmodell

Im Bild 4-6 wird berücksichtigt, dass von *PE-Klassen* nur Attributindividuen, von *FP-Klassen* nur Attribut- und Operationenindividuen und von *FE-Klassen* Attribut-, Operationen- und Klassenindividuen vorhanden sein können. Die Relationen zwischen den Individuen wurden exemplarisch mit gestrichelten Linien dargestellt. In Tabelle 4-3 sind nun alle gültigen gerichteten Beziehungen zwischen den Partialmodellen zusammengefasst.⁴⁰²

Individuen der Partialmodelle		PE-Modell	FP-Modell		FE-Modell		
		a	a	o	a	o	k
PE-Modell	a		a→a	a→o	a→a	a→o	
	o						
FP-Modell	a	a→a	a→a	a→o	a→a	a→o	
	o	o→a	o→a	o→o	o→a	o→o	
FE-Modell	a	a→a	a→a	a→o	a→a	a→o	
	o	o→a	o→a	o→o	o→a	o→o	
	k						k→k

Tabelle 4-3: Matrix der gültigen Beziehungen im Relationenmodell

⁴⁰² In der Tabelle stehen der Reihenfolge nach k, a und o für Klassen-, Attribut- und Operationenkonzepte.

In den bisherigen Ausführungen wurde die Verwendung von Relationen in Abhängigkeit von den verbundenen Konzeptarten und den verbundenen Partialmodellen nur konzeptionell behandelt. In Bild 4-7 ist nun ein konkretes Beispiel für die in Tabelle 4-3 dunkelgrau hinterlegten Felder dargestellt.

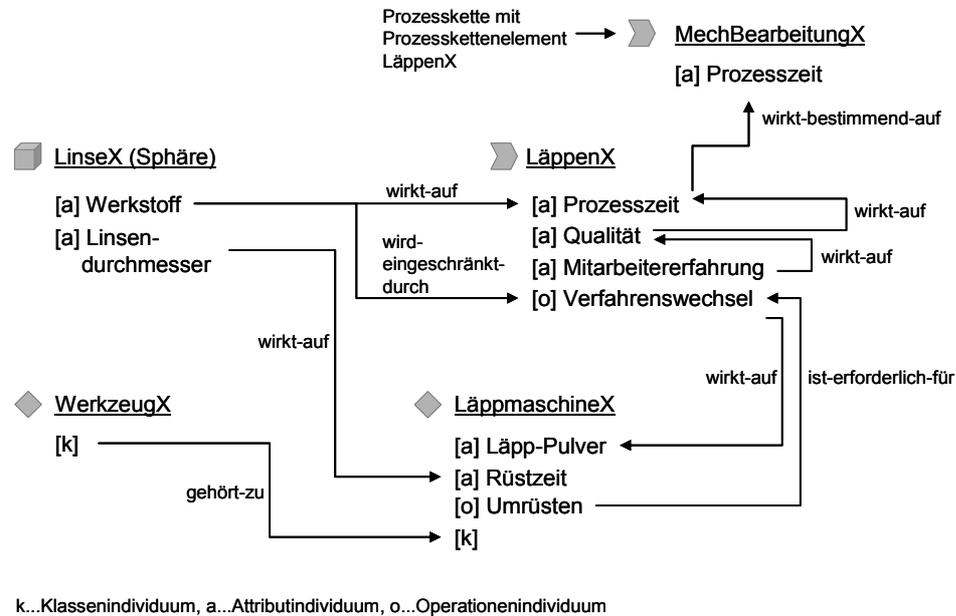


Bild 4-7: Beispiel für ein konkretes Relationenmodell

Die Bezeichnungen der Relationen sind unabhängig von der in diesem Abschnitt durchgeführten Differenzierung nach Partialmodellen. Prinzipiell hätten demnach für die im Bild 4-7 dargestellten Knoten alle für die jeweiligen Knotenpaare im Abschnitt 4.2.2 vorgeschlagenen lexikalisch-semantische Relationen verwendet werden können.

4.3 Erweiterung der Wissensbasis

Mit dem bisherigen Entwicklungsstand des Modellschemas zur wissensorientierten Fabrikmodellierung besteht die Wissensbasis nur aus Konzeptbeschreibungen in der TBox, die aus der Transformation von Objekten der OOM zu Konzepten der DL entstanden sind sowie den dazugehörigen Individuen und Rollen in der ABox. In den folgenden Abschnitten wird das *Relationenmodell* weiterentwickelt, sodass in der Wissensbasis zusätzliches Wissen abgebildet werden kann. Durch Informationen, Regeln und Formeln (vgl. Abschnitt 4.3.1), ergänzende komplexe Sätze (vgl. Abschnitt 4.3.2) und Produktionsregeln (vgl. Abschnitt 4.3.3) wird ein Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Wissensrepräsentation mit dem *Relationenmodell* gegeben.

4.3.1 Informationen, Regeln und Formeln

Das *Relationenmodell* kann mit relationsbezogenen Informationen, Regeln und Formeln ergänzt werden. In Analogie zur Anreicherung von Objekten mit objektbezogenen Informationen (vgl. Abschnitt 3.6.3) dienen relationsbezogene Informationen der weiteren Erläuterung und Präzisierung einer Relation. Folgende Informationen lassen sich z.B. erfassen:

- Angabe der Assoziationsstärke zwischen zwei Individuen auf einer Skala, z.B. um die Stärke der Wirkung bei der Relation „wirkt-auf“ auszudrücken bzw. allgemein die Bedeutung einer Beziehung anzugeben.
- Spezifizierung einer Wirkungsbeziehung, z.B. hinsichtlich der positiven/negativen Beeinflussung eines Attributes bei positiver/negativer Veränderung der anderen Attributausprägung.
- Vermerk von erklärenden Textinformationen oder Darstellungen an Relationen, z.B. für Relationen die abhängig von Bedingungen sind, wie bei der Relation „wirkt-möglicherweise-auf“.
- Markierung von zentralen Konzepten bzw. Individuen oder Konzepten bzw. Individuen mit besonderer Bedeutung im semantischen Netz.
- Angabe einer Reihenfolge von zu einem Knoten führenden bzw. abgehenden Beziehungen, z.B. zur Angabe einer Reihenfolge von auszuführenden Operationen.

Bei den relationsbezogenen Angaben handelt es sich noch nicht um eine Wissensrepräsentation (i.e.S.). Vielmehr werden in Verbindung mit dem semantischen Netz Informationen kontextbezogen und strukturiert aufbereitet. Eine „einfache“ Wissensrepräsentation (i.e.S.) erfolgt durch die Aufnahme von Regeln und Formeln in eine erweiterte Wissensbasis. Mit Aufnahme eines neuen Individuums eines Fabriksystems in die ABox können dessen Attributwerte nach einer Formel automatisiert berechnet oder die Befolgung einer Regel überprüft werden. Infolge einer Attributwertänderung im *Objektmodell* findet eine erneute Berechnung bzw. Überprüfung statt.

Ein Beispiel soll an dieser Stelle zur Erklärung dienen. In der TBox wird für die beiden Attributkonzepte *Wenderadius_Gabelstapler* und *Breite_Weg* die Formel $Breite_Weg = 1,5 \times Wenderadius_Gabelstapler$ hinterlegt. Der Bezug eines bestimmten Individuums „Gabelstapler_xyz“ zu einem Individuum „Weg_xyz“ wird vom Modellnutzer über die Angabe der Rolle *wird-benutzt-von(Weg_xyz, Gabelstapler_xyz)* in der ABox hergestellt. *Weg_xyz* und *Gabelstapler_xyz* sind Individuen der Klassenkonzepte *Weg* bzw. *Gabelstapler*, für die sich die entsprechenden Attributausprägungen aus dem *Objektmodell* abfragen und auswerten lassen.

Wird nun der Wenderadius durch den Modellnutzer vorgegeben, generiert sich automatisch ein Vorschlag für die anzunehmende Wegebreite. Bei einer nachträglichen Änderung des

Wenderadius oder der Angabe weiterer Relationen, die einen Einfluss auf die Wegebreite besitzen, kommt es zu weiteren Vorschlägen oder im Falle von Regeln zu Warnungen bei der Regelverletzung. Wenn a und b zwei Attributausprägungen sind, dann können Regeln bspw. in der Form $a < b$, $a > b$, $a=b$ oder wenn $a=x$ dann $b=y$ angelegt werden.

Die allgemeingültige Folgerung von Formel- oder Regelspezifikationen zwischen Klassenkonzepten auf die Relation der zugehörigen Individuen, wie mit dem Beispiel *wird-benutzt-von*(*Weg_xyz*, *Gabelstapler_xyz*) weiter oben dargestellt, kann vor allem für *FE-Konzepte* realisiert werden.⁴⁰³ In den anderen Fällen ist die genaue Ausprägung einer Formel bzw. Regel für die Relation zwischen Individuen manuell durch den Modellnutzer abzubilden. Dies ergibt sich aus der i.d.R. vorliegenden Spezifität von Produkten und Prozessen in einem Unternehmen.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergänzungen des *Relationenmodells* werden nicht mit der DL realisiert. Sie sind additive in der TBox und ABox abgelegte Informationen. Relationsbezogene Informationen sowie Formeln und Regeln werden, wenn sie allgemeingültig sind in der TBox und wenn sie nur für ein spezifisches Fabrikssystem gelten, in der ABox abgelegt.

4.3.2 Komplexe Sätze

Die im Abschnitt 4.2 definierten Konzepte und Rollen können dazu verwendet werden, logische Ausdrücke der Aussagenlogik und Description Logics zu bilden. In Bild 4-8 wird der Prozess des dadurch möglichen logischen Schließens in den Kontext der realen Welt und ihrer Repräsentation gestellt.

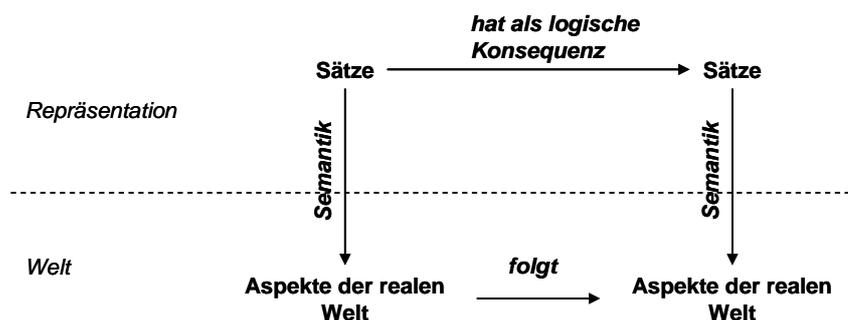


Bild 4-8: Entsprechung zwischen der Welt und ihrer Repräsentation⁴⁰⁴

Die reale Welt wird semantisch durch Sätze beschrieben, welche mit einer vereinbarten Syntax aufgebaut werden und in ihrer Gesamtheit die Wissensbasis bilden. Atomare Sätze beste-

⁴⁰³ Die Abhängigkeiten unter Einbeziehung von Prozessen und Produkten werden i.d.R. fabrikspezifisch sein.

⁴⁰⁴ Russel, Norvig 2004, S. 260.

hen aus einzelnen syntaktischen Elementen - den Aussagensymbolen - welche jeweils für eine wahre oder falsche Aussage stehen. Komplexe Sätze entstehen durch die Verwendung von logischen Verknüpfungen mit atomaren Sätzen.⁴⁰⁵ In Bild 4-8 ist ein Schlussprozess dargestellt. Hiernach gilt, dass wenn die Wissensbasis in der realen Welt wahr ist, auch jeder durch eine wahrheitserhaltende Inferenzprozedur der Wissensbasis abgeleitete Satz α in der realen Welt wahr ist.⁴⁰⁶ Die Inferenzprozedur arbeitet mit der in der Wissensbasis hinterlegten Syntax. In der realen Welt ist ein Aspekt aufgrund anderer Aspekte der realen Welt wahr.

Im Folgenden wird die in Abschnitt 4.1.2 eingeführte Description Logics für die Bildung komplexer Sätze verwendet. Die umfassende Anwendung der DL auf das *Relationenmodell* ist kein Schwerpunkt dieser Arbeit, weshalb lediglich Anwendungsmöglichkeiten exemplarisch aufgezeigt werden sollen. An dieser Schnittstelle zwischen Fabrikmodellierung und Informatik eröffnet sich ein weites Forschungsfeld. Die vorliegende Arbeit versteht sich als Modelllieferant aus Sicht von Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb, die mit der Transformation von Klassenbeschreibungen in Konzepte der DL die Anbindung zu weiteren Arbeiten der Informatik auf dem Gebiet der Wissensrepräsentation (i.e.S.) liefert.

Zu den gebräuchlichen syntaktischen Elementen der DL zählen, neben den im Abschnitt 4.1.2 bereits erwähnten Operatoren, number restrictions, concrete domains, role constructors und rules. Ihre Verwendung für die Wissensrepräsentation in digitalen Fabrikmodellen wird mit Tabelle 4-4 exemplarisch dargestellt.

Einfache komplexe Sätze
Definitionen: $C \equiv C'$, z.B. <i>Werker</i> \equiv <i>Mensch</i> \cup \neg <i>Schlosser</i> <i>Mensch-Maschine-Interaktion</i> \equiv <i>Maschine</i> \cap \exists <i>wird-benutzt-von.Mensch</i> <i>gewichtskritischesTransportmittel</i> \equiv <i>Transportmittel</i> \cap \forall <i>ist-Restriktion-für.</i> \neg <i>Gewicht</i>
Number restrictions
$\exists^{\geq n} R.C$, z.B. <i>DLZkritischerKnoten</i> \equiv $\exists^{\geq 3}$ <i>wirkt-auf.Durchlaufzeit</i>
Concrete domains ⁴⁰⁷
z.B. <i>teurerProzess</i> \equiv <i>FP</i> \cap \exists <i>hat_Ressource.</i> (<i>Mensch</i> \cap \exists <i>Gehalt.</i> \geq_{20})

⁴⁰⁵ Zu den Grundlagen der Logik siehe z.B. Russel; Norvig (2004), S. 256-270 oder Schöning (2000), S. 13-22 und S. 49-58.

⁴⁰⁶ Vgl. Russel; Norvig (2004), S. 259.

⁴⁰⁷ Vgl. Lutz (2003), S. 267.

Role constructors
R (inverse Rolle), z.B. gehört-zu` entspricht gehört-nicht-zu $R \cup R'$, z.B. <i>wirkt-allgemein-auf</i> \equiv <i>wirkt-auf</i> \cup <i>wirkt-möglicherweise-auf</i> \cup <i>wirkt-bestimmend-auf</i>
Rules
$C \Rightarrow C'$, z.B. <i>Drehmaschine</i> \Rightarrow <i>Maschine</i>

Tabelle 4-4: Beispiele für komplexe Sätze der DL

Die komplexen Sätze werden in der TBox der Wissensbasis für die Wissensrepräsentation in digitalen Fabrikmodellen abgelegt und stehen damit für Inferenzprozeduren zur Verfügung. Sie ergänzen die bereits aus der Transformation des *Objektmodells* vorhandenen Konzeptbeschreibungen. Auf die in der Informatik geführte Diskussion zur Erweiterung der Sprachfamilie der DL auch über die in Tabelle 4-4 aufgeführten Konstrukte hinaus und die damit einhergehende Probleme, z.B. in Bezug auf die Entscheidbarkeit, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.⁴⁰⁸

4.3.3 Produktionsregeln

Eine weitere Form der Wissensrepräsentation (i.e.S.) besteht in der Verwendung von Produktionsregeln in Produktionssystemen. Diese werden insbesondere zur Abbildung von Fachwissen in Expertensystemen eingesetzt.⁴⁰⁹ Das Wissen zur Problemlösung wird in Produktionssystemen mit Hilfe von Wenn-dann-Regeln bzw. Bedingung-Aktion-Regeln repräsentiert. Eine in einer solchen Regel enthaltene Aktion gilt als ausführbar, wenn die Vorbedingung, welche in einem beliebigen Repräsentationsformat vorliegen kann, erfüllt ist.⁴¹⁰ Sie besteht im Vermerk einer Konklusion in einem Arbeitsspeicher als wahr. Liegen mehrere Regeln in einer Regelbasis vor, so werden diese z.B. bei der datenorientierten Breitensuche mehrmals nacheinander durchlaufen. Im nächsten Durchlauf fließen somit die neu festgehaltenen Konklusionen in die Auswertung ein. Sobald dem Arbeitsspeicher bei einem Durchlauf keine Konklusionen mehr zugefügt werden, wird die Suche beendet.⁴¹¹

Die in diesem Abschnitt diskutierten Produktionsregeln unterscheiden sich von den im Abschnitt 4.3.1 in das *Relationenmodell* eingeführten Regeln, welche lediglich die Gültigkeit von Attributausprägungen überprüfen. Bei Produktionssystemen handelt es sich nicht um eine

⁴⁰⁸ Vgl. Haarslev et al. (2001), S. 2 und Baader; Nutt (2003), S. 90-91.

⁴⁰⁹ Vgl. Luger (2001), S. 289.

⁴¹⁰ Vgl. Reimer (1991), S. 55.

⁴¹¹ Vgl. Luger (2001), S. 281-282.

formale logische Sprache wie der in den vorangegangenen Abschnitten verwendeten DL. Dieser regelbasierte Repräsentationsansatz kann jedoch als selbstständiger Ansatz für die Wissensrepräsentation in digitalen Fabrikmodellen unter Nutzung der bisher definierten Konstrukte verfolgt werden. Mit einem Beispiel soll hier lediglich das Prinzip einer Problemlösung durch ein Produktionssystem verdeutlicht werden:

Problem: Die Qualität eines Prozesses ist schlecht.

Regel 1: Wenn der Werkstoff und das Läpp-Pulver zusammenpassen, dann liegt das Problem nicht bei der Mitarbeitererfahrung.

Regel 2: Wenn das Problem nicht bei der Mitarbeitererfahrung liegt und das richtige Werkzeug verwendet wird, dann liegt das Problem bei der Maschine.

Regel 3: Wenn das Läpp-Pulver zum Werkstoff passt und das Problem nicht bei der Maschine liegt, dann liegt das Problem beim Werkzeug.

Die hier beispielhaft aufgeführten Regeln gelten jeweils für einen Ausschnitt des semantischen Netzes und damit einer definierten und begrenzten Menge von Knoten und Kanten im Gesamtmodell. Ein konzeptioneller Ansatz könnte darin liegen, für diese Teilnetze spezifische Produktionssysteme in eine Wissensbasis zu integrieren, welche Bestandteil einer erweiterten TBox werden.

4.4 Diskussion des hybriden Modellansatzes

Der im Kapitel 4 entwickelte Ansatz zur semiformalen und formalen Wissensrepräsentation zeichnet sich durch zwei wesentliche Merkmale aus. Diese sind der hybride Modellansatz, d.h. die Transformation der Modellelemente des *Objektmodells* sowie die Erweiterung der Wissensbasis mit zusätzlichen, neben den semantischen Relationen bestehenden Formen der Wissensrepräsentation (vgl. Bild 4-9).

Mit dem hybriden Modellansatz ist es gelungen, die für die Fabrikmodellierung gebräuchliche Modellierungsmethode OOM zu nutzen und ihre Konstrukte für die Abbildung von Konzepten einer logikbasierten Beschreibungssprache zu verwenden. Mit dem Übergang zur DL werden nicht nur Wahrheitsaussagen und Operatoren eingeführt. Zusätzlich ist es möglich, mit dem Rollenkonzept der DL Relationen zwischen Individuen zu modellieren. Diese Eigenschaft steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Sie ist die Voraussetzung zur Abbildung der komplexen und spezifischen Informationsstrukturen in konkreten Fabrikssystemen. Die erweiterte Wissensbasis steht als zweites wesentliches Merkmal für Möglichkeiten, mit denen relationenbezogene Informationen erfasst, Planungsergebnisse teilweise automatisiert generiert bzw. überprüft oder Problemlösungsverfahren in das *Relationenmodell* integriert werden können.

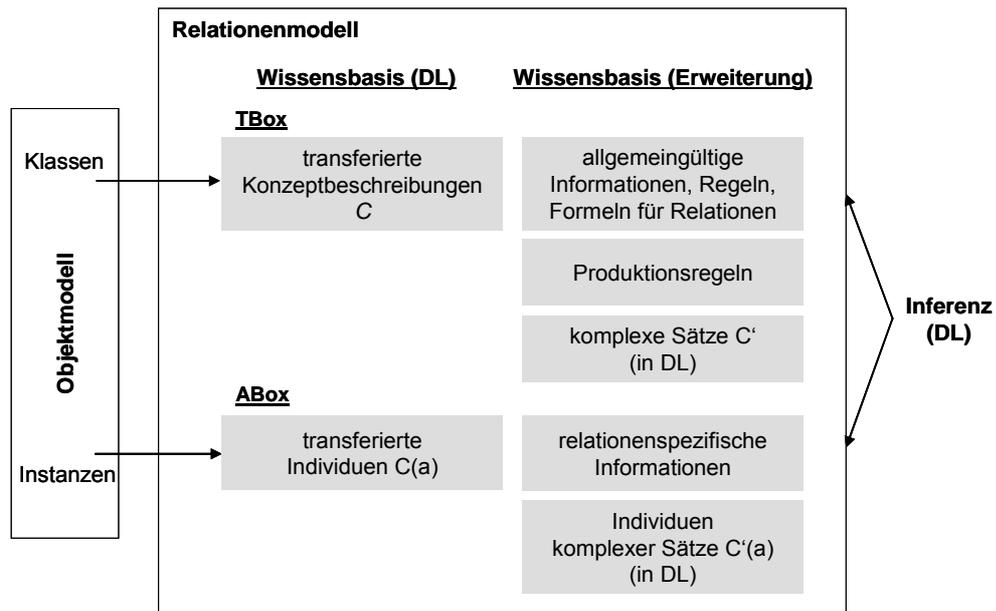


Bild 4-9: Hybrider Modellansatz und Erweiterungen in der Wissensbasis

Das in Bild 4-9 dargestellte Ergebnis vereint mehrere Sprachen bzw. Arten der Wissensrepräsentation in einem Modell und wurde für die Wissensdomäne „Fabriksystem“ konzipiert. Dabei wurde die aus der DL bekannte Trennung der Wissensbasis in eine TBox und ABox als Denkkonzept beibehalten. An dieser Stelle soll jedoch angemerkt werden, dass es sich bei dem Ergebnis um ein praxisorientiertes Modellkonzept handelt, von dem Teile im weiteren Verlauf dieser Arbeit angewendet und implementiert werden sollen. Die Arbeit erhebt nicht den Anspruch eine mehrere Repräsentationsarten integrierende und konsistente Modellierungssprache entwickelt zu haben, wie es der Anspruch von theoretischen Arbeiten zur Informatik sein sollte. Insbesondere müssten hier Schnittstellen zwischen den Repräsentationsarten sowie Inferenzprozeduren formal beschrieben werden, was bereits für weitaus abgegrenztere Problemstellungen schwierig ist.⁴¹²

⁴¹² Vgl. z.B. Calvanese et al. (1998) für eine Beschreibung von Datenmodellen mit der Description Logics.

5 Modellerweiterung und Anwendungen

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 3 und 4 entwickelte Gesamtmodell in einen konkreten Anwendungsbezug gestellt und mit anwendungsorientierten Aspekten erweitert. Im Abschnitt 5.1 werden zunächst Wissensdomänen beschrieben, welche eine Strukturierung und damit eine bessere Handhabbarkeit des semantischen Netzes erlauben. Abschnitt 5.2 widmet sich der Konzeption eines Referenzmodells, das durch die Vorgabe von Klassen und anderen Modellelementen die Erstellung konkreter Fabrikmodelle und z.B. auch Planungstätigkeiten unterstützt. Bisher wurde das wissensorientierte Fabrikmodell unabhängig von einer grafischen Fabrikrepräsentation betrachtet. Im Abschnitt 5.3 wird nun die Darstellung von Informationen aus der Wissensbasis in einem grafischen Fabrikmodell eingeführt. In den darauf folgenden Abschnitten rückt die Anwendung des wissensorientierten Fabrikmodells in den Fokus. Zunächst wird im Abschnitt 5.4 auf Abfragen an das Modell, d.h. die Extraktion für eine Problemstellung relevanter Informationen aus der Wissensbasis eingegangen. Im Abschnitt 5.5 erfolgt dann die Beschreibung der Anwendungsarten und der Spezifika der Modellnutzung in den drei Anwendungsgebieten. Im letzten Abschnitt werden letztendlich Beispiele für Anwendungen vorgestellt.

5.1 Definition von Wissensdomänen

Das Modell eines Fabriksystems weist mit zunehmender Anzahl von abgebildeten Systemelementen und Relationen eine hohe Komplexität auf. Um die Informationsaufnahme durch den Modellnutzer zu unterstützen bzw. Inferenzen und Abfragen auf Teilmengen der Wissensbasis ausführen zu können, kann eine zusätzliche Strukturierung der Konzepte und Relationen notwendig werden. Das bis hierhin beschriebene Gesamtmodell bietet bereits Möglichkeiten zur Bildung von Teilmengen. Klassenzugehörigkeiten, die Zugehörigkeit zu Partialmodellen sowie Konzept- oder Relationsarten können z.B. bereits dazu genutzt werden, Teilmengen von Elementen und Relationen abzugrenzen. Der Strukturierungsansatz der Wissensdomänen verfolgt das Ziel, Informationen auch gezielt für einen Wissensbereich selektieren zu können.

Die Verwendung von Wissensdomänen lehnt sich an die aus der Systemtheorie bekannte Bildung von Sub- und Teilsystemen an. Subsysteme entstehen mit der hierarchischen Untergliederung eines Gesamtsystems auf vertikalen Ordnungsebenen. Teilsysteme entstehen vorwiegend in horizontaler Richtung und werden nach anderen Aspekten als Subsysteme zusammengefasst (vgl. Bild 3-1).⁴¹³ Wissensdomänen bilden Teilsysteme und enthalten die Konzepte, die für einen bestimmten Wissensbereich von Interesse sind. Diese sind z.B.:

⁴¹³ Vgl. Schenk; Wirth (2004), S. 79.

- Planungsfelder (Bautechnik/Brandschutz/Fördertechnik/...) ⁴¹⁴,
- Planungsphasen (Konzeptplanung/Detailplanung/...),
- Anwendungsgebiete (Instandhaltung/Fertigungssteuerung/...).

Die Zuordnung eines Konzepts zu einer Wissensdomäne erfolgt über eine Inklusion, z.B. *Steuerungsprinzip* \subseteq *Fertigungssteuerung*. Das Herausfiltern von Elementen aus einer Gesamtmenge weist Analogien zu der in CAD-Systemen verwendeten Layer-Technik auf. Bei dieser werden einzelne grafische Objekte Layern zugewiesen, die in Abhängigkeit vom Informationsbedarf des Planers ein- oder ausgeblendet werden können. In Bild 5-1 wird die Verwendung von Wissensdomänen schematisch verdeutlicht.

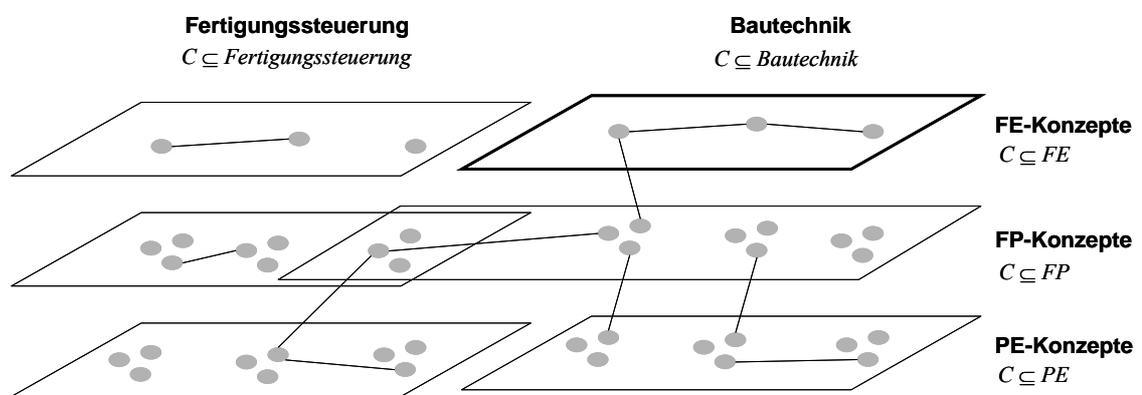


Bild 5-1: Abgrenzung von Wissensdomänen

In Bild 5-1 ist beispielhaft dargestellt, wie die Fertigungssteuerung und die Bautechnik und *FE-Konzepte*, *FP-Konzepte* und *PE-Konzepte* jeweils Strukturierungsdimensionen bilden. Wissensdomänen lassen sich durch die Anwendung mehrerer dieser „Filter“ weiter eingrenzen. Mit dem Satz $Bautechnik \cap FE$ wird bspw. eine Wissensbasis beschrieben, die alle *Fabrikamente* der Bautechnik sowie zwischen diesen Elementen bestehende Relationen enthält. Die Elemente und Relationen, die sich außerhalb der Systemgrenze der Wissensdomäne befinden, werden bei Anfragen an die Wissensbasis vernachlässigt.

5.2 Konzeption eines Referenzmodells

In Kapitel 3 und 4 wurde das Modellschema für die wissensorientierte Fabrikmodellierung entwickelt und Beispiele der Abbildung von Elementen und Relationen des Fabrik-Systems, Prozess-Systems und Produkt-Systems gegeben. Im Folgenden geht es um den Aufbau von Referenzmodellen, welche die Effizienz der Abbildung konkreter Modelle auf Basis von Vorlagen unterstützen. Konkrete Modelle verweisen auf ein bestimmtes Original. Ein Referenz-

⁴¹⁴ Vgl. Felix (1998), S. 48.

modell kann hingegen als Empfehlung oder idealtypisches Bezugsobjekt für die Durchführung von Modellierungs- und Gestaltungsaufgaben angesehen werden.⁴¹⁵ Folgendes Begriffsverständnis eines Referenzmodells liegt den Ausführungen zugrunde:

„Ein Referenzmodell umfasst eine systematische und allgemeingültige Beschreibung eines definierten Bereichs der Realität mit den für eine vorgegebene Aufgabenstellung relevanten charakteristischen Eigenschaften und legt das zugehörige Modellierungskonzept fest.“⁴¹⁶

Referenzmodelle für die wissensorientierte Fabrikmodellierung bestehen aus zum *Objekt-* oder *Relationenmodell* gehörenden Vorlagen. Vorlagen des *Objektmodells* sind mit der Syntax und Semantik des *Objektmodells* erstellte Modellelemente, d.h. *FE-Klassen*, *FP-Klassen*, und *PE-Klassen* einschließlich der allgemeingültigen objektbezogenen Informationen. Vorlagen des *Relationenmodells* sind Modellelemente, wie die aus dem *Objektmodell* abgeleitete Konzepte, ergänzende relationenbezogene Informationen, komplexe Sätze, Regeln, Formeln und Produktionssysteme (vgl. Bild 5-2).

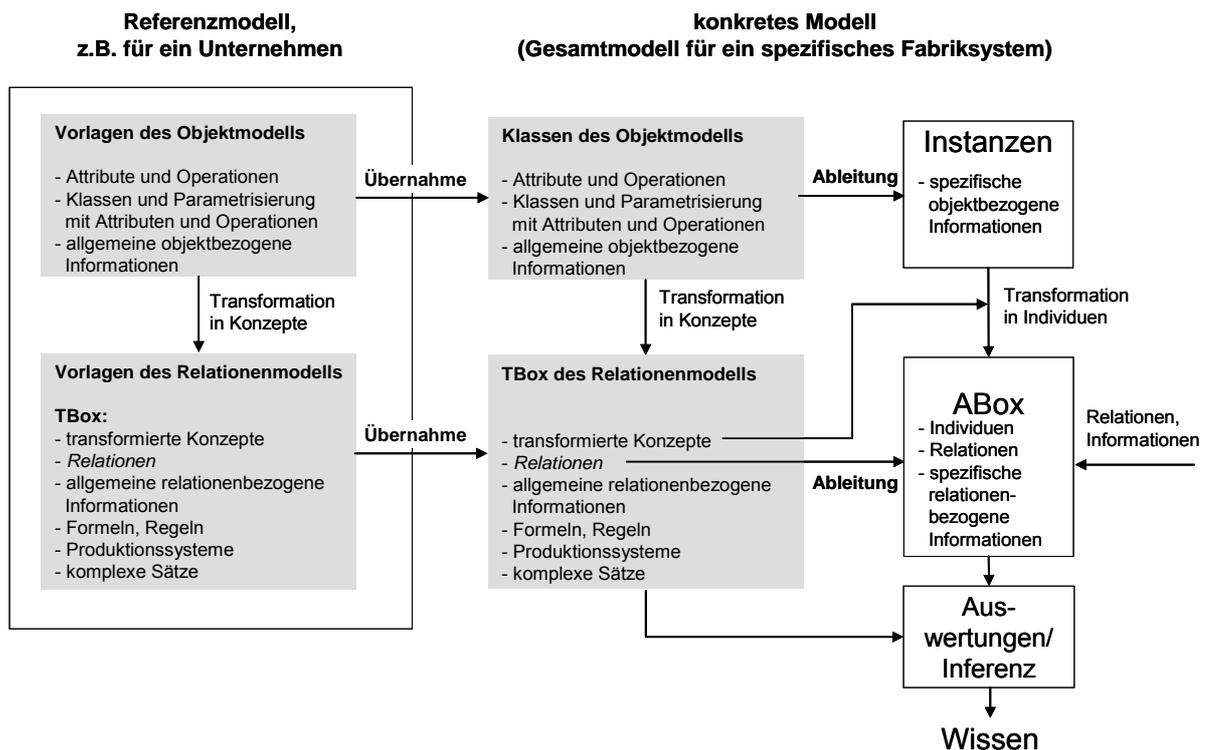


Bild 5-2: Referenzmodell und Nutzung für ein konkretes Modell

Mit dem bisher entwickelten Instrumentarium ist es noch nicht möglich, Vorlagen für allgemeingültige Relationen abzubilden. Deshalb wird an dieser Stelle die Wissensbasis in der

⁴¹⁵ Vgl. Klinger; Wenzel (2000), S. 14-15.

⁴¹⁶ Klinger; Wenzel (2000), S. 23.

TBox mit Relationen zwischen Konzepten erweitert. Diese sind in Bild 5-2 kursiv dargestellt. Wie bei Informationen, Regeln, Formeln und Produktionssystemen handelt es sich um eine rein konzeptionelle Erweiterung, die nicht mit der Description Logics modelliert werden kann.

Auf der linken Seite von Bild 5-2 wird gezeigt, wie die Erstellung eines konkreten Modells mit dem Referenzmodell unterstützt wird. Das konkrete Modell wird für ein Projekt, z.B. eine neu zu planende Fabrik, erstellt. Um nicht für jedes Projekt wiederkehrende Modellelemente neu anlegen zu müssen, wird auf allgemein verwendbaren Vorlagen des Referenzmodells zugegriffen. Dies geschieht in der Form, dass Vorlagen aus dem Referenzmodell sukzessive in das konkrete Modell übernommen werden. Ein Referenzmodell kann bspw. für ein Unternehmen oder eine Branche existieren. Die Vorlagen können mit projektspezifischen Modellelementen ergänzt werden, welche nur für das konkrete Modell von Interesse sind. Das Referenzmodell weist mit seinem Vorrat an Vorlagen auf Aspekte im Fabrikssystem hin, welche noch nicht im konkreten Modell abgebildet wurden.

Die gesamte Wissensbasis für ein konkretes Modell setzt sich aus den verwendeten Vorlagen des Referenzmodells, den im konkreten Modell neu definierte Modellelementen sowie den Instanzen des *Objektmodells* und der ABox des *Relationenmodells* zusammen. Auf der rechten Seite von Bild 5-2 ist dargestellt, wie aus Klassen des *Objektmodells* sowie Konzepten und Referenzrelationen der TBox Individuen und Relationen der ABox erzeugt werden. Für Inferenzprozeduren bzw. Auswertungen mit Formeln, Regeln und Produktionssystemen werden diese in der TBox allgemeingültig beschriebenen Konstrukte auf die Elemente der ABox angewendet. Relationen können in der ABox frei erstellt werden, was durch den von rechts in die ABox hineinzeigenden Pfeil symbolisiert wird.

In der Literatur wird eine Reihe von Eigenschaften aufgeführt, die ein Referenzmodell besitzen sollte.⁴¹⁷ Das Referenzmodell für die wissensorientierte Fabrikmodellierung weist die wesentlichen von Referenzmodellen erwarteten Eigenschaften auf:

- *Vorlagencharakter*: Das Referenzmodell enthält modellierte Aspekte typischer Fabrik-systeme, die in das konkrete Modell übernommen werden können.
- *Allgemeingültigkeit*: Das Referenzmodell ist für die Erstellung einer Vielzahl konkreter Modelle mit unterschiedlichen Problemstellungen geeignet.
- *Verständlichkeit*: Die Begriffe und das Modellschema werden mit dem *Objekt-* und *Relationenmodell* des Referenzmodells vorgegeben, womit eine einheitliche Modellbildung unterstützt und die Vielfalt der Modellelemente beschränkt wird.

⁴¹⁷ Vgl. Klinger; Wenzel (2000), S. 14-18.

- *Integration von Erfahrungswissen:* Das Referenzmodell ist dazu geeignet, Wissen über Elemente und Relationen von Fabrikssystemen abzubilden. Die Erstellung eines konkreten Fabrikmodells wird durch im Referenzmodell bereits integriertes allgemeingültiges Erfahrungswissen über Fabrikssysteme unterstützt.

Referenzmodelle erfüllen eine Standardisierungsfunktion, die zu einer Vereinheitlichung der Planung und Modellierung von Fabrikssystemen beiträgt. Hieraus ergibt sich z.B. ein besseres Modellverständnis bei den Modellnutzern. Die Berücksichtigung von im Referenzmodell hinterlegter Gestaltungsempfehlungen kann sich zudem positiv auf die Qualität der Planungsergebnisse auswirken. Während sich die Partialmodelle *FP-Modell* und *FE-Modell* gut für die Referenzmodellierung eignen, bestehen für das *PE-Modell* Einschränkungen, da i.d.R. in jedem Fabrikssystem andere Produkte gefertigt werden.

5.3 Visualisierung von Relationen

Im Abschnitt 2.2.5 wurden Fabrikmodelle in produktionsorientierte und grafische Modelle unterschieden. In diesem Abschnitt wird die Visualisierung der abstrakten textbasierten Informationen aus dem produktionsorientierten wissensorientierten Fabrikmodell in einem grafischen Abbild der Fabrik untersucht. Die Informationsvisualisierung⁴¹⁸ wird als geeignete Methode angesehen, um die Navigation in den abgebildeten Informationsstrukturen sowie den kognitiven Zugang zu den Informationen zu erleichtern und damit die in der Wissensbasis hinterlegten Informationen für den Modellnutzer zugänglich zu machen. Durch die Visualisierung von Informationen entstehen i.d.R. folgende Vorteile:⁴¹⁹

- Veranschaulichung und Vereinfachung komplexer Objektbeziehungen der Realwelt.
- Hilfe bei der Analyse und Interpretation von Daten, z.B. zur Mustererkennung.
- Unterstützung der Gedächtnisleistung und Informationsaufnahme, da der Mensch visuelle Informationsprozesse und Repräsentationsformen bevorzugt.
- Strukturierung und Kategorisierung von Datenbeständen und unterschiedliche Sichten auf Datenbestände.

Die Visualisierung bietet sich insbesondere für Relationen zwischen physischen *Fabrikelementen* (vgl. Abschnitt 3.2.1) an. Mit der Einzeichnung von Relationen zwischen grafisch dargestellten physischen *Fabrikelementen* in einem 2D- oder 3D-Fabrikmodell wird ein räumlicher Bezug für Informationen im Fabrikssystem hergestellt (vgl. Bild 5-3). Es wird ersicht-

⁴¹⁸ Folgendes Zitat beschreibt Gegenstand und Ziele der Informationsvisualisierung genauer: „Information Visualization combines aspects of scientific visualisation, human-computer interfaces, data mining, imaging and graphics.“ Gershon; Eick (1997).

⁴¹⁹ In Anlehnung an Däßler (1999), S. 2 und 3.

lich, welche Objekte in der Fabrik mit anderen Objekten in Beziehung stehen und wie sich diese Beziehungen im Raum darstellen. Die Visualisierung erlaubt weiterhin den gezielten und räumlich geleiteten Zugriff auf Informationen. Eine bestimmte Maschine kann z.B. mit Kenntnis ihrer Lage im Raum schneller gefunden und in einen Problemkontext gestellt werden, als es mit einer rein textbasierten Darstellungsform möglich wäre.

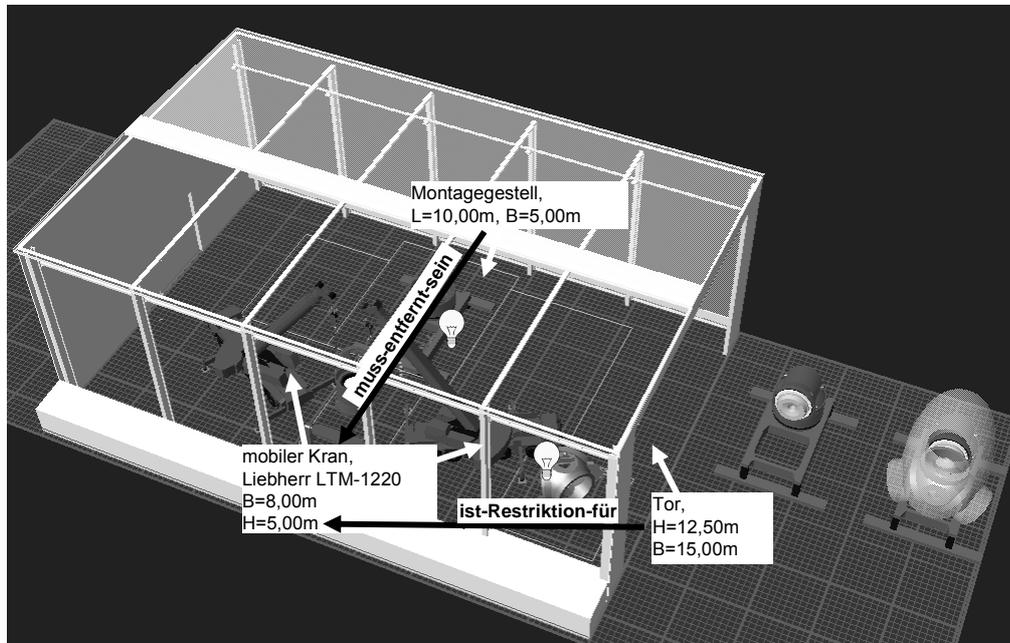


Bild 5-3: Informationsvisualisierung in einem grafischen Modell

Die Visualisierung ist jedoch nicht auf Relationen zwischen physischen *Fabrikelementen* beschränkt. Nicht-physische *Fabrikelemente* können symbolisiert im grafischen Modell dargestellt und aufgrund ihrer Zuordnung zu Fabrikebenen (vgl. Abschnitt 3.2.3) auch räumlich angeordnet werden. *Fabrikprozesse* und *Produktelemente* lassen sich ebenfalls symbolisch in die Darstellung übernehmen. Allerdings muss hier ein räumlicher Bezug manuell hergestellt werden, da er sich nicht aus dem produktionsorientierten Modell ableiten lässt.

Die Einbeziehung der grafischen Objekte in das Nutzerinterface eines wissensbasierten Systems ermöglicht eine visuell unterstützte Exploration der Informationsstrukturen. Der Nutzer startet bei einer Suche nach Informationen an einem bestimmten Knoten und kann nach weiteren relevanten Informationen in dem durch das semantische Netz beschriebenen Umfeld suchen.⁴²⁰ Die Informationen zu den Elementen des Fabriksystems sowie ihre Vernetzung lassen sich durch den Modellnutzer leichter abrufen und kognitiv verarbeiten als es mit einer rein textbasierten Darstellungsform der Fall wäre. Wenn die Anzahl der Elemente und Relationen eine bestimmte Anzahl übersteigt, entsteht ein unübersichtliches Chaos von Knoten und Li-

⁴²⁰ Vgl. Trunk (2005), S. 31.

nien, wobei der Nutzen der Informationsvisualisierung abnimmt.⁴²¹ In diesem Fall kann ihre Anzahl z.B. mit Hilfe der im Abschnitt 5.1 vorgestellten Wissensdomänen reduziert werden. Ähnlich wie bei den in CAD-Systemen etablierten Layern erfolgt hierbei eine Selektion der dargestellten Informationen im grafischen Fabrikmodell über eine Auswahl von aktivierten Wissensdomänen.

5.4 Abfragen an das Gesamtmodell

In Kapitel 3 und 4 wurde das Modellschema und die Modellierungsmethode für das wissensorientierte Fabrikmodell festgelegt. In diesem Abschnitt geht es nun um die Abfrage von mit dem Gesamtmodell abgebildeten Informationen. Im Abschnitt 5.4.1 werden zunächst einfache Abfragen an das Modell beschrieben, bei denen keine Schlussprozesse durchgeführt werden. Im Abschnitt 5.4.2 wird anschließend ein Ausblick auf Abfragen mit Inferenzprozeduren gegeben.

5.4.1 Einfache Abfragen

Unter „einfache Abfragen“ an das Gesamtmodell werden Abfragen verstanden, bei denen keine neuen Informationen erzeugt werden. Bei ihnen werden die im Gesamtmodell hinterlegten Informationen durch den Modellnutzer abgerufen, ohne dass die mit der DL erfolgte Wissensrepräsentation für Inferenzprozeduren genutzt wird. Wenn das Modell mit einer Datenbank implementiert wird, können die Abfragen z.B. in Form einer Datenbankanfrage erfolgen.

Bereits mit dem *Objektmodell* lässt sich eine Vielzahl von Informationen abrufen. In erster Linie sind dies objektbezogene Informationen, wie sie im Abschnitt 3.6.3 aufgeführt wurden. Durch die Klassifizierungs- und Gliederungsfunktion des *Objektmodells* sind zudem Informationen über den Typ und die Art der Objekte verfügbar. Hierdurch gelangt der Modellnutzer zu weiteren allgemeingültigen Informationen wie Gestaltungsempfehlungen, die ggf. für die jeweilige Objektklasse im Modell hinterlegt wurden. Mit der Zuweisung von *Fabrikelementen* zu Fabrikebeneninstanzen kann die räumliche Lage des Objektes bzw. die aufbauorganisatorische Zugehörigkeit abgefragt werden. Eine weitere Informationsquelle bilden die Klasseneigenschaften. Hierzu gehören Attribute und Operationen. Erstere geben Aufschluss über die quantitativen und qualitativen Merkmale eines Objektes sowie ihre Ist- und Soll-Ausprägungen. Operationen liefern hingegen Informationen über Funktionen und Handlungen, die mit Objekten durchgeführt werden können. Mit der Integration der Partialmodelle des *Objektmodells* lässt sich zudem abfragen, welche *Produktelemente* bestimmte *Fabrikprozesse* durchlaufen und welche *Fabrikelemente* diese Prozesse als Ressource nutzen. Auf Basis des *Objektmodells* können eine Vielzahl weiterer Datenbankabfragen durchgeführt werden. Die

⁴²¹ Vgl. Ziegler et al. (2002), S. 374.

Kosten der Logistikprozesse oder die Mitarbeiterorientierung bei den Montageprozessen lassen sich z.B. von den betreffenden Prozessen, denen diese Attribute zugeordnet sind, ermitteln.

Zu den einfachen Abfragen an das *Relationenmodell* gehört in erster Linie die Überprüfung des Vorhandenseins einer bestimmten Relation. Eine logikbasierte Abfrage würde dabei aus einer Formel bestehen, die selbst Teil der Repräsentation in der ABox ist. Deshalb wird hier von einem nicht-logischen-Axiom gesprochen.⁴²² Mit Hilfe eines Theorembeweisers wird z.B. überprüft, ob die Relation *ist-Restriktion-für(mobiler KranXYZ, TorXYZ)* wahr ist. Derartige Abfragen lassen sich jedoch auch mit Datenbankabfragen lösen, weshalb für einfache Abfragen an das *Relationenmodell* auf einen Theorembeweiser verzichtet werden kann. Das Ergebnis weiterer einfacher Abfragen wäre z.B. eine Liste aller Elemente, die mit einem bestimmten Element in Beziehung stehen einschließlich einer Angabe der Relationsart. Aus dem *Relationenmodell* können weiterhin Formeln, Regeln sowie allgemeine und spezifische Informationen zu den Relationen abgerufen werden (vgl. Abschnitt 4.3.1).

5.4.2 Abfragen mit Inferenzprozeduren

Der Zweck der Wissensrepräsentation mit der DL geht über die Erfassung von Konzeptdefinitionen in der TBox und Individuen und Rollen in der ABox hinaus. Die Wissensrepräsentation hat eine Semantik, welche äquivalent zu der Menge der Axiome der Logik erster Stufe ist.⁴²³ Sie enthält deshalb implizites Wissen, welches durch Inferenz expliziert werden kann.⁴²⁴ Durch Schlussfolgerungen über das bereits erfasste Wissen werden neue Fakten abgeleitet.⁴²⁵ Dabei erfolgt das Lösen von Inferenzproblemen i.d.R. über den Nachweis der Un erfüllbarkeit einer Wissensbasis. Für das logische Schließen müssen Theorembeweiser für die DL, wie Pellet oder FACT eingesetzt werden.⁴²⁶

In Tabelle 5-1 sind die gewöhnlichen Inferenzprozeduren von DL-Systemen getrennt nach ihrer Anwendung auf die TBox bzw. ABox aufgeführt.⁴²⁷ Die wissensorientierte Fabrikmodellierung erfährt mit der Durchführung von Inferenzprozeduren eine Weiterentwicklung hin zu wissensbasierten Systemen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Mit dem *Objekt-* und *Relationenmodell* wurde zunächst ein Fabrikmodell entworfen, welches mit einer Datenbank implementiert werden kann und bereits vielfältige Möglichkeiten der Informationsbereitstellung für seine Anwendungsgebiete liefert.

⁴²² Vgl. Reimer (1991), S. 46.

⁴²³ Vgl. Tsarkov; Horrocks (2003), S. 152.

⁴²⁴ Vgl. Baader; Nutt (2003), S. 61.

⁴²⁵ Vgl. Russel, Norvig (2004), S. 259.

⁴²⁶ Vgl. Parsia; Sirin (2004); Möller; Haarslev (2004), S. 301-302 und Werner (2006), S. 17.

⁴²⁷ Vgl. Möller; Haarslev (2004), S. 300-301 sowie Baader; Nutt (2003), S. 62.

TBox		ABox	
concept consistency	Überprüfung der Konzeptnamen einer TBox auf Widersprüchlichkeit.	ABox consistency	Überprüft die Konsistenz der ABox in Bezug auf die in der TBox abgelegten Konzeptlogiken.
concept subsumption	Überprüft, ob ein Konzept genereller als ein anderes Konzept ist.	instance checking	Überprüft, ob eine Aussage z.B. C(a) und R(a,b) in einer ABox enthalten ist.
concept satisfiability	Überprüft, ob ein Konzept ein Individuum haben kann.	direct types	Abfrage des spezifischsten Konzeptnamens für ein existierendes Individuum
classification	Bildung einer Hierarchie von Konzeptnamen.	retrieval	Auslesen aller Individuen einer ABox, die von einem gegebenen Konzept C abgeleitet wurden.
		set of fillers	Auslesen aller Individuen, die für ein anderes Individuum eine spezifische Rolle erfüllen.
		set of roles	Auslesen aller Rollen zwischen zwei Individuen.

Tabelle 5-1: Inferenzprozeduren

Die Inferenzprozeduren instance checking, retrieval, set of fillers und set of roles können z.B. durch Datenbankabfragen nachgebildet werden. Die im Abschnitt 4.3.2 vorgestellten komplexen Sätze geben jedoch einen Ausblick auf die Anwendungsmöglichkeiten der DL in wissensbasierten Systemen, bei denen die Wissensbasis mit beliebigen Konzepten ergänzt werden kann und die über Datenbankfunktionalitäten hinausgehen. Von Nutzen sind insbesondere Inferenzprozeduren, die definierte fabrikplanungsrelevante Konzepte, die mehrere Konzepte über Operatoren in einer Definition einschließen, ansprechen. Mit dem Satz *gewichtsun kritischesTransportmittel* \equiv *Transportmittel* \cap \forall *ist-Restriktion-für*. \neg *Gewicht* kann bspw. für ein Individuum *StetigfördererXYZ* abgefragt werden, ob ein Element des Fabriksystems eine Gewichtsrestriktion für diesen Stetigförderer darstellt, d.h. der *StetigfördererXYZ* ein gewichtsun kritisches Transportmittel ist. Das *StetigfördererXYZ* ein Transportmittel ist, wird dabei aus der Wissensbasis geschlossen. Mit *gewichtsun kritischesTransportmittel(StetigfördererXYZ)* könnte umgekehrt festgelegt werden, dass keine auf den *StetigfördererXYZ* bezogene Rolle *ist-Restriktion-für(StetigfördererXYZ,Gewicht)* vorliegen darf, da die Wissensbasis ansonsten inkonsistent werden würde.

5.5 Anwendungen im Fabriklebenszyklus

Dieser Abschnitt dient der differenzierten Betrachtung der Anwendung des wissensorientierten Fabrikmodells. Hierzu wird auf Anwendungsarten (Abschnitt 5.5.1) und Anwendungsgebiete (Abschnitt 5.5.2) eingegangen. Bei den Anwendungsarten wird zwischen referenzmodellgestützter Planung und Modellierung sowie Informationsabfragen unterschieden. Bei den Anwendungsgebieten erfolgt die aus dem Abschnitt 2.1.1 bekannte Differenzierung zwischen Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb.

5.5.1 Anwendungsarten

Bei der Anwendung des wissensorientierten Fabrikmodells werden zwei grundlegende Anwendungsarten unterschieden. Zum einen kann eine Unterstützung der Planung und Modellierung eines Fabriksystems durch im Referenzmodell vorhandenes Wissen und bereits erfasster Modellelemente erfolgen, zum anderen können auf ein bereits vorhandenes wissensorientiertes Modell Informationsabfragen durchgeführt werden.

Die beiden Anwendungsarten lassen sich nicht strikt voneinander trennen, vielmehr variieren ihre Anteile in Abhängigkeit vom Fortschritt der Systemplanung und des Modellaufbaus. Während in den frühen Planungsphasen vorwiegend auf bereits abgebildete Vorlagen des Referenzmodells zugegriffen wird, steht in der Betriebsphase einer realisierten Fabrik die Nutzung bereits in das Modell implementierter Informationen im Vordergrund. Die beiden Anwendungsarten werden im Folgenden näher charakterisiert:

- *Referenzmodellgestützte Planung und Modellierung:* Bei der Neuplanung bzw. einer noch nicht wissensorientiert abgebildeten Fabrik besteht zunächst keine Möglichkeit der Informationsabfrage. Die Systemplanung und der Modellaufbau werden in diesem Fall mit dem Referenzmodell (vgl. Abschnitt 5.2) unterstützt. Im Rahmen der sukzessiven und iterativen Planung werden Elemente und Relationen parallel zu ihrer Planung im Modell angelegt, modifiziert, eliminiert und mit Informationen versehen, wodurch eine dem Planungsfortschritt entsprechende Wissensbasis entsteht. Im Referenzmodell sind typische Elemente und Relationen von Fabrikssystemen sowie objekt- und relationenbezogene Informationen hinterlegt. Diese können als Gestaltungs- bzw. Modellierungshilfe verwendet werden. Dem Planer obliegt es, zu entscheiden, welche Elemente und Relationen des Referenzmodells und welche zusätzlichen Elemente und Relationen er im konkreten Modell abbildet.
- *Informationsabfragen:* Bei dieser Anwendungsart werden dem Planer Informationen über das konkrete Fabrikssystem zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 5.4). Sie setzt voraus, dass ein konkretes mit Informationen angereichertes Fabrikmodell vorliegt. Auf Informationsabfragen folgende Änderungen an der Planung für ein Fabrikssystem oder am Fabrikssystem selbst, werden durch die Anlage, Modifikation und Eliminie-

rung von Elementen und Relationen sowie der Angabe neu gewonnener Zusatzinformationen im wissensorientierten Modell nachvollzogen.

Die Anwendungsarten werden in Tabelle 5-2 weiter spezifiziert. Das wissensorientierte Fabrikmodell besitzt Modellelemente, die für systematische Vorgehensweisen während und nach der Systemplanung genutzt werden können. Ein Beispiel ist die zielorientierte Planung mit Hilfe eines Soll-/Ist-Vergleichs von Attributausprägungen.

referenzmodellgestützte Systemplanung und Modellaufbau	Informationsabfragen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abruf von Referenzinformationen, z.B. objektbezogene Gestaltungsempfehlungen für <i>Fabrikprozesse</i> und <i>Fabrikelemente</i> ▪ Bereitstellung von allgemeingültigem Planungswissen, z.B. über Referenzrelationen, Formeln und Regeln ▪ Systematische Dokumentation von Wissen zu einem konkreten Fabrikssystem <p>Systematische Vorgehensweisen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung qualitativer Kriterien bei der Fabrikplanung ▪ Funktionsorientierung bei der Planung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analyse der Wirkung von Elementveränderungen auf andere Elemente ▪ Abruf <i>Fabrikelement-</i> und <i>Fabrikprozess-</i>bezogener Informationen ▪ Analyse des Einflusses von Produktänderungen auf das Fabrikssystem ▪ Einflussanalyse für Attribute ▪ Anzeige der Ist-Situation von Attributausprägungen mit Schnittstellen zur BDE <p>Systematische Vorgehensweisen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkungsanalyse für Änderungstreiber ▪ Soll-/Ist-Vergleich

Tabelle 5-2: Spezifizierung der Anwendungsarten

5.5.2 Anwendungsgebiete

Die Anwendungsgebiete für die wissensorientierte Fabrikmodellierung sind die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und der Fabrikbetrieb (vgl. Abschnitt 2.1.1.). Ein für eines dieser Anwendungsgebiete erstelltes Systemmodell kann für die anderen Anwendungsgebiete übernommen und angepasst werden. Im Folgenden werden die Schwerpunkte und Merkmale der Modellanwendung für die jeweiligen Anwendungsgebiete erläutert:

- *Fabrikplanung*: Aufgrund der weitreichenden Abbildbarkeit des Fabriksystems durch das *Objektmodell* kann die wissensorientierte Fabrikmodellierung grundsätzlich für alle Fabrikplanungsfelder angewendet werden. Dasselbe betrifft die Modellnutzung in Abhängigkeit von den möglichen Planungsfällen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Tendenziell ist der Umfang der Modellnutzung in Bezug auf die abgebildeten Modellebenen bei der Fabrikplanung am größten und der Detaillierungsgrad relativ gering.

- Änderungsmanagement:** Die Maßnahmen des Änderungsmanagements beziehen sich zumeist auf einzelne Arbeitsplätze bzw. *Fabrikelemente* des Fabriksystems. Die Unterstützung des Änderungsmanagements mit dem wissensorientierten Fabrikmodell erfordert i.d.R. eine detailliertere Abbildung des Fabriksystems, als es für die Fabrikplanung erforderlich ist. Hieraus folgt, dass aus der Fabrikplanung bereits im Modell vorliegende *Fabrikelemente*, *Fabrikprozesse* oder *Produktelemente* weiter spezifiziert oder für die Unterstützung des Änderungsmanagements neue Elemente angelegt werden müssen. Durch das wissensorientierte Fabrikmodell werden unter anderem das Erkennen und die Analyse von Änderungsbedarfen am Fabrikssystem aufgrund von Produktänderungen unterstützt. Während das *PE-Modell* für die Fabrikplanung eine untergeordnete Rolle spielt, bietet es sich im Rahmen des Änderungsmanagements an, Beziehungen zwischen *Produktelementen*, *Fabrikprozessen* und *Fabrikelementen* für eine Analyse des späteren produktabhängigen Änderungsbedarfs abzubilden. Im Änderungsmanagement ist vorwiegend fabrikspezifisches Wissen relevant, weshalb der Anteil der referenzmodellgestützten Planung und Modellierung geringer als bei der Fabrikplanung ausfällt.
- Fabrikbetrieb:** Für den Fabrikbetrieb sind vor allem prozessbezogene Informationen von Interesse. Mit dem Modell können im operativen Fabrikbetrieb auftretende Fragen wie „Welche Ressource nutzt dieser Prozess?“, „Wovon ist die Qualität eines Prozesses abhängig?“ oder „An welcher Stelle im Fabriklayout wird ein bestimmtes Produktfeature durch welchen Prozess erzeugt?“ beantwortet werden. Weiterhin lassen sich z.B. Erfahrungswissen über technologische Zusammenhänge oder Instandhaltungswissen für einzelne *Fabrikelemente* festhalten. Die Repetition der Wissensnutzung ist bei der Modellanwendung für den Fabrikbetrieb am höchsten.

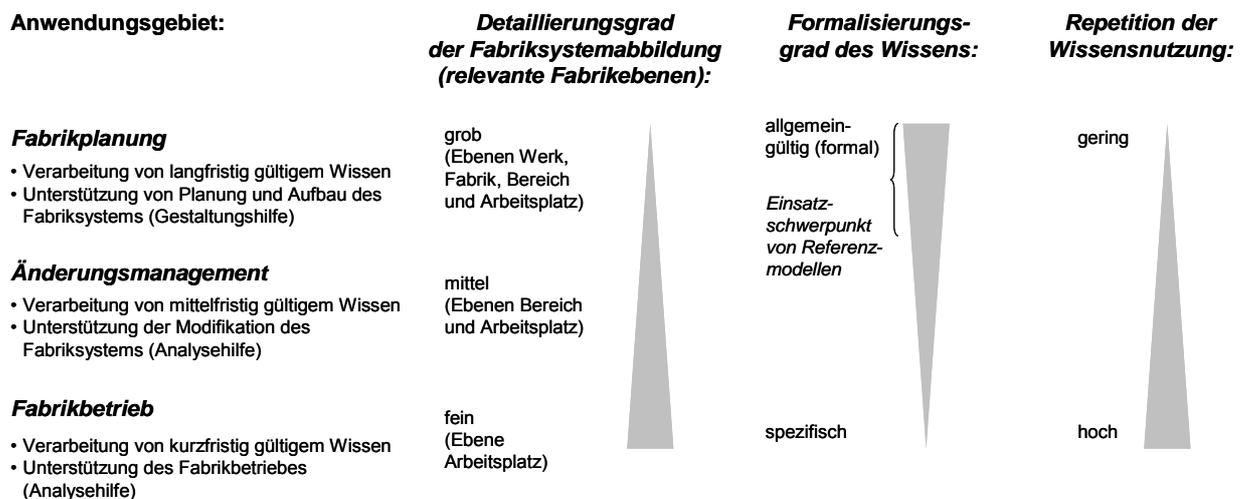


Bild 5-4: Merkmale der Nutzung wissensorientierter Fabrikmodelle

Aus Bild 5-4 wird deutlich, dass sich das wissensorientierte Fabrikmodell durchgängig, jedoch mit anderen Merkmalen der Anwendung im Lebenszyklus einer Fabrik nutzen lässt. Während bei der Fabrikplanung die Planungshilfe und Dokumentation von Planungsinformationen im Vordergrund steht, bietet sich das Modell im Rahmen des Änderungsmanagements und des Fabrikbetriebes als Analyseinstrument und Wissensspeicher an.

5.6 Systematische Vorgehensweisen

Der Nutzwert eines Modells oder eines Werkzeugs steigert sich, wenn mit dessen Einführung verbesserte Arbeitsabläufe und Denkweisen der Mitarbeiter gefördert werden.⁴²⁸ Auch die wissensorientierte Fabrikmodellierung besitzt Potenziale zur Etablierung systematischer Vorgehensweisen in den drei Anwendungsgebieten. In diesem Abschnitt werden zwei Beispiele vorgestellt, bei denen Abbildungsmöglichkeiten der wissensorientierten Fabrikmodellierung in dieser Hinsicht genutzt werden. Mit der Funktionsorientierung wird eine nach den Funktionen einer Fabrik strukturierte und prozessorientierte Planung unterstützt (vgl. Abschnitt 5.6.1) und mit der modellgestützten Änderungsanalyse (vgl. Abschnitt 5.6.2) kann der Änderungsbedarf für ein Fabrikssystem ermittelt werden, sofern die entsprechenden Informationen zuvor in das Modell implementiert wurden.

5.6.1 Funktionsorientierung

Eine durch die wissensorientierte Fabrikmodellierung unterstützte systematische Vorgehensweise bei der Fabrikplanung besteht in der mittels des *FP-Modells* umsetzbaren Funktionsorientierung (vgl. Abschnitt 3.3.2).⁴²⁹ Die Prozesse für einzelne Produktgruppen und Funktionen der Fabrik werden in Vorbereitung der Gestaltung der *Fabrikelemente* definiert. Eine beispielhafte Prozesssammlung, die mit dem *FP-Modell* abgebildet werden könnte, ist in Bild 5-5 dargestellt.

Der Aufbau des *FP-Modells* kann mit einem Referenzmodell unterstützt werden. In diesem Fall sind lediglich Instanzen von vordefinierten Prozessklassen abzuleiten und die sukzessiv in einem Projekt geplanten *Fabrikelemente* konsequent in Bezug zu den abgebildeten *Fabrikprozessen* zu setzen. Dies betrifft nicht nur mit dem *Objektmodell* abgebildete Prozessressourcen, sondern alle *Fabrikelemente*, welche mit Attributen oder Operationen der *Fabrikprozesse* in Beziehung stehen. Die Abbildung der zugehörigen Relationen erfolgt durch das *Relationenmodell*. Die Funktionen können auch mit Hilfe von Prozessketten abgebildet und die Pro-

⁴²⁸ Vgl. Bley et al. (2006), S. 20-21.

⁴²⁹ Hierbei ist anzumerken, dass der Begriff der Funktionsorientierung in Abgrenzung zur Objektorientierung gebraucht wird und die Prozessorientierung der Fertigung keineswegs ausschließt. Die Prozessorientierung ist vielmehr als Merkmal in der Fabrik vorhandener Funktionsketten zu interpretieren.

zessorientierung der Planungsergebnisse für einzelne Produktgruppen und Funktionen mit Hilfe des Modells eruiert werden.



Bild 5-5: Aufstellung von Fabrikprozessen zur Abbildung mit dem FP-Modell

Die funktionsorientierte Vorgehensweise ermöglicht eine Zielfestlegung in Form der Angabe von Soll-Ausprägungen für Prozessattribute. Zusammen mit im Referenzmodell dokumentierten Gestaltungsempfehlungen und Hinweisen zur Ausprägungsbestimmung können die Ist-Ausprägungen gezielt geplant und den Soll-Ausprägungen gegenübergestellt werden. In dem Fall, dass *Fabrikelemente* auf mehrere Prozessattribute einen Einfluss haben, werden Interdependenzen und Zielkonflikte über die abgebildeten Relationen leicht ersichtlich. Der Fabrikplaner hat die Zielkonflikte durch eine Priorisierung von Attributen oder die Entwicklung alternativer Lösungen, die den in Konflikt stehenden Attributen gerecht werden, aufzulösen. Der Soll/Ist-Vergleich bei Prozessattributen kann auch als Vergleichs- und Bewertungsmethode für Planungsvarianten, d.h. unterschiedlichen Gestaltungsvarianten für *Fabrikelemente* eingesetzt werden.⁴³⁰

Die Vorgehensweise bei der Fabrikplanung auf Basis des Soll/Ist-Vergleichs von Attributausprägungen kann mit dem PDCA-Zyklus weiter systematisiert werden. Bei dem Zyklus handelt es sich um einen Problemlauf, der auf dem Prinzip der ständigen Verbesserung von Prozessen beruht. Der Zyklus gliedert sich in die Aktivitäten Planen einer Verbesserung, Ausführung der Verbesserung, Überprüfung der Wirkung einer Verbesserung und Anpassungen.⁴³¹ In Bild 5-6 werden diese vier Zyklen auf die Anwendung des *FP-Modells* für eine systematische funktionsorientierte Fabrikplanung übertragen.

⁴³⁰ Im Zusammenhang mit einer Anwendung im Fabrikprozess-Modell lässt sich der Soll-/Ist-Vergleich als Bewertungsmethode bezeichnen. Vgl. folgende Definition im Brockhaus (2005): „Bewertungsmethoden dienen der Steigerung der Rationalität bei Entscheidungsproblemen. Sie bieten eine geistige Grundlage für planmäßiges, folgerichtiges Verfahren, Vorgehen, Forschen oder Handeln und ermöglichen damit dem Nutzer Entscheidungsprobleme auf die relevanten, wesentlichen, entscheidungserheblichen Elemente zu reduzieren.“

⁴³¹ Vgl. Schmelzer; Sesselmann (2004), S. 255.

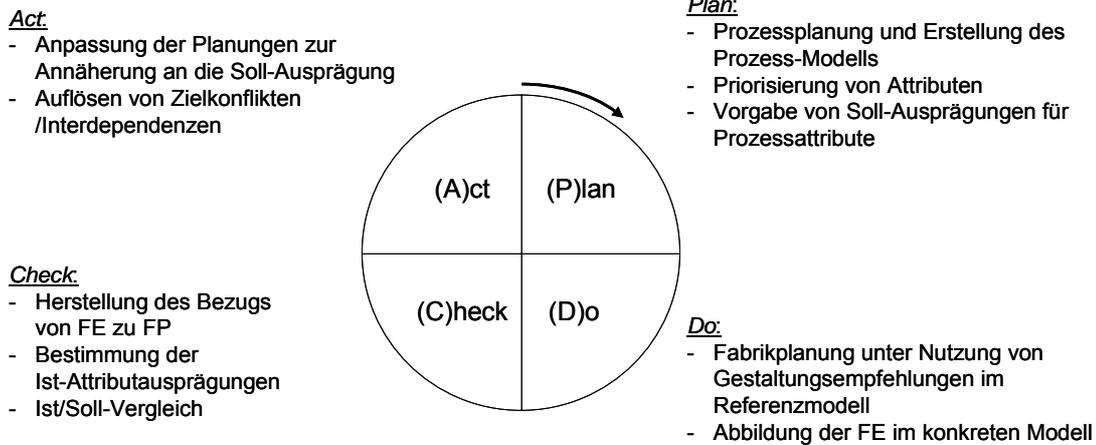


Bild 5-6: Zielorientierte Planung von Fabrikprozessen

Mit der im Bild 5-6 dargestellten Vorgehensweise lässt sich nicht nur die initiale Fabrikplanung unterstützen, sondern im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses die permanente Anpassung der Fabrik an das durch die Soll-Ausprägung von Prozessattributen beschriebene Optimum nachvollziehen.

5.6.2 Änderungsanalyse

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des wissensorientierten Fabrikmodells besteht in der systematischen Unterstützung des Änderungsprozesses in Fabriken (vgl. Abschnitt 2.1.3). Hier bietet sich insbesondere eine Nutzung für die Änderungsanalyse an, bei welcher der Einfluss von Veränderungstreibern auf ein Fabrikssystem eruiert wird.⁴³² Im Rahmen der modellgestützten Änderungsanalyse sollen drei Typen von Veränderungstreibern spezifiziert werden:

- *Veränderung eines Produktattributes (Typ 1):* Unter diesen Typ fallen alle Änderungen an einem Feature, Bauteil oder einer Baugruppe eines mit dem *PE-Modell* erfassten Produktes, bei denen ein Attribut, z.B. der Werkstoff oder die Tiefe einer Bohrung, verändert wird.
- *Veränderung des Produktionsprogramms (Typ 2):* Dieser Typ schließt die Produktion neuer Produkte als auch die Mengenänderungen von bestehenden Produkten ein.
- *Produktunabhängige Veränderungstreiber (Typ 3):* Die Veränderungstreiber vom Typ 3 umfassen alle produktunabhängigen Anforderungsänderungen mit unternehmensinternen oder unternehmensexternen Ursprung. Hierzu gehören etwa Rationalisierungs-

⁴³² Vgl. Wiendahl (2002), S. 125 zur Verwendung des Begriffes „Veränderungstreiber“.

aufgaben zur allgemeinen Effizienzsteigerung, Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen oder die Erneuerung von Produktionstechnologien.

Die drei Typen sind in Bild 5-7 als Ausgangspunkt der Änderungsanalyse dargestellt. Die Veränderungstreiber wirken jeweils auf einen *Fabrikprozess*, welcher als „Einstiegspunkt“ für die Analyse dient. Die Änderungsanalyse ist durch ein zweistufiges Vorgehen charakterisiert, bei dem für jede Schnittstelle zwischen den Partialmodellen je eine Relevanz- und eine Wirkungsanalyse durchgeführt werden:

- *Relevanzanalyse*: Die Relevanzanalyse dient der Bestimmung mit dem Modell abgebildeter *Fabrikprozesse* bzw. *Fabrikelemente* eines Gesamtsystems, die einen unmittelbaren bzw. mittelbaren Bezug zu einem Veränderungstreiber haben.
- *Wirkungsanalyse*: Mit der Wirkungsanalyse wird überprüft, ob sich aus einem bestehenden Bezug zwischen Veränderungstreiber und *Fabrikprozess* bzw. *Fabrikelement* tatsächlich eine Änderung am *Fabrikprozess* bzw. *Fabrikelement* ergibt. Ob aus einer potenziellen Änderung eine reale Systemänderung wird, hängt z.B. von der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der *Fabrikelemente* ab.⁴³³

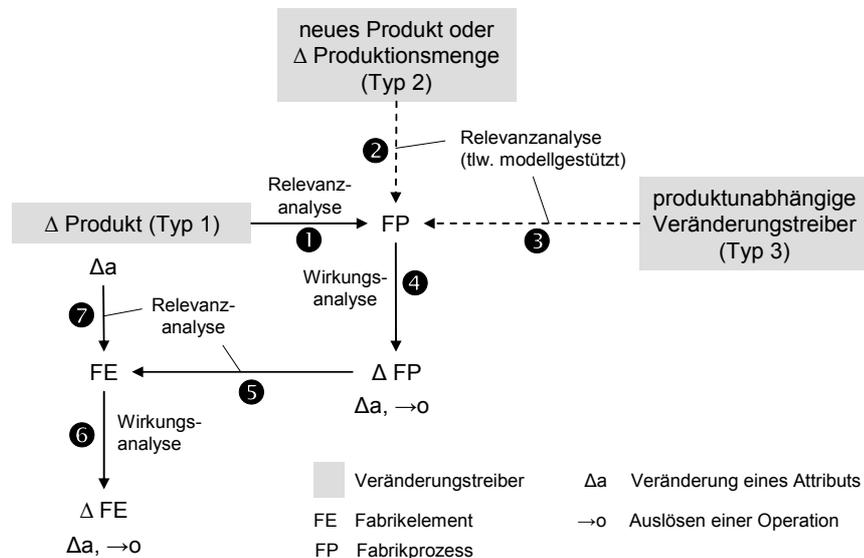


Bild 5-7: Unterstützung der Änderungsanalyse mit dem wissensorientierten Fabrikmodell

Am durchgängigsten unterstützt das wissensorientierte Fabrikmodell die Änderungsanalyse bei Veränderungstreibern vom Typ 1. Über die Zuordnung von *Produktelementen* zu *Fabrikprozessen* können im Rahmen der Relevanzanalyse (1) zunächst die für einen Änderungstreiber relevanten Prozesse identifiziert werden. Im Rahmen der Wirkungsanalyse (4) ist

⁴³³ Bei der Wirkungsanalyse handelt es sich um eine qualitative Untersuchung von Interdependenzen im Fabrik-system. Vgl. auch eine qualitative Modellierung von Interdependenzen bei Meier; Hanenkamp (2003b), S. 52.

durch den Modellnutzer festzustellen, welche *FP-Attribute* und *FP-Operationen* für einen Veränderungstreiber relevant sind und inwieweit diese tatsächlich verändert bzw. ausgeführt werden müssen. Die Identifikation der für die Prozessänderung maßgeblichen *Fabrikelemente* erfolgt mit der Relevanzanalyse (⑤). Mit der Wirkungsanalyse für *Fabrikelemente* (⑥) werden letztendlich notwendige Veränderungen von *FE-Attributen* und das Ausführen von *FE-Operationen* bestimmt. Mit dem *Relationenmodell* können direkte Beziehungen zwischen Produktattributen und Attributen und Operationen von *Fabrikelementen* abgebildet werden. Hieraus resultiert eine Relevanzanalyse (⑦), bei der von *Produktelementen* direkt auf *Fabrikelemente* verwiesen wird.

Bei Veränderungstreibern vom Typ 2 werden zwei Fälle unterschieden. Ändert sich die Anzahl der zu fertigenden Produkte, so kann mit Hilfe des Modells auf die *entsprechenden Fabrikprozesse* geschlossen (②) und wie bei Typ 1 verfahren werden. Werden jedoch neue Produkte in das *PE-Modell* aufgenommen, dann müssen zunächst Prozesszuordnungen erfolgen und ggf. neue *Fabrikprozesse* im *FP-Modell* angelegt werden. Nur im ersten Fall kann der Einfluss auf die *Fabrikelemente* über (④) bis (⑥) modellgestützt analysiert werden. Im zweiten Fall können keine Informationen im Modell vorliegen.

Im Fall von Veränderungstreibern des Typs 3 werden mit der Relevanzanalyse (③) die betroffenen Prozesse durch den Planer modellungestützt ermittelt und etwaige Wirkungen auf *Fabrikelemente* mit den Analyseschritten (④) bis (⑥) abgeleitet.

Die Änderungsanalyse ist kein automatisierter Prozess, vielmehr werden dem Modellnutzer mit dem wissensorientierten Fabrikmodell bekannte Informationen über Relationen im Ist-System bereitgestellt. Eine Erweiterung der Unterstützung für die Änderungsanalyse stellt die Markierung von kritischen Elementen und ihren Attributen und Operationen im Fabrikssystem dar. Kritisch bedeutet, dass für das Fabrikssystem aufwendige Anpassungen notwendig sind, falls Änderungen an diesen Attributen vorgenommen bzw. bestimmte Operationen ausgeführt werden müssen. Kritische Elemente zeichnen sich z.B. darin aus, dass sie mit vielen anderen Systemelementen in Beziehung stehen und dort Wirkungen induzieren oder die Veränderung des Elements sehr aufwendig ist.

6 Modellimplementierung

Die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung der wissensorientierten Fabrikmodellierung ist die Verwendung von Referenzmodellen, die systematische Planung der Modellanwendung sowie die Implementierung in einem Werkzeug. Die Erstellung von Referenzmodellen ist Inhalt des Abschnitts 6.1. Der Planungsprozess für die fabrikspezifische Modellanwendung wird im Abschnitt 6.2 vorgestellt und im Abschnitt 6.3 auf das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Werkzeug FabrikNet eingegangen. Der Einsatz des Werkzeuges erfolgte in dem im Abschnitt 6.4 beschriebenen Anwendungsszenario. In diesem Rahmen wurde auch die Erprobung von Teilen des Instrumentariums zur wissensorientierten Fabrikmodellierung vorgenommen.

6.1 Referenzmodellerstellung

In das Referenzmodell sollte aufgrund seines allgemeingültigen Charakters (vgl. Abschnitt 5.2) das Wissen mehrerer Wissensdomänen (vgl. Abschnitt 5.1) und damit von Experten unterschiedlicher für die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb relevanter Fachrichtungen aufgenommen werden.⁴³⁴ Die Beteiligung einer Vielzahl von Experten erhöht die Breite und Tiefe der Systemabbildung und fördert die Qualität und die Vollständigkeit des abgebildeten Wissens. Hierdurch wird bspw. die auf Heuristiken und Erfahrungswerten aufbauende Identifikation von Klassen und die Entwicklung eines einheitlichen Begriffsverständnisses unterstützt.⁴³⁵

Die Erstellung des Referenzmodells erfolgt unabhängig von spezifischen Problemstellungen und Fabrikssystemen.⁴³⁶ Die zukünftigen Problemstellungen sind zum Zeitpunkt der Referenzmodellerstellung nicht bekannt, weshalb der Nutzen eines Referenzmodells insbesondere von der Anzahl der dokumentierten Informationen abhängt. Der Rahmen zum Aufbau eines Referenzmodells kann z.B. wie folgt ausfallen:

- *Unternehmensspezifisches Referenzmodell*: Das Referenzmodell wird durch ein produzierendes Unternehmen für seine spezifischen *Produktelemente*, *Fabrikprozesse* und *Fabrikelemente* aufgebaut und zur Abbildung mehrerer zum Unternehmen gehörender Fabrikssysteme eingesetzt.
- *Referenzmodell eines Unternehmensnetzwerkes*: Dieses Referenzmodell wird durch mehrere Unternehmen, z.B. koordiniert durch einen Facharbeitskreis, aufgebaut und genutzt.

⁴³⁴ Vgl. z.B. Landwehr (2007), S. 177 zu den für die Fabrikplanung relevanten Fachrichtungen.

⁴³⁵ Vgl. Jeckle et al. (2004), S. 38-39 zur Identifikation von Klassen bei der objektorientierten Modellierung.

⁴³⁶ Vgl. bei Geckler; Rehnelt (2004), S. 29 die Entwicklung einer Stammbibliothek als unabhängiger Wissensspeicher.

- *Referenzmodell als Produkt*: Das Referenzmodell wird von einem Dienstleistungsunternehmen erstellt und im Rahmen von Fabrikplanungsdienstleistungen eingesetzt bzw. an andere Unternehmen verkauft.

Ein Referenzmodell unterliegt nach seiner erstmaligen Erstellung einem Änderungsprozess. Neben der Aktualisierung und Ergänzung mit bisher nicht berücksichtigten Systemelementen ist eine Aktualisierung des implementierten Wissens und der hinterlegten Informationen notwendig.⁴³⁷ Bei der Anwendung des Referenzmodells ist zu berücksichtigen, dass die abgebildeten Informationen einen allgemeingültigen Charakter aufweisen. Der Modellnutzer hat die Relevanz und Gültigkeit von Referenzmodellinformationen für das konkrete Fabrikssystem selbstständig zu prüfen.

6.2 Fabrik spezifische Modellerstellung

Das in Abschnitt 6.1 thematisierte Referenzmodell wird für die Mehrfachanwendung bei unterschiedlichen Fabrikssystemen erstellt. In diesem Abschnitt wird hingegen auf die Einführung und den Aufbau von fabrik spezifischen wissensorientierten Fabrikmodellen eingegangen. Mit dem Ziel, den Nutzen aus einer Fabrikssystemabbildung zu maximieren, enthält der Abschnitt 6.2.1 Hinweise für die Abschätzung des Nutzenpotenzials. Im Abschnitt 6.2.2 erfolgt zusätzlich die Beschreibung eines Vorgehensmodells für die wirtschaftliche Modellanwendung. Im Abschnitt 6.2.3 wird daraufhin gesondert auf den Prozess der Modellerstellung eingegangen.

6.2.1 Abschätzung des Nutzenpotenzials

Bei dem wissensorientierten Fabrikmodell handelt es sich um ein Beschreibungsmodell, woraus folgt, dass zunächst alle Informationen eingepflegt und später aktuell gehalten werden müssen. Auf eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll an dieser Stelle verzichtet werden. Mit Bild 6-1 wird jedoch auf den Zusammenhang zwischen Kosten der Modellerstellung und Modellpflege sowie Nutzen aus dem Modell hingewiesen.

⁴³⁷ Neue Modellelemente entstehen z.B. durch neue Technologien, Verfahren oder Konzepte.

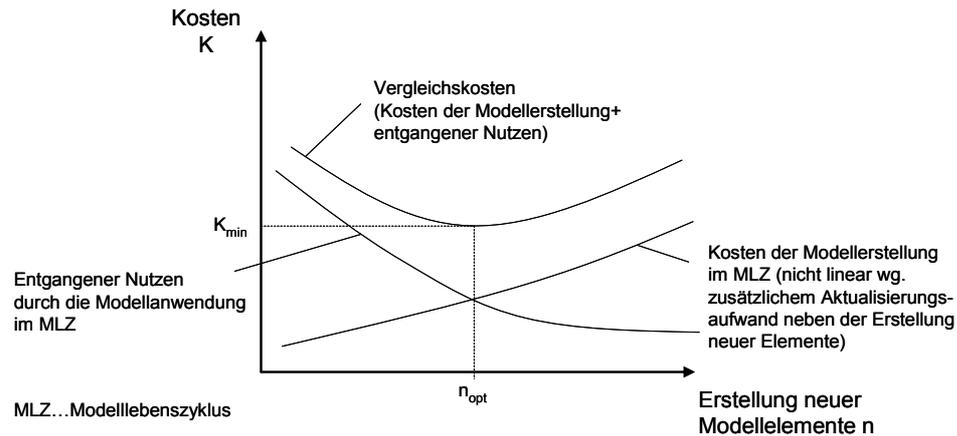


Bild 6-1: Wirtschaftlichkeit der Modellabbildung

Die Anwendung des wissensorientierten Fabrikmodells ist durch den Modellnutzer so zu gestalten, dass der Punkt n_{opt} in Bild 6-1 erreicht wird. Die Modellerstellung sollte deshalb auf die Wissensdomänen und Systemelemente beschränkt werden, bei denen der zu erwartende Nutzen am höchsten ist. Der Modellnutzen ergibt sich insbesondere aus:⁴³⁸

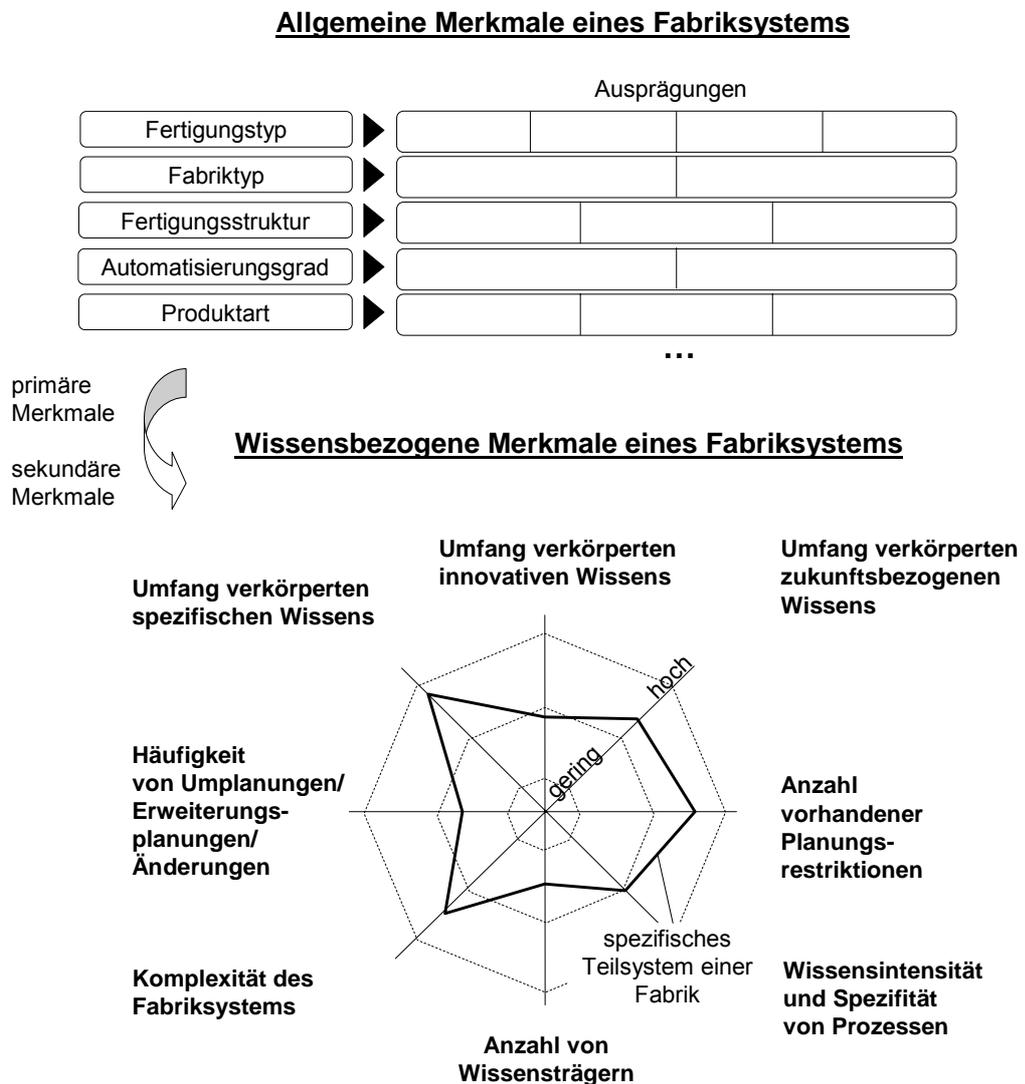
- der Aufwandsreduzierung bei der Informationsbeschaffung für Problemlösungen im Fabriklebenszyklus sowie
- einer Qualitätsverbesserung der Problemlösung aufgrund der Verfügbarkeit von vollständigen Informationen und zusätzlichem im konkreten Modell oder Referenzmodell hinterlegtem Wissen.

Die Höhe des Modellnutzens ist von den Merkmalen des Fabrik-systems abhängig (vgl. Bild 6-2). Grundsätzlich gilt, je häufiger Änderungen am Fabrik-system zu erwarten sind bzw. je häufiger Informationen über das Fabrik-system abgefragt werden müssen und umso mehr Beteiligte auf das Modell zugreifen, desto häufiger kann das wissensorientierte Fabrikmodell nutzbringend eingesetzt werden. Für das Anwendungsgebiet der Fabrikplanung entsteht der Nutzen insbesondere aus den hinterlegten Referenzinformationen. Die Bereitstellung von diesem allgemeingültigen und formalisierten Wissen hat erst ein hohes Nutzenpotenzial, wenn es sich um Erfahrungswissen für spezifische Problemstellungen handelt, die nicht Allgemeinwissen von Fabrikplanern darstellen. Die wissensorientierte Fabrikmodellierung sollte auf die Teilsysteme einer Fabrik beschränkt werden, bei denen der Nutzen aus dem Modell über den Kosten im Modelllebenszyklus liegt.

Zur Identifikation geeigneter Teilsysteme sind in Bild 6-2 wissensbezogene Merkmale eines Fabrik-systems in einem Netzdiagramm aufgeführt. Diese ergeben sich aus den primären all-

⁴³⁸ Vgl. auch Meierlohr (2003), S. 143 für typische Vor- und Nachteile von Informationssystemen.

gemeinen Merkmalen eines Fabriksystems, wie sie bspw. in einer Morphologie dargestellt werden können.



Eine hohe Ausprägung der wissensbezogenen Merkmale ist ein Indikator für ein hohes Potenzial der wissensorientierten Fabrikmodellierung.

Bild 6-2: Merkmale von Fabrikssystemen

Zu den wissensbezogenen Merkmalen aus Bild 6-2 gehören unter anderem „verkörpertes Wissen“ und die „Wissensintensität von Prozessen“. Ein Fabrikssystem besitzt einen hohen Umfang verkörpertem Wissen, wenn bei der Gestaltung des Systems viele nicht triviale Aspekte Berücksichtigung finden, die zudem nicht explizit durch das Gestaltungsergebnis repräsentiert werden. Zur Identifikation von wissensintensiven Prozessen bietet sich ein Rückgriff auf die im Wissensmanagement beschriebenen Merkmale von Einmalprozessen an. Diese sind bspw. hohe Informationslastigkeit, hoher Grad der Veränderlichkeit, starke Interprozessver-

flechtung, unbestimmter Informationsbedarf sowie starke Arbeitsteilung.⁴³⁹ Treffen diese Merkmalsausprägungen auf die Planung und spätere Ausführung eines *Fabrikprozesses* zu, so soll von einem wissensintensiven *Fabrikprozess* im Sinne dieser Arbeit gesprochen werden.

6.2.2 Vorgehensmodell für die Modellanwendung

Aufgrund der Verwandtschaft der Modellierung im Allgemeinen mit Vorhaben aus der Softwareentwicklung sollte die Modellerstellung in sukzessiven Phasen mit Rückkopplungsschleifen zwischen den Phasen erfolgen.⁴⁴⁰ Das in Bild 6-3 dargestellte Vorgehensmodell berücksichtigt diese Forderung und beinhaltet zusätzlich die drei Meilensteine Initiierung (M1), Wirtschaftlichkeitsnachweis (M2) und Nutzungsfähigkeit (M3). Die Initiierung (M1) erfolgt durch einen Entscheidungsträger, der im Unternehmen für den Einsatz digitaler Fabrikplanungswerkzeuge (vgl. Abschnitt 2.1.6) verantwortlich ist und ein Nutzenpotenzial (vgl. Abschnitt 6.2.1) erkennt.

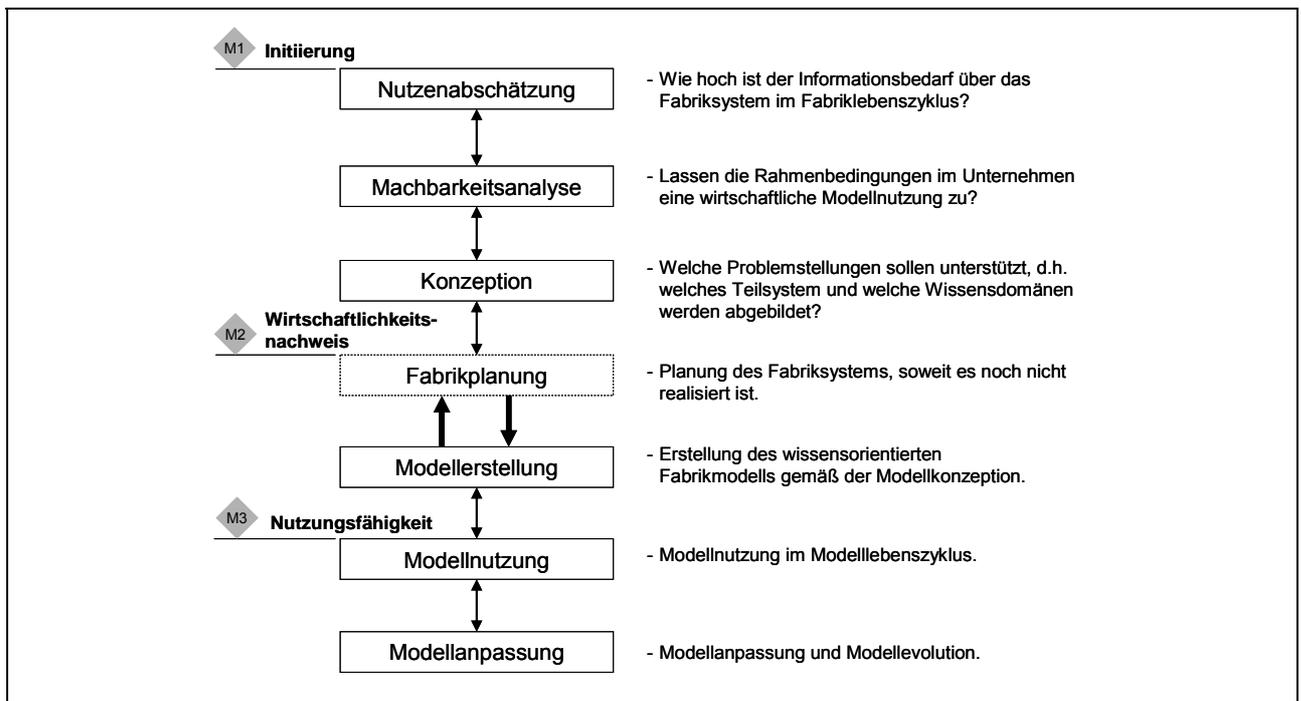


Bild 6-3: Vorgehensmodell für die Modellanwendung

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells kurz erläutert:

- *Nutzenabschätzung*: Im Rahmen der Nutzenabschätzung ist zunächst gemäß den Hinweisen im Abschnitt 6.2.1 zu eruieren, inwieweit ein zu planendes bzw. bereits bestehendes Fabrikssystem die für eine wissensorientierte Fabrikmodellierung ge-

⁴³⁹ Vgl. Picot; Rohrbach (1995), S. 31 und Schwarz et al. (2001), S. 7.

⁴⁴⁰ Vgl. das aus der Softwareentwicklung bekannte Wasserfallmodell. Beschrieben z.B. bei Balzert (1998), S. 99.

eigneten Merkmale aufweist und für welche Problemstellungen das Modell eingesetzt werden soll.

- *Machbarkeitsanalyse*: Bei der Machbarkeitsanalyse wird überprüft, inwieweit sich die Modellerstellung und die Modellnutzung organisatorisch und technisch in das Unternehmen implementieren lassen. Auf der organisatorischen Seite sind z.B. die Personalkapazität und die Mitarbeiterqualifikation zu prüfen. Auf der technischen Seite steht die Überprüfung der synergetischen Nutzung eines Werkzeuges zur wissensorientierten Fabrikmodellierung mit vorhandenen digitalen Fabrikplanungslösungen im Vordergrund.
- *Konzeption*: Die Konzeptionsphase für den Modelleinsatz dient letztendlich der Abgrenzung des Teilsystems der Fabrik, das abgebildet werden soll. Dies kann z.B. dadurch geschehen, dass besonders wissensintensive *Fabrikprozesse* für den Fabrikbetrieb oder relevante *Produktelemente* für das Änderungsmanagement bestimmt werden. Neben der Festlegung eines spezifischen Anwendungsgebiets erfolgen darüber hinaus die Auswahl relevanter Wissensdomänen sowie die Ermittlung eines Referenzmodells. In der Konzeptionsphase werden die Kosten der Modellerstellung und Modellpflege maßgeblich determiniert. Mit einer Kosten-Nutzenanalyse lässt sich die Vorteilhaftigkeit der Modellerstellung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Nutzenabschätzung und Machbarkeitsanalyse für ein Fabrikssystem ermitteln.
- *Fabrikplanung & Modellerstellung*: Bei vorliegender Wirtschaftlichkeit (M2) wird die Erstellung des wissensorientierten Fabrikmodells, ggf. parallel und sukzessive zum Planungsprozess, vorgenommen. Auf die Modellerstellung wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.
- *Modellnutzung & Modellanpassung*: Mit der Fertigstellung des Modells (M3) kann die Übergabe an den zukünftigen Modellnutzer stattfinden. Daraufhin folgt die Phase der Nutzung und permanenten Anpassung. Die Sicherstellung der Modellaktualität im Fabriklebenszyklus ist unabdingbar für eine nutzbringende Anwendung für das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb. Zur Sicherstellung der Modellaktualität nach einer Veränderung des realen Fabriksystems sollte die Anpassung des wissensorientierten Fabrikmodells verbindlich in die Unternehmensabläufe integriert werden.⁴⁴¹

Bei dem wissensorientierten Fabrikmodell handelt es sich um ein evolutionäres Modell.⁴⁴² Ein Modell sollte zunächst wenige relevante und bezogen auf den Anwendungszweck vollständig beschriebene Objekte enthalten, die bei Bedarf für weitere Problemstellungen gezielt ange-

⁴⁴¹ z.B. als Voraussetzung für die Abnahme von Meilensteinen in Planungsprojekten.

⁴⁴² Vgl. Balzert (1998), S. 120 zu evolutionären Modellen.

passt und erweitert werden.⁴⁴³ Auch wenn das wissensorientierte Fabrikmodell statisch ist, lässt sich die Veränderung und Evolution des Fabriksystems ersatzweise durch die Aufzeichnung der Modellhistorie nachbilden.

6.2.3 Modellerstellung

In diesem Abschnitt wird die Phase „Modellerstellung“ aus Abschnitt 6.2.2 detaillierter beschrieben. Zwischen dem Denkprozess des Modellnutzers, der Modellerstellung und dem Informations- und Wissensabruf aus dem wissensorientierten Fabrikmodell bestehen permanente Wechselbeziehungen (vgl. Abschnitt 1.3). Der Aufbau des wissensorientierten Fabrikmodells beginnt mit der Anlage von Klassen und Instanzen der Partialmodelle des *Objektmodells* (vgl. Bild 6-4):

- *PE-Modell*: Der Aufbau dieses Partialmodells kann bei einem nicht vorhandenen Fabrikssystem vor dem Start der eigentlichen Fabrikplanung erfolgen (❶), da Informationen über die in einer Fabrik zu fertigenden Produkte typischerweise Eingangsinformationen für die Fabrikplanung sind. In das *PE-Modell* werden zunächst die bei der Modellkonzeption (vgl. Abschnitt 6.2.2) festgelegten *Produktelemente* abgebildet.
- *FP-Modell*: Die Auswahl der abzubildenden *Fabrikprozesse* ist davon abhängig, auf welche Aspekte von Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb der aktuelle und zukünftige Fokus der Modellnutzung liegen wird. Eine Orientierung bieten zu Beginn die in der Phase der Modellkonzeption ausgewählten *Fabrikprozesse* (❷), die im *FP-Modell* mit einer zunehmenden Detailliertheit der Planung weiter untersetzt werden (❸).
- *FE-Modell*: Das *FE-Modell* wird parallel zu den Detailprozessen im *FP-Modell* sukzessive aufgebaut (❹). Die Art und der Umfang der abzubildenden *Fabrikelemente* werden dem Modellnutzer durch die in der Konzeptionsphase bestimmten Wissensdomänen und Anwendungsgebiete vorgegeben.

⁴⁴³ Vgl. die postulierte Vorgehensweise bei Fischer (1995), S. 36-37.

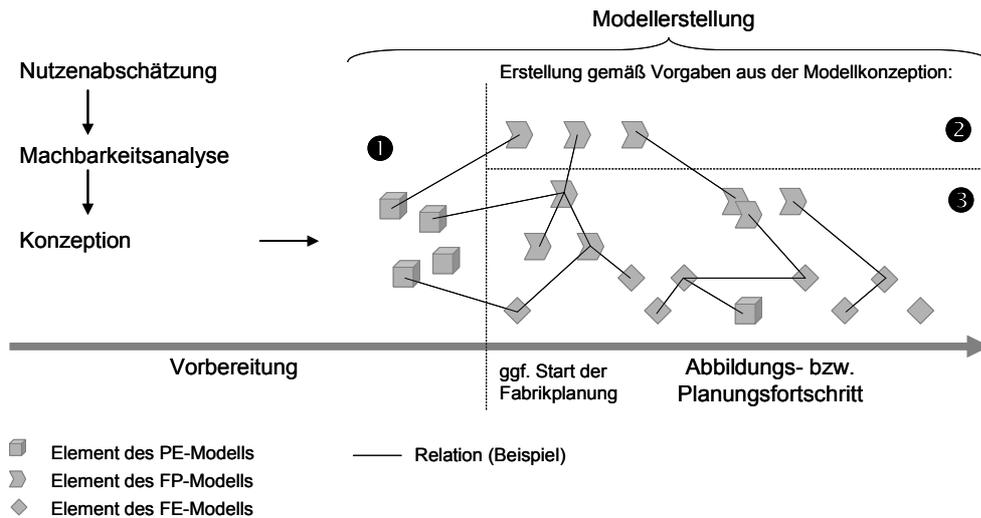


Bild 6-4: Ablauf der Modellerstellung

Nach Erstellung der ersten beiden Instanzen des *Objektmodells* ist es möglich, Relationen im Modell abzubilden. Auch hier richtet sich die Auswahl der abzubildenden Modellelemente nach den in der Konzeptionsphase des Modells bestimmten Wissensdomänen und Anwendungsgebieten. Im Fall einer parallel zur Fabrikplanung vorgenommenen Modellabbildung können die in das konkrete Modell eingepflegten Informationen in den jeweils folgenden Planungsschritten abgefragt werden.

Das konkrete Modell unterliegt ständigen Anpassungen, da bei der Fabrikplanung und durch das Änderungsmanagement vorläufige und neue Planungsstände generiert bzw. Systemveränderungen ausgelöst und im Idealfall synchron im Modell nachvollzogen werden. Für den Fall, dass die Elemente des *Objektmodells* dabei erhalten bleiben bzw. lediglich neue hinzukommen, besteht die Modellanpassung in der Modifikation, dem Hinzufügen bzw. der Entfernung von Relationen. Werden Elemente des Objektmodells hingegen entfernt, dann entfallen auch die zu diesen Elementen gehörenden Relationen. Bei einer Substitution von Elementen ist zu überprüfen, inwieweit die Relationen vom substituierten Element auch für das neue Element gelten.

6.3 Werkzeugentwicklung

Die Anwendung des Informationsmodells setzt den Einsatz eines digitalen Fabrikplanungswerkzeugs voraus. Die Systemarchitektur einer prototypischen Umsetzung mit dem Werkzeug FabrikNet wird im Abschnitt 6.3.1 vorgestellt. Im Abschnitt 6.3.2 und 6.3.3 wird auf die beiden Benutzerschnittstellen von FabrikNet eingegangen.

6.3.1 Systemarchitektur

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Werkzeug FabrikNet eine prototypische Implementierung der wissensorientierten Fabrikmodellierung vorgenommen. In Bild 6-5 ist der Aufbau des Werkzeugs dargestellt. Die Klassen und Instanzen des *Objektmodells*, die Relationen des *Relationenmodells* sowie ergänzende Informationen zu Objekten und Relationen werden in einer Microsoft Access-Datenbank gespeichert. Die Benutzerschnittstelle besteht aus einem Formular, mit dem Modellelemente angelegt und verwaltet werden können. Die Abfragekomponente enthält in Visual Basic for Applications (VBA) programmierte Routinen, welche die Abfrage von Informationen aus der Wissensbasis erlauben. Die Visualisierung wird mit der vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung entwickelten VR-Umgebung IVS_VDT vorgenommen. Der Datenaustausch zwischen der Datenbank und der Visualisierungskomponente erfolgt über eine ODBC-Schnittstelle.

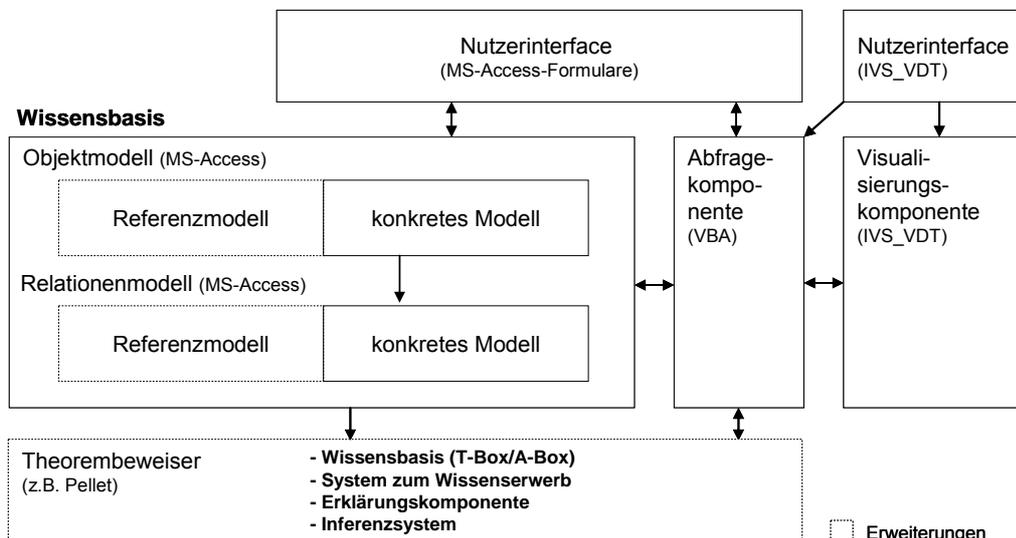


Bild 6-5: Systemarchitektur des Werkzeugs FabrikNet

Die durch die Abfragekomponente ausgeführten Abfragen werden entweder in den Formularen oder über das Nutzerinterface der Visualisierungskomponente spezifiziert. Abfrageergebnisse, welche sich grafisch dargestellten Objekten zuordnen lassen, werden an die Visualisierungskomponente zur Informationsvisualisierung weitergegeben. Alternativ erfolgt die Darstellung sämtlicher Abfrageergebnisse in Textform in den Formularen. Das Werkzeug FabrikNet ist durch eine Bidirektionalität zwischen Datenbank und Visualisierungskomponente gekennzeichnet. Die Auswahl grafischer Objekte im VR-System löst eine Abfrage in der Datenbank aus, welche die Relationen und Informationen zu diesem Objekt an das VR-System zurück gibt. Die Visualisierungskomponente wird somit zu einem Navigator durch die in der Wissensbasis hinterlegten Informationsstrukturen. Das semantische Netz kann von „Knoten“ zu „Knoten“ durchlaufen werden. Komplexere Datenbankabfragen, die eine Vielzahl von Knoten und Relationen als Ergebnis liefern werden über das Formular formuliert und

im VR-System visualisiert.

Auf eine mögliche Erweiterung des VR-Systems weist in Bild 6-5 der Kasten „Theorembeweiser“ hin. An diesen werden die Modellelemente aus der Datenbank übergeben und in die DL-Beschreibungssprache transformiert. Ein System zum Wissenserwerb dient dazu weitere komplexe Sätze in die Wissensbasis des Theorembeweisers aufzunehmen. Mit der Erweiterung des Prototyps um einen Theorembeweiser können letztendlich Inferenzprozeduren einschließende Abfragen formuliert werden.

6.3.2 Wissensbasis

In diesem Abschnitt wird die Benutzerschnittstelle der Datenbank zur wissensorientierten Fabrikmodellierung vorgestellt. Diese wurde mit einem Formular realisiert, bei dem auf mehreren Unterformularen die Elemente und Relationen des Gesamtsystems angelegt und verwaltet werden können:

- *Modellelemente anlegen/löschen:* In diesem Formular (vgl. Bild 6-6) erfolgt die Anlage von Klassen, Attributen, Operationen und Relationen. Die Klassen werden einem der drei Partialmodelle zugeordnet und erben die Attribute und Operationen der ggf. angegebenen Oberklasse. Neben den vererbten Eigenschaften können jeder Klasse weitere Attribute und Operationen zugeordnet werden.

Bild 6-6: Formularblatt „Modellelemente anlegen/löschen“

- *Systemelemente verwalten*: Hier erfolgt die Erzeugung von Instanzen und damit den Elementen des Gesamtsystems. Zu jeder Instanz können objektbezogene Informationen sowie Informationen zu Attributen und Operationen der jeweiligen Objekte hinterlegt werden.
- *Semantisches Netz*: Die Relationen des *Relationenmodells* werden auf diesem Formular verwaltet (vgl. Bild 6-7). Zu jeder Relation lassen sich erläuternde Informationen angeben.
- *Referenzinformationen*: In diesem Formular erfolgt die Anlage der im Abschnitt 5.2 eingeführten Referenzrelationen der TBox, die als Planungshilfe für Objekte der betreffenden Klasse genutzt werden können.

The screenshot shows the 'FabrikNet : Formular' window with the 'Semantisches Netz' tab selected. The interface is organized into several panels:

- Ausgangsknoten:** A dropdown menu shows 'Kernwagen_1'. Below it, 'Klassentyp:' is 'FEKlasse' and 'Klassenname:' is 'Kernwagen'. There are buttons for 'Eigenschaften:' with sub-buttons for 'Attribute' and 'Operationen'. A list of attributes includes 'Luftfeuchtigkeit' and 'Temperatur'.
- Zielknoten:** A dropdown menu shows 'Giessrundtisch_1'. Below it, 'Klassentyp:' is 'FEKlasse' and 'Klassenname:' is 'Giessrundtisch'. There are buttons for 'Eigenschaften:' with sub-buttons for 'Attribute' and 'Operationen'. A list of attributes includes 'Orientierung' and 'Objekt'.
- Beziehung:** A text area contains the relationship 'hat_Teilprozess nutzt ist_abhängig_von bestimmt'. Below it is a 'Kommentar:' field.
- Buttons:** 'Relation anlegen' and 'Relation löschen' are located at the bottom right.
- Table 'Alle Beziehungen im Überblick:':** A table listing various relationships between model elements.

Ausgangsknoten	Beziehung	Zielknoten
Form_1	Standzeit	ist_abhängig_von
Formaufnahme_1	Flexibilität	bestimmt
Giessen_Kette_1	Taktzeit	bestimmt
Giessen_Kette_1	Taktzeit	ist_abhängig_von
Giessrundtisch_1	Objekt	nutzt
Kern_1	Standzeit	ist_abhängig_von
Kern_einlegen_1	Fehlerquote	ist_abhängig_von
Kernherstellung_Kette_1	Temperatur	bestimmt
Kernwagen_1	Temperatur	bestimmt
Kernwagen_1	Temperatur	ist_abhängig_von
Giessen_Kette_1	Durchsatz	Giessen_Kette_1
Kern_einlegen_1	Fehlerquote	Kern_einlegen_1
Giessen_Kette_2	Taktzeit	Giessen_Kette_2
Kern_1	Material	Kern_1
Abluftanlage_1	Objekt	Abluftanlage_1
Kern_1	Konsistenz	Kern_1
Formaufnahme_1	Flexibilität	Formaufnahme_1
Kern_1	Konsistenz	Kern_1
Kern_1	Standzeit	Kern_1
Giessrundtisch_1	Standzeit	Giessrundtisch_1
- Bottom Section:** A table with columns 'Ausgangsknoteneigenschaft', 'Beziehung', and 'Zielknoteneigenschaft'. The selected row shows 'Kern_1' for the source, 'bestimmt' for the relationship, and 'Standzeit' for the target.

Bild 6-7: Formularblatt „Semantisches Netz“

Das Formular erlaubt weiterhin auf dem Unterformular „Abfragen ausführen“ die Generierung von Datenbankabfragen, deren Ergebnisse über die ODBC-Schnittstelle an die Visualisierungskomponente weitergegeben werden. Mit diesen Abfragen können mehrere für ein Problem relevante Elemente und Relationen ermittelt und gleichzeitig im grafischen Modell dargestellt werden. Im Gegensatz zur explorativen Navigation durch die Informationsstrukturen über die Benutzerschnittstelle der Visualisierungskomponente (vgl. Abschnitt 6.3.3) lassen sich so auch nicht direkt in Relation stehende Elemente gleichzeitig darstellen.

6.3.3 Visualisierungskomponente

Die semantischen Relationen aus der Datenbank können mit der VR-Visualisierungskomponente in einem 3D-Fabrikmodell dargestellt werden (vgl. Bild 6-8). *Produktelemente*, *Fabrikprozesse* und *Fabrikelemente* werden jeweils durch Informationsobjekte repräsentiert und mit den jeweiligen Objekten in der Datenbank verknüpft. Die Informationsobjekte für physische *Fabrikelemente* lassen sich, sofern die *Fabrikelemente* grafisch abgebildet wurden, direkt neben den grafischen Objekten anordnen.

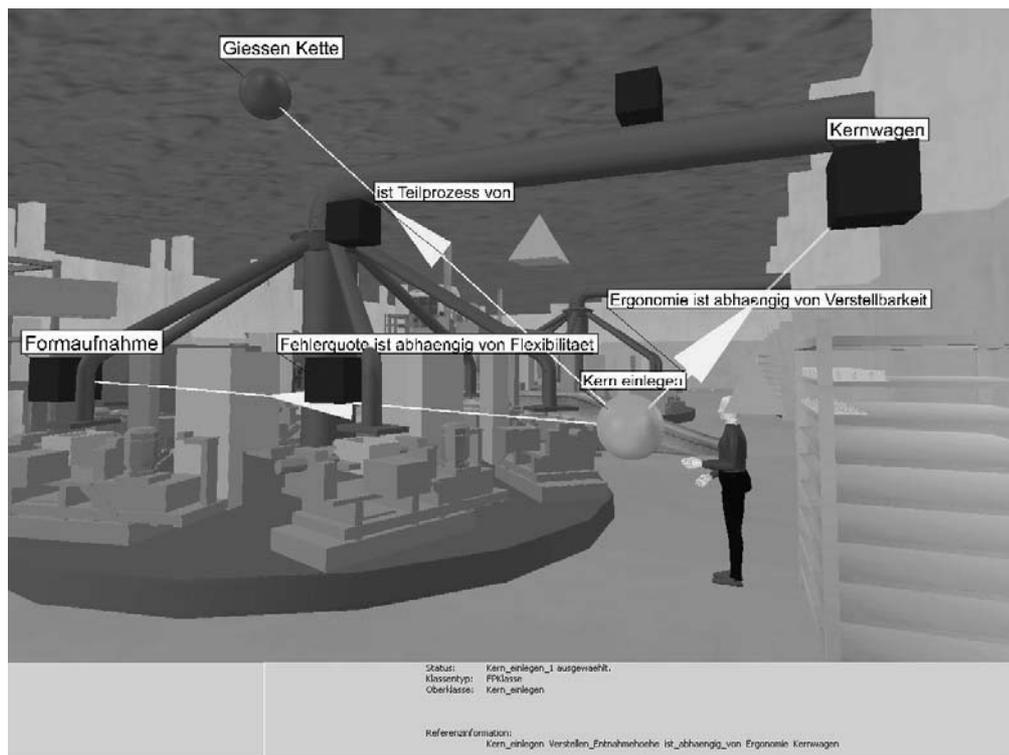


Bild 6-8: Darstellung von Relationen mit der Visualisierungskomponente

Sobald ein Informationsobjekt ausgewählt wird erfolgt die Anzeige der semantischen Relationen dieses Objektes. Bei der Exploration des Modells werden die Informationsobjekte vom Benutzer von Knoten zu Knoten ausgewählt und somit die Zusammenhänge zwischen den Systemelementen abgefragt. Im unteren Teil von Bild 6-8 ist eine Statuszeile dargestellt, die Auskunft über die Klassenzugehörigkeit des Elements und über hinterlegte Referenzinformationen gibt.

6.4 Modellerprobung

Das Instrumentarium zur wissensorientierten Fabrikmodellierung wurde im Rahmen der empirischen Anwendung des im Abschnitt 6.3 vorgestellten Werkzeugs FabrikNet teilweise erprobt. Der Erprobung lag das VR-Modell einer realen Gießerei für Aluminium-Gussteile zugrunde. In diesem grafischen Modell wird der Gießereiprozess von Zylinderköpfen, einschließlich der Kern- und Formherstellung, dem Putzen, der mechanischen Bearbeitung und den Logistikprozessen grafisch abgebildet sowie die Materialflüsse simuliert.

Ein Team von erfahrenen Fabrik- und Fertigungsplanern hat zunächst einen Modellausschnitt ausgewählt, der gemäß den Kriterien aus Abschnitt 6.2.1 ein Nutzenpotenzial für die wissensorientierte Fabrikmodellierung vermuten lässt. Für die Erprobung wurde der Gießprozess, der in einem Fabrikbereich mit zwei Gießrundtischen durchgeführt wird, ausgewählt. In einem zweiten Schritt wurde das Erfahrungswissen der Teammitglieder zu diesem Fabrikbereich getrennt nach den Anwendungsgebieten Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb abgefragt. Die Dokumentation der Informationen erfolgte informal auf Flipcharts. Im Nachgang der Informationsaufnahme wurden die genannten Objekte zunächst systematisch als *Produktelemente*, *Fabrikprozesse* und *Fabrikelemente* interpretiert und aufgelistet. Es erfolgte die Extraktion von Attributen und Operationen aus der Dokumentation sowie ihrer Zuweisung zu den konkreten *Produktelementen*, *Fabrikprozesse* und *Fabrikelemente* aus dem Gießereibereich.

Bei der Erprobung des Modells kam kein Referenzmodell zum Einsatz. Deshalb wurden in einem „bottom-up“-Ansatz zunächst Klassen der Partialmodelle in der Art angelegt, dass sich die Objekte des Szenarios jeweils mindestens einer Klasse zuordnen lassen. Das bedeutet, dass die Klassen jeweils die Attribute und Operationen aufweisen, die auch die Objekte des realen Systems besitzen. Anschließend wurde der Versuch unternommen, die in der Dokumentation beschriebenen Zusammenhänge mit Relationen zwischen den Objekten und den jeweiligen Attributen und Operationen auszudrücken. Die zunächst in der Datenbank des Werkzeugs FabrikNet abgelegten Informationen wurden danach mit der Visualisierungskomponente im VR-Modell dargestellt.

Eine wesentliche Erkenntnis der Modellerprobung war, dass durch das Team vor allem spezifisches Wissen und Erfahrungswissen generiert werden konnte, dass für das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb relevant ist. Dies war daraus ersichtlich, dass in der Dokumentation konkrete Objekte des vorliegenden Fabriksystems erwähnt wurden. Fabrikplanungswissen wurde dagegen abstrahiert und allgemeingültig formuliert, wodurch die These gestärkt wird, dass die Fabrikplanung in erster Linie durch das Referenzmodell unterstützt werden kann. Grundsätzlich ist es gelungen, dass Erfahrungswissen des Teams für die drei Anwendungsgebiete mit dem wissensorientierten Fabrikmodell nachzubilden.

7 Schlussbetrachtung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten gegeben. Im Abschnitt 7.1 erfolgt zunächst die Zusammenfassung der Arbeit, bei der die Erkenntnisse zum Stand der Forschung den Ausgangspunkt bilden. Der Abschnitt 7.2 beinhaltet letztendlich Ausführungen über sich anbietende zukünftige Forschungsarbeiten zum Thema.

7.1 Zusammenfassung

Das Ergebnis der Analyse zum Forschungsstand der wissensorientierten Fabrikmodellierung ist die Erkenntnis, dass im Gegensatz zur Produktentwicklung wenige Vorarbeiten vorhanden sind, bei denen eine interdisziplinäre Betrachtung von Wissensrepräsentation und Fabrikmodellierung vorgenommen wird (vgl. Abschnitt 2.4.1). Grundsätzlich ist es denkbar, die Fabrik als ein zu entwickelndes Produkt zu interpretieren und hieraus über die Produktentwicklung einen Bezug zur Wissensrepräsentation herzustellen. Jedoch genügt dieser Ansatz nicht, um eine praktikable Unterstützung der Anwendungsgebiete Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb zu realisieren.

Im Rahmen der Herleitung für die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit wurde zunächst eine Differenzierung zwischen wissensorientierten und problemorientierten Fabrikmodellen und digitalen Planungswerkzeugen vorgenommen. Unter problemorientiert wird verstanden, dass die Modelle und Werkzeuge für spezifische Tätigkeiten in den Anwendungsgebieten konzipiert wurden und primär eine Dokumentations- und Validierungsfunktion für bereits generierte Problemlösungen übernehmen. Wissensorientierte Modelle und Werkzeuge dienen hingegen primär als Lieferant von Eingangsinformationen für den Denkprozess des Modellnutzers zur Problemlösung bzw. Planung. Das Ziel dieser Arbeit war es, in dieser Hinsicht einen Beitrag zu dem neuartigen Ansatz einer wissensorientierten Fabrikmodellierung und der Erweiterung der Funktionalitäten digitaler Fabrikplanungswerkzeuge bzw. der Digitalen Fabrik (vgl. Abschnitt 1.3) zu leisten.

Als wichtigste Eigenschaft von wissensorientierten Fabrikmodellen wurde die Fähigkeit zur Abbildung von Relationen zwischen Elementen des Fabriksystems identifiziert (vgl. Abschnitt 2.4.1). Deshalb wurde das übergreifende Konstrukt der semantischen Netze als Repräsentationsart ausgewählt. Im Detail erfolgt dessen Abbildung mit der Description Logics, einer Beschreibungssprache, welche die Definition von Rollen zwischen Individuen erlaubt (vgl. Abschnitt 4.1.2). Rollen können als Kanten und Individuen als Knoten eines Semantischen Netzes interpretiert werden. Das Gesamtmodell zur wissensorientierten Fabrikmodellierung setzt sich aus dem *Objektmodell* und dem *Relationenmodell* zusammen (vgl. Abschnitt 2.4.3). Mit dem *Objektmodell* wird sich an bestehende objektorientierte Arbeiten zur Fabrikmodellierung angelehnt. Durch das *Objektmodell*, das aus den drei Partialmodellen *PE-Model*,

FP-Modell und *FE-Modell* besteht, erfolgt die Beschreibung der Systemelemente. Diese können mit den im *Relationenmodell* abgebildeten Relationen in Bezug gesetzt werden. Mit den Partialmodellen lassen sich durch die im Bild 7-1 dargestellten Modellelemente viele für die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und den Fabrikbetrieb relevanten Objekte und Eigenschaften abbilden und klassifizieren.

	Objektmodell (3 Partialmodelle)			Relationenmodell
	PE-Modell	FP-Modell	FE-Modell	
Modellierungsmethoden (verwendet)	Objektorientierte Modellierung (OOM) Unified Modeling Language (UML)			Description Logics (DL)
Adaption an den Modellzweck: wissensorientierte Fabrikmodellierung für die Anwendungsgebiete Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> - Aufnahme von Features in die Produktstruktur - Produktattribute 	<ul style="list-style-type: none"> - Erweiterung des Prozessbegriffs - Prozessketten - Prozessgruppen - Prozesshierarchien - qualitative und quantitative Attribute - Attribut- und Prozessoperationen - Systematik (Ordnungen von Fabrikprozessen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Erweiterung des Ressourcenbegriffs (physische FE, nicht-physische FE) - qualitative und quantitative Attribute - Funktions- und Objektoperationen - Systematik (Ordnungen von Fabrikelementen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Systematik von Relationen zwischen Elementen der Partialmodelle

Bild 7-1: Modellelemente für die wissensorientierte Fabrikmodellierung

Das *Objekt-* und das *Relationenmodell* werden in dem hybriden Gesamtmodell zusammengeführt. Mit diesem Modell erfolgt erstmals die Abbildung eines Fabriksystems mit einer open-world-Semantik. Hierdurch ist bspw. die fabrikspezifische Generierung von Relationen zwischen *Produktelementen*, *Fabrikprozessen* und *Fabrikelementen* möglich. Die Erweiterung des *Relationenmodells* mit Informationen, Formen, Regeln oder komplexen Sätzen der Description Logics weist auf Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Gesamtmodells hin (vgl. Abschnitt 4.3).

Bis hierhin wurde nur das prinzipielle Modellschema für die wissensorientierte Fabrikmodellierung beschrieben. Die Arbeit beinhaltet jedoch auch Ausführungen zu Modellerweiterungen und Anwendungen im Fabriklebenszyklus. Durch die Modellerweiterungen soll insbesondere die Praktikabilität und der Nutzen des Modelleinsatzes erhöht werden. Mit den Wissensdomänen (vgl. Abschnitt 5.1) und dem Referenzmodell (vgl. Abschnitt 5.2) seien zwei entsprechende Konzeptionen genannt. Das wissensorientierte Fabrikmodell lässt sich für die im Abschnitt 5.5 differenzierten Anwendungsarten und Anwendungsgebiete einsetzen. Aus dem Modelleinsatz kann weiterhin ein zusätzliches Nutzenpotenzial durch auf das Modell aufbauende systematische Vorgehensweisen bei der Fabrikplanung und der Änderungsanalyse

(vgl. Abschnitt 5.6) entstehen.

Zu den Ergebnissen dieser Arbeit zählt zudem ein Vorgehensmodell, dass die wirtschaftliche Erstellung fabrikspezifischer wissensorientierter Fabrikmodelle sicherstellen soll (vgl. Abschnitt 6.2.2). Außerdem wurde mit dem Werkzeug FabrikNet die Abbildung des Fabriksystems mit dem *Objekt-* und dem *Relationenmodell* prototypisch umgesetzt. Die erfolgreiche Erprobung der wissensorientierten Fabrikmodellierung erfolgte im Abschnitt 6.4 anhand eines Anwendungsszenarios.

7.2 Ausblick

Die wissensorientierte Fabrikmodellierung ist ein neuer Forschungsansatz, der erstmalig in dieser Arbeit aufgegriffen wurde. Aus diesem Grund gibt es auf diesem Feld weiterhin einen hohen Forschungsbedarf. Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden einen Rahmen für weitere Forschungsarbeiten. Diese können entweder in der generellen Überprüfung und Weiterentwicklung des Ansatzes, als auch in der Detailbetrachtung von Problemstellungen bestehen. In dieser Arbeit wurde vielfach auf mögliche Modellerweiterungen und offene Fragestellungen hingewiesen. An der Schnittstelle zwischen Fabrikmodellierung und Informatik und hier insbesondere bei der Transformation der Modellelemente des *Objektmodells* in die Wissensbasis der Description Logics bieten sich gemeinschaftliche Arbeiten beider Forschungsdisziplinen an. Aus Sicht der Informatik sind die Prüfung der Konsistenz und Zuverlässigkeit der transformierten Wissensbasis sowie die Möglichkeiten der Wissensrepräsentation (i.e.S.) offene Fragestellungen. In diesem Zusammenhang wäre zunächst der Nutzen des Einsatzes von Inferenzprozeduren zu prüfen und das Modell entsprechend konzeptionell fortzuentwickeln. Weiterhin können für die Wissensrepräsentation auch andere Repräsentationsarten, wie z.B. die OWL angewendet und das Modell somit in den Bezug zu den Forschungsarbeiten zum Semantic Web gesetzt werden.⁴⁴⁴

Aus Sicht der Fabrikplanung ist die Nutzung von Formeln und Regeln eine interessante Fragestellung. Insbesondere würde eine automatisierte Beachtung von Formeln und Regeln bei der Modellierung mit einem wissensorientierten Werkzeug typische Planungsfehler vermeiden helfen. In diesem Zusammenhang kann auch die systematische Planungsunterstützung mit Hilfe von Referenzmodellinformationen vorangetrieben werden. Denkbar ist z.B. auch, dass Hersteller physischer *Fabrikelemente* ihre grafischen Modelle mit Objektinformationen und Referenzrelationen anreichern, die direkt in ein wissensorientiertes Fabrikmodell übernommen werden können. Die Erstellung von Referenzmodellen sowie die Beschreibung von Vorgehensweisen zum Aufbau eines konkreten Modells in Abhängigkeit von spezifischen Problemstellungen könnten weitere Schwerpunkte für nachfolgende Arbeiten sein.

⁴⁴⁴ Siehe z.B. den OWL-Editor Protégé unter <http://protege.stanford.edu/overview/protege-owl.html>.

Auf mögliche funktionelle Weiterentwicklungen von Werkzeugen zur wissensorientierten Fabrikmodellierung wurde mit der Integration eines Theorembeweislers oder automatisierten Überprüfungen von Regeln schon hingewiesen. Die Verbesserung der Informationsvisualisierung, z.B. über eine Begrenzung der Informationsvielfalt mit dem Einsatz von Wissensdomänen oder einer intuitiv zu bedienenden Nutzeroberfläche zur Exploration des semantischen Netzes sind weitere Entwicklungsrichtungen.

Vor allem aber ist das Modell in weiteren Praxisprojekten anzuwenden um empirisch belegte Aussagen über die Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit der Modellanwendung treffen zu können. Offene Fragestellungen sind bspw. für welche spezifischen Anwendungsgebiete und Merkmale des Fabriksystems der Modellnutzen am größten ist oder wie hoch sich der Aufwand zur Erhaltung der Modellaktualität gestaltet.

8 Literaturverzeichnis

- Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Liebeck, T. (2006): *Herausforderungen globaler Produktionsnetzwerke: Wie Unternehmen ihr Produktionsnetzwerk optimal aufstellen*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2006, S. 219-225.
- Aggteleky, B. (1987): *Fabrikplanung: Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung: Band 1, Grundlagen-Zielplanung-Vorarbeiten*. Auflage, München u.a. 1987.
- Aggteleky, B. (1990): *Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung, Band 2, Betriebsanalyse und Feasibility-Studie*. 2. Auflage, Hanser Verlag, München, Wien, 1990.
- Aldinger, L.; Kapp, R.; Westkämper, E. (2007): *Echtzeitfähiges Fabrik-Cockpit-System: Implementierung und Sicherung wirtschaftlicher Wandlungsfähigkeit*. In: wt Werkstattstechnik online, 5, 2007, S. 358-362.
- Allweyer, T. (1998). *Modellbasiertes Wissensmanagement*. In: IM Information Management & Consulting, 1, 1998, S. 37-45.
- Amann, W. (1994): *Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen*. Springer, Berlin u.a. 1994.
- Arnold, D. (2003): *Materialfluß in Logistiksystemen*. 3. Auflage, Springer, Berlin u.a. 2003.
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. (2004): *Handbuch Logistik*. 2. Auflage, Springer, Berlin u.a. 2004.
- Artale, A.; Cesarini, F.; Soda, G. (1996): *Describing database objects in a concept language environment*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2, Jg. 8, S. 345-351.
- Aurich, J. C.; Röbbing, M.; Jaime, R. (2004): *Änderungsmanagement in der Produktion - Am Beispiel der Einführung einer Maschinen- und Betriebsdatenerfassung*. in: ZWF, 7-8, Jg. 99, S. 381-384.
- Aurich, J. C.; Röbbing, M.; Zhonglei, G. (2005): *Virtual Reality zur Unterstützung von Änderungen in der Produktion*. In: ZWF, 1-2, 2005, S. 66-70.
- Baader, F.; Horrocks, I.; Sattler, U. (2004): *Description Logics*. In: Staab, S.; Studer, R. (Hrsg.): *Handbook on Ontologies*. Springer, Berlin u.a. 2004, S. 3-28.
- Baader, F.; Nutt, W. (2003): *Basic Description Logics*. In: Bader, F.; Calvanese, D.; McGuinness, D.; Nardi, D.; Patel-Schneider, P. (Hrsg.): *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge u.a. 2003, S. 43-95.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (1994): *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 7. Auflage, Springer, Berlin 1994.
- Balzert, H. (1998): *Lehrbuch der Software-Technik: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung*. Spektrum, Heidelberg u.a. 1998.

- Baumeister, M. (2003): *Fabrikplanung im turbulenten Umfeld: Methodik zur Zielplanung einer Fabrik unter Berücksichtigung eines turbulenten Unternehmensumfeldes und der übergeordneten Unternehmensziele*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Band 115, 2003.
- Bean, C. A.; Green, R.; Myaeng, S. H. (2002): *Types of Relationships*. In: Green, R.; Bean, C. A.; Myaeng, S. H. (Hrsg.): *The Semantics of Relationships: An Interdisciplinary Perspective*. Kluwer, Dordrecht 2002, S. vii-xviii.
- Beierle, Ch.; Kern-Isberner, G. (2006): *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 3. Auflage, Vieweg, Wiesbaden 2006.
- Berger, S.; Mangold, C.; Meyer, S. (2004): *Wissensmanagement für die wandlungsfähige Montage: Wissen als Antwort auf turbulente Zeiten*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2004, S. 80-85.
- Bergholz, A. (2005): *Objektorientierte Fabrikmodellierung*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Aachen 2005.
- Bernemann, S. (2002): *Eignung und Anwendungsmöglichkeiten von Methoden und Werkzeugen*. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Logistikqualität: Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung*. 2. Auflage, Springer, Berlin u.a. 2002.
- Beyer, C. (2002): *Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Produktentwicklung*. Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Band 4, Shaker-Verlag, Aachen 2002.
- Bichlmaier, Ch. (2000): *Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen*. TU München, Produktentwicklung Band 39, Herbert Utz Verlag, München 2000.
- Binner, H. F. (1997): *Integriertes Organisations- und Prozessmanagement*. 1. Auflage, Hanser, München u.a. 1997.
- Bley, H.; Franke, C. (2001): *Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2001, S. 214-220.
- Bley, H.; Fritz, J.; Zenner, C. (2006): *Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik*. In: ZWF, 1-2, 2006, S. 19-23.
- Bracht, U.; Masurat, T. (2003): *Integration von Virtual Reality und Materialflusssimulation zum Digitalen Prozessmuster: Logistische und fertigungstechnische Gedankenspiele für die Digitale Fabrik*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2003, S. 249-253.
- Bracht, U.; Schlange, C.; Eckert, C.; Masurat, T. (2005): *Datenmanagement für die Digitale Fabrik: Forschungsorientierter Modellansatz für ein effektives Datenmanagement im heterogenen Planungsumfeld*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2005, S. 197-204.
- Braun, P. (2001): *Von Ideen zu innovativen Produkten: Objektorientierte Wissensverarbeitung in CATIA V5*. 19th CAD-FEM Users' Meeting, International Congress on FEM Technology, Berlin/Potsdam, 2001.

Brockhaus (2005): *Die Enzyklopädie: in 30 Bänden*. 21. Auflage. F.A. Brockhaus, Leipzig u.a. 2005.

Bundesvereinigung Logistik (2004): *Differentiation for Performance Exzellenz in Logistics*. Deutscher Verkehrs-Verlag. Hamburg 2004.

Burkhardt, R. (1999): *UML – Unified Modeling Language: Objektorientierte Modellierung für die Praxis*. 2. Auflage, Addison-Wesley-Longman, Bonn u.a. 1999.

Calvanese, D.; Lenzerini, M.; Nardi, D. (1998): *Description Logics for conceptual data modeling*. In: Chomicki, J.; Saake, G. (Hrsg.): *Logics for Databases and Information Systems*. Kluwer, Boston 1998.

Calvanese, E.; Lenzerini, M.; Nardi, D. (1999): *Unifying class-based representation formalism*. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11, 1999, 199-240.

Chaffin, R. (1992): *The concept of a semantic Relation*. In: Lehrer, A.; Kittay, E. F. (Hrsg.): *Frames, Fields and contrasts. New essays in semantic and lexical organisation*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale 1992, S. 253-288.

Dandl, J. (1999): *Objektorientierte Prozessmodellierung mit der UML und EPK*. Arbeitspapiere WI, 12, 1999, Universität Mainz 1999.

Dangelmaier, W. (1999): *Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung*. Springer, Berlin/Heidelberg 1999.

Däßler, R. (1999): *Informationsvisualisierung: Stand, Kritik und Perspektiven*. Potsdam: Fachhochschule Potsdam, Fachbereich Archiv/Bibliothek/Dokumentation, Projektgruppe InfoViz. URL: <http://fabdp.fh-potsdam.de/daessler/paper/InfoVis99.pdf>, Stand: 1999, Abrufdatum: 20.03.2007, Datei: InfoViz99.pdf

Debenham, J. (1998): *Knowledge Engineering – Unifying Knowledge Base and Database Design*. Springer, Berlin u.a. 1998.

Deuse, J.; Petzelt, D.; Sackermann, R. (2006): *Modellbildung im Industrial Engineering*. In: *ZWF*, 1-2, 2006, S. 66-69.

DIN 30781 (1989): *Transportkette Teil 1 und 2*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin 1989.

DIN 8580 (2003): *Fertigungsverfahren Begriffe und Einteilung*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin 2003.

DGQ (1989): *Qualitätsprüfung für angelernte Prüfer: Anleitung für die Ausbildung*. DGQ Schrift Nr. 15-41, 1. Auflage, Beuth Verlag, Frankfurt am Main 1989.

Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Palluck, M. (2006): *Fabrikplanung unter den Rahmenbedingungen Ganzheitlicher Produktionssysteme*. In: *wt Werkstattstechnik online*, 4, 2006, S. 156-161.

- Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Palluck, M. (2007): *Die wirtschaftliche Bedeutung der Fabrikplanung am Standort Deutschland*. In: wt Werkstattstechnik online, 1-2, 2007, S. 14-18.
- Dombrowski, U.; Horatzek, S. (2002): *Entwicklung eines Werkzeugs für dezentrales Wissensmanagement*. In: ZWF, 3, 2002, S. 121-125.
- Dombrowski, U.; Tiedemann, H. (2005): *Die richtigen Fabrikplanungswerkzeuge auswählen*. In: it Industrielle Informationstechnik, 3, 2005, S. 136-140.
- Dombrowski, U.; Tiedemann, H. (2004): *Wissensmanagement in der Fabrikplanung: Vom innovativen zum standardisierten Fabrikplanungswissen*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 137-140.
- Dörner, D. (2006): *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. 5. Auflage, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2006.
- Drabow, G.; Woelk, P.-O. (2004): *Wandlungsfähige Fabrik der Zukunft: Modulare Struktur- und Steuerungskonzepte*. In: ZWF, 3, 2004, S. 90-94.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T.: *Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure*. Springer, Berlin u.a. 2005.
- Eversheim, W. (1996a): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management – Betriebshütte*, Teil 1, 7. Auflage, Springer, Berlin u.a. 1996, S. 7.124–7.129.
- Eversheim, W. (1996b): *Konventionelle Methoden und Hilfsmittel der Konstruktion*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management – Betriebshütte*. Teil 1, 7. Auflage, Springer, Berlin u.a. 1996, S. 7-44 – 7-54.
- Eversheim, W. (1996c): *Prozeßplanung*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management – Betriebshütte*, Teil 1, 7. Auflage, Springer, Berlin u.a. 1996, S. 7.74–7.89.
- Felix, Herbert (1998): *Unternehmens- und Fabrikplanung: Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen*. Hanser, München u.a. 1998.
- Fischer, A. R. (1995): *Objektorientierte Modellierung von Prozessketten*. Ifab Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 11, Karlsruhe 1995.
- Fleischer, J.; Aurich, J. C.; Herm, M.; Stepping, A.; Köklü, K. (2004): *Verteilte kooperative Fabrikplanung: Vom 3D-Layout-Planungswerkzeug zum Assistenzsystem*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 107-110.
- Fleischer, J.; Ender, T.; Rühmann, N. (2006): *Wissensmanagement und Simulation steigern die Effizienz im Produktionsanlauf*. In: ZWF, 7-8, 2006, S. 412-415.
- Fleischer, J.; Stepping, A.; Plaggemeier, J. (2005): *Fabrikplanung zur Umsetzung Ganzheitlicher Produktionssysteme im Wertschöpfungsnetz*. In: ZWF, 5, 2005, S. 279-283.

- Förster, T. (1999): *Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsbereichen für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation, O-v-G-Universität, Magdeburg 1999.
- Frese, E.; Theuvsen, L.: *Fertigungsorganisation*. In: Kern, W. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. Auflage, Schaeffer-Poeschel, Stuttgart 1996, S. 461-474.
- Fritz, A. H.; Schultze, G.: *Fertigungstechnik*. 4. Auflage, Springer, Heidelberg 1998.
- Gausemeier, J.; Fink, A. (1999): *Führung im Wandel – Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung*. Hanser, München u.a. 1999.
- Geckler, D.; Rehnelt, C. (2004): *Die „Digitale Fabrik“ als neue Wissensdreh Scheibe zwischen OEM und Zulieferer*. In: *projektManagement aktuell*, 1, 2004, S. 26-30.
- Gershon, N.; Eick, S. G.: *Information Visualisation*. In: *Computer Graphics and Applications*. 7/8, 1997, 29-31.
- Gómez-Pérez, A.; Fernández-López, M., Corcho, O. (2004): *Ontological Engineering: with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web*. Springer, London 2004.
- Grand, B.; Soto, M. (2002): *Visualisation of the Semantic Web: Topic Maps Visualisation*. Proceedings of the Sixth International Conference on Information Visualisation, IEEE, 2002.
- Gröpke, S.; Sallaba, G.; Wahl, M. (2004): *Neue Methoden und Instrumente in der Fabrikplanung*. In: Schenk, M.; Luczak, H.; Schlüter, W. (Hrsg.): *Gestaltung der Fabrikplanung als industrielle Dienstleistung: Methodische, organisatorische, personelle und juristische Aspekte*. IRB Verlag, Stuttgart 2004, S. 117-193.
- Gudehus, T. (2005): *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 3. Auflage, Springer, Berlin u.a. 2005.
- Haag, H. (1999): *Produktdatenaustausch in der TGA: VDI 3805*. In: VDI-Gesellschaft Gebäudeausrüstung (Hrsg.): *Der rechnergestützte Planungsprozess in der TGA*. VDI-Berichte 1477, VDI Verlag, Düsseldorf 1999.
- Haarslev, V.; Möller, R.; Wessel, M. (2001): *The Description Logic $ALCNH_{R+}$ Extended with Concrete Domains*. IJCAR, 18.-23. Juni, Siena, Italien 2001.
- Hahn, O.; Heeren, R.: (2004): *Kompetenzplattform Mechanische Fügetechnik: Gezielte und schnelle Informationsversorgung durch semantische Netze*. Shaker Verlag, Aachen 2004.
- Harms, Thomas (2004): *Agentenbasierte Fabrikstrukturplanung*. Dissertation, Berichte aus dem IFA, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen 2004.
- Hartmann, D. (2000): *Grundlegende Betrachtungen zur Anwendung der Objektorientierung*. In: Hartmann, Dietrich (Hrsg.): *Objektorientierte Modellierung in Planung und Konstruktion*. Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 1-25.

- Heinsohn, J.; Socher-Ambrosius, R. (1999): *Wissensverarbeitung: Eine Einführung*. Spektrum, Heidelberg u.a. 1999.
- Helbig, H. (1996): *Künstliche Intelligenz und automatische Wissensverarbeitung*. 2. Auflage, Verlag Technik, Berlin 1996.
- Helbig, H. (2006): *Knowledge Representation and the Semantics of Natural Language*. Springer, Berlin u.a. 2006.
- Hernández, M. R. (2003): *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 149, VDI Verlag, Düsseldorf 2003.
- Holten, R.; Melchert, F. (2002): *Das Supply Chain Operations Reference (SCOR) Modell*. In: Becker, J.; Knackstedt, R. (Hrsg.): „Wissensmanagement mit Referenzmodellen: Konzepte für die Anwendungssystem- und Organisationsgestaltung. Physica, Heidelberg 2002, S. 207-226.
- Horn, V. (2004): *Vom Reißbrett zu Virtual Reality in Fabrikplanung und -betrieb*. Gastvortragsreihe Fraunhofer IFF, Magdeburg 2004.
- Jeckle, M.; Rupp, C.; Hahn, J.; Zengler, B.; Queins, S. (2004): *UML2: glasklar*. Hanser, München u.a. 2004.
- Jiao, J.; Tseng, M. M.; Ma, Q.; Zou, Y. (2000): *Generic Bill-of-Materials-and-Operations for High-Variety Production Management*. In: Concurrent Engineering, 4, 2000, S. 297-321.
- Kapp, R.; Blond, J.; Westkämper, E. (2005): *Fabrikstruktur und Logistik integriert planen: Erweiterung eines kommerziellen Werkzeugs der Digitalen Fabrik für den Mittelstand*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2005, S. 191-196.
- Keller, S. (2000): *Entwicklung einer Methode zur integrierten Modellierung von Strukturen und Prozessen in Produktionsunternehmen*. VDI Verlag, Düsseldorf 2000.
- Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*. Hanser, München/Wien 1984.
- Khoo, Ch.; Chan, S.; Niu, Y. (2002): *The Many Facets of the Cause-Effect Relation*. In: Green, R.; Bean, C. A.; Myaeng, S. H. (Hrsg.): *The Semantics of Relationships: An Interdisciplinary Perspective*. Kluwer, Dordrecht 2002, S. 51-70.
- Kinkel, D.; Lay, G.; Maloca, S. (2004): *Produktionsverlagerungen ins Ausland und Rückverlagerungen: Ergebnisse aus der Erhebung „Innovationen in der Produktion“ des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung*. Bericht zum Forschungsauftrag Nr. 8/04 an das Bundesministerium für Finanzen, Karlsruhe 2004.
- Kletti, J. (2006): *Mehr Wirtschaftlichkeit mit Manufacturing Execution Systems*. In: ZWF, 1-2, 2006, S. 48-51.
- Klinger, A.; Wenzel, S. (2000): *Referenzmodell – Begriffsbestimmung und Klassifikation*. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. SCS-Europe BVBA, Ghent 2000.

- Klocke, F.; Friedrich, D.; Wegner, H. (2005): *Technologisches Wissensmanagement am Beispiel des spitzenlosen Einstechschleifens*. In: wt Werkstattstechnik online, 6, 2005, S. 465-468.
- Koether, R. (2004): *Taschenbuch der Logistik*. Carl Hanser Verlag, München u.a. 2004.
- Kolakowski, M.; Schady, R.; Sauer, K. (2007): *Grundlagen für die „Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)“: Ganzheitliche Systematik zur Integration qualitativer Kriterien in der Fabrikplanung*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2007, S. 226-231.
- Köster, Th. (2002): *Bausteinbasierte Geschäftsprozessmodellierung*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2002.
- Kraft, B.; Schneider, G. (2005): *Semantic Roomobjects for Conceptual Design Support: A Knowledge-based Approach*. CAAD futures 2005, Wien, 20.6.-22.6.2005.
- Kuhn, A. (1995): *Prozessketten in der Logistik: Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien*. Verlag Praxiswissen, Dortmund 1995.
- Kuhn, A.; Hellingrath, B. (2002): *Supply Chain Management - Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. Springer, Berlin u.a. 2002.
- Kühn, W. (2006): *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Hanser, München u.a. 2006.
- Küpper, H.-U.; Helber, S. (1995): *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*. 2. Auflage, Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1995.
- Lacour, F. (2000): *Neue Methoden beim CAD-Einsatz*. In: CAD-CAM Report, 8, 2000, S. 48-55.
- Landwehr, R. (2007): *Berufsbild Fabrikplaner: Über die Notwendigkeit, ein neues Berufsbild „Fabrikplanungsingenieur“ zu entwickeln*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2007, S. 175-177.
- Leimer, E.-O. (2001): *Ein objektorientiertes und wissensbasiertes System zur sicherheitstechnischen Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3, Nr. 711, VDI Verlag, Düsseldorf 2001.
- Liese, H., Stjepandic, J. (2004): *KBE-Methodik: Wissensbasierte 3D-CAD Modellierung*. In: CAD-CAM Report, 10, 2004, S. 58-61.
- Ludewig, J. (2002): *Modelle im Software Engineering: Eine Einführung und Kritik*. In: Glinz, M.; Müller-Luschnat, G. (Hrsg.): *Modellierung 2002*. Tutzing, 25.-27.3.2002.
- Luger, G. F. (2001): *Künstliche Intelligenz: Strategien zur Lösung komplexer Probleme*. 4. Auflage, Pearson Studium, München 2001.
- Lutz, C. (2003): *Description Logic with Concrete Domains – A Survey*. In: *Advanced in Modal Logic*, 4, 2003, S. 265-296.

Martin, J.; Odell, J. J. (1999): *Objektorientierte Modellierung mit UML: das Fundament*. Prentice Hall, München u.a. 1999.

May, W. (2006): *Reasoning im und für das Semantic Web*. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): *Semantic Web: Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft*. Springer, Berlin u.a. 2006, S. 485-503.

Mehnert, J. (2004): *Gestaltung und Integration von Arbeitsplanungskompetenzen für hierarchielose Produktionsnetze*. Dissertation, Universität Chemnitz, 2004.

Meier, H.; Hanenkamp, N. (2003a): *Monitoringsysteme zur adaptiven Fabrikplanung: Entwurf integrierter Regelkreise zur Optimierung der Produktionsleistung*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2003, S. 271-274.

Meier, H.; Hanenkamp, N. (2003b): *Modellierung und Planung komplexer Produktionssysteme*. In: *Industrie Management*, 5, 2003, S. 5-53.

Meier, H.; Hanenkamp, N.; Sackermann, R. (2004): *Standardisierte Entscheidungsprozesse in der Produktion: Mit einem modellbasierten Ansatz Materialbereitstellungs- und Produktionssteuerungsstrategien auswählen*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 146-149.

Meier, H.; Homuth, M. (2005): *Erschließung der Potenziale der Digitalen Fabrik in heterogenen Systemlandschaften*. In: *ZWF*, 1-2, 2005, S. 20-24.

Meierlohr, Ch. (2003): *Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung*. Forschungsberichte iwv, Band 182, Herbert Utz Verlag, München 2003.

Mendgen, R. (1999): *Methodische Vorgehensweise zur Modellierung in parametrischen und featurebasierten 3D-CAD-Systemen*. Shaker, Aachen 1999.

Menges, R.: *Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung: Die Digitale Fabrik ist der Schlüssel zum Erfolg*. In: *ZWF*, 1-2, 2005, S. 25-29.

Milberg, J.; Amann, W.; Zetlmayer, H. (1991): *Wissensbasierte Simulation und Regelung von Produktionssystemen*. In: *CIM Management*, 6, 1991, S. 4-9.

Mittelhuber, B.; Kallmeyer, O. (2002): *Wertstromdesign: Ein Werkzeug des Toyota-Production-Systems*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2002, S. 79-81.

Möller, R.; Haarslev, V. (2004): *Description Logic Systems*. In: Bader, F.; Calvanese, D.; McGuinness, D.; Nardi, D.; Patel-Schneider, P. (Hrsg.): *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge u.a. 2004, S. 282-305.

Mönch, G.; Podewils, M. v.; Schmalfuß, V. (1999): *Objektorientierte Modellierung des Materialflusses für eine flexible Produktion*. In: *Logistik im Unternehmen*, 10, 1999, S. 44-47.

Müssig, B. (2005): *Wandlung bewertbar machen – Fabrikplanung bei der Siemens AG*. 6. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Ludwigsburg, 8.-9. November 2005.

- Nardi, D.; Brachman, R. J. (2003): *An Introduction to Description Logics*. In: Bader, F.; Calvanese, D.; McGuinness, D.; Nardi, D.; Patel-Schneider, P. (Hrsg.): *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge u.a. 2003, S. 1-40.
- Näser, P.; Ackermann, J. (2003): *Systematische Gestaltung kompetenzzellenbasierter Produktionsstätten: Typisierung mittels „Morphologischer Gestaltungssystematik“*. In: *wt Werkstattstechnik online*, 5, 2003, S. 434-438.
- Nävy, J. (2000): *Facility Management: Grundlagen, Computerunterstützung, Einführungsstrategie, Praxisbeispiele*. 2. Auflage, Springer, Berlin u.a. 2000.
- Neuhausen, J. (2001): *Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion*. Dissertation, Aachen 2001.
- Niemeier, F.; Redeker, G. (1998): *Objektorientiertes Informationsmodell zur Verfügbarkeits-sicherung: Integrierte Betrachtung der Sicherung von Verfügbarkeit und Qualität*. ZWF, 1-2, 1998, S. 39-42.
- Nofen, K.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F. (2005): *Komponenten und Aufbau einer wandlungsfähigen modularen Fabrik*. In: Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. Carl Hanser Verlag, München/Wien 2005, S. 17-30.
- Nofen, K.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F.; Wiendahl, H.-P. (2003): *Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse: Wandlungsfähigkeit auf Basis modularer Fabrikstrukturen*. In: *wt Werkstattstechnik online*, 4, 2003, S. 238-243.
- Nonaka, I.; Takeuchi, H. (1997): *Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. Campus, Frankfurt/Main 1997.
- North, Klaus (1998): *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. Gabler, Wiesbaden 1998.
- Nyhuis, P.; Elscher, A.; Kolakowski, M. (2004): *Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung: Ganzheitliche Integration von Prozess- und Raumsicht*. In: *wt Werkstattstechnik online*, 4, 2004, S. 95-99.
- Ostermann, A. D. (2001): *Neue Ansätze zur gesamtheitlichen Fabriksimulation: Modellkonzept und wissensbasierte Abstraktion*. Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, Band 5, IMAB TU Clausthal, Shaker, Aachen 2001.
- Parsia, B.; Sirin, E. (2004): *Pellet: An OWL DL Reasoner*. In: *Proceedings of the 3rd International Semantic Web Conference, Japan, Hiroshima 2004*.
- Picot, A.; Rohrbach, P. (1995): *Organisatorische Aspekte von Workflow-Management-Systemen*. In: *IM Information Management & Consulting*, 1, 1995, S. 28-35.

- Pielok, T.: *Prozesskettenmodulation: Management von Prozessketten mittels Logistic Function Deployment*. 1. Auflage, Verlag Praxiswissen, Dortmund 1995.
- Polanyi, M. (1985): *Implizites Wissen*. Suhrkamp, Frankfurt/Main 1985.
- REFA (1991): *REFA-Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung*. Teil 1, Hanser, München 1991.
- REFA (1994): *Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums*. 2. Auflage, Hanser, München 1994.
- Reimer, U. (1991): *Einführung in die Wissensrepräsentation: netzartige und schema-basierte Repräsentationsformate*. Teubner, Stuttgart 1991.
- Reinhart, G. (2000): *Simulation: Ein Experiment am digitalen Modell*. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion: Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele*. Springer, Berlin u.a. 2000.
- Reinhart, G.; Patron, C. (2002): *Nutzenorientierte Integration von Virtual und Augmented Reality*. In: ZWF, 4, 2002, S. 205-208.
- Reinmann-Rothmeier, G.; Mandl, H.; Erlach, Ch.; Neubauer, A. (2001): *Wissensmanagement lernen: Ein Leitfaden zur Gestaltung von Workshops und zum Selbstlernen*. Beltz Verlag, Weinheim u.a. 2001.
- Ropohl, G. (1999): *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 2. Auflage, Hanser, München/Wien 1999.
- Rosemann, M. (1998): *Die Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung – Intension, Entwicklung, Architektur und Multiplexität*. In: Maicher, M.; Scheruhn, H.-J. (Hrsg.): *Informationsmodellierung: Referenzmodelle und Werkzeuge*. DUV-Verlag, Wiesbaden 1998.
- Russel, S.; Norvig, P. (2004): *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. 2. Auflage, Pearson Studium, München u.a. 2004.
- Sallaba, G.; Gröpke, S. (2000): *Fabrikplanung - eine permanente Managementfunktion*. In: ZWF, 7-8, 2000, S. 358-360.
- Sattler, U.; Calvanese, D.; Molitor, R. (2003): *Relationships with other Formalism*. In: Bader, F.; Calvanese, D.; McGuinness, D.; Nardi, D.; Patel-Schneider, P. (Hrsg.): *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge u.a. 2003, S. 137-177.
- Sauer, O. (2004): *Einfluss der Digitalen Fabrik auf die Fabrikplanung*. In: wt Werkstattstechnik online, 1-2, 2004, S. 31-34.
- Sauthoff, H.-J.; Schulte, H. (2007): *Von der Standortsuche bis zum Produktionsanlauf: Ein Prozess mit vielen Stolpersteinen*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2007, S. 200-204.

- Schaal, S. (1992): *Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD am Beispiel konstruktionsbegleitender Kalkulation*. Konstruktionstechnik München, Band 8, Hanser, München u.a. 1992.
- Scheer, A.-W. (1996): *Informationsmanagement im Betrieb*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management – Betriebshütte*. Teil 2, 7. Auflage, Springer, Berlin u.a. 1996.
- Schenk, M.; Schulte, H. (2003): *Typologisierung von Fabriken: Ein Element der strategischen Zielplanung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2003.
- Schenk, M.; Tolujew, J.; Barfus, K.; Reggelin, T. (2007): *Grundkonzepte zu logistischen Echtzeitsystemen: Monitoring, Event Management und Frühwarnung*. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): *Jahrbuch der Logistik 2007, free beratung, Korschenbroich 2007*, S. 222-226.
- Schenk, M.; Wirth, S. (2004): *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Springer, Berlin u.a. 2004.
- Schmelzer, H. J.; Sesselmann, W. (2004): *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis - Produktivität steigern, Wert erhöhen, Kunden zufrieden stellen*. 4. Auflage, Hanser, München u.a. 2004.
- Schmidt, K. (2002): *Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen*. Dissertation, RWTH, Aachen 2002.
- Schmidt-Schauß, M.; Smolka, G. (1991): *Attributive concept descriptions with complements*. *Artificial Intelligence*, 1, 1991, S. 1-26.
- Schmigalla, H. (1995): *Fabrikplanung: Begriff und Zusammenhänge*. Hanser, München u.a. 1995.
- Schneider, F. J. (2004): *VR-Einsatz in der Fabrikplanung*. *CAD-CAM Report*, 10, 2004, S. 44-48.
- Schomburg, E. (1980): *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und steuerungssysteme im Maschinenbau*. Dissertation, RWTH, Aachen 1980.
- Schöning, U. (2000): *Logik für Informatiker*. 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg u.a. 2000.
- Schraft, R.-D.; Bierschenk, S. (2005): *Digitale Fabrik und ihre Vernetzung mit der realen Fabrik*. *ZWF* 1-2, 2005, S. 14-18.
- Schreiber, W. (2005): *Augmented Reality als Werkzeug in der Fabrikplanung*. IfU-Festkolloquium „Produktionstechnik im Wandel“, TU Braunschweig, 27./28.10.2005.
- Schreiber, W. (2004): *Strategien zum Einsatz Virtueller Techniken*. In: *Virtual Reality: Mensch und Maschine im interaktiven Dialog*, Gastvortragsreihe Fraunhofer IFF, Magdeburg 2004.

- Schröer, K.; Müller-Rogait, J. (2002): *Objektorientierte Fertigungstechnik, differenzierte Automatisierung und virtuelle Fabrik: Ein Beitrag zur Kursbestimmung*. In: ZWF, 4, 2002, S. 187-194.
- Schuh, G.; Gulden, A.; Gottschalk, S.; Kampker, A. (2006): *Komplexitätswissenschaft in der Fabrikplanung*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2006, S. 167-170.
- Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A. (2004a): *Design for Changeability (DFC) - Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 100-106.
- Schuh, G.; Kampker, A.; König, R. (2004b): *Strukturcontrolling von Produktionssystemen: Kontinuierliche Überwachung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 122-127.
- Schuh, G.; Wemhöner, N.; Kampker, A. (2004c): *Lebenszyklusbewertung flexibler Produktionssysteme: Kennzahlen und Verfahren für langfristig optimale Entscheidungen in einer dynamischen Umwelt*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2004, S. 116-121.
- Schuh, G.; Wesch, C.; Gulden, A.; Gottschalk, S. (2007b): *Objektorientierte Fabrikplanung: Teil 2 - Architekturen und Vorgehensweise*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2007, S. 166-174.
- Schuh, G.; Wesch, C.; Koch, S.; Gulden, A.; Gottschalk, S. (2007a): *Objektorientierte Fabrikplanung: Teil 1 - Modellierung modularer Produktionsstrukturen*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2007, S. 166-174.
- Schwab, J. (2005): *Integration von Virtual Reality in vernetzten Engineering Prozessen*. In: Gastvortragsreihe Virtual Reality 2005, Fraunhofer IFF, Magdeburg 2005.
- Schwarz, S.; Abecker, A.; Maus, H.; Sintek, M. (2001): *Anforderungen an die Workflow-Unterstützung für wissensintensive Geschäftsprozesse*. In: Proceedings des Workshops anlässlich der WM'2001, Baden Baden, 14.-16. März 2001, S. 1.-20.
- Shadbolt, N.; Hall, W.; Berners-Lee, T. (2006): *The Semantic Web Revisited*. In: IEEE Intelligent Systems, 5-6, 2006, S. 96-101.
- Sihn, W.; März, L.; Richter, H. (2000): *Wandlungsfähigkeit planen durch objektorientierte Modellierung*. In: Industrie Management, 3, 2000, S. 42-46.
- Spath, D.; Baumeister, M.; Rasch, D. (2002): *Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken: Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden Strukturbaukasten*. ZWF, 1-2, 2002, S. 28-32.
- Spieker, C.: *Arbeitswissenschaft in der Fabrikplanung: Einige Anmerkungen zum „Standardisierten Ansatz der Erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)“*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2006, S. 171-177.
- Sporer, N. (2006): *Mittelständler erfolgreich am Produktionsstandort Deutschland*. In: Gastvortragsreihe Logistik, Fraunhofer IFF, Magdeburg 2006, S. 150-172.

- Spur, G. (1994): *Fabrikbetrieb*. Hanser, München/Wien 1994.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien/New York 1973.
- Steyer, R.; Eid, M. (1993): *Messen und Testen*. Springer, Berlin u.a. 1993.
- Stjepandic, J., Thel, M. (2003): *Probleme und Lösungen bei der Übertragung von Form Features und Parametrik zwischen den CAD-Systemen*. CAD-CAM Report, 2, 2003, S. 52-55.
- Straßburger, S.; Seidel, H.; Schady, R.; Masik, S. (2006): *Werkzeuge und Trends der digitalen Fabrikplanung: Analyse der Ergebnisse einer Onlinebefragung*. 12. ASIM Fachtagung, Simulation in Produktion und Logistik, 26.-27. September 2006, Universität Kassel.
- Strube, G.; Habel, Ch.; Hemforth, B.; Kniecny, L.; Becker, B. (1995): *Kognition*. In: Görz, G. (Hrsg.): *Einführung in die künstliche Intelligenz*. 2. Auflage, Addison-Wesley, Bonn u.a. 1995, S. 299-359.
- Sudhoff, W.; Rimpau, C.; Berlak, J.; Müssig, B.; Redelstab, P. (2006): *Strukturadaptive und mobile Fabrikkonzepte: Gesteigerte Effizienz durch die Nutzung moderner Planungsmethoden und -werkzeuge*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2006, S. 162-166.
- Tiedemann, H. (2005): *Wissensmanagement in der Fabrikplanung*. Shaker Verlag, Aachen 2005.
- Trunk, D. (2005): *Semantische Netze in Informationssystemen: Verbesserung der Suche durch Interaktion und Visualisierung*. Kölner Arbeitspapiere zur Bibliotheks- und Informationswissenschaft, Nr. 51, Fachhochschule Köln 2005.
- Tsarkov, D.; Horrocks, I. (2003): *DL Reasoner vs. First-Order Prover*. In Proceedings of the 2003 Description Logic Workshop, CEUR Workshop Proceedings, Volume 81, S. 152-159.
- Ulrich, F.; Laak, B. L. (2003): *Anforderungen an Sprachen zur Modellierung von Geschäftsprozessen*. Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Nr. 34, Universität Koblenz-Landau 2003.
- Ulrich, H. (1984): *Management*. Dyllick, T.; Probst, G. J. B. (Hrsg.), Verlag Paul Haupt, Bern 1984.
- Ulrich, H. (1995): *Von der Betriebswirtschaftslehre zur systemorientierten Managementlehre*. In: Wunderer, R. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre*. 3. Auflage, Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1995, S. 161-178.
- Uschold, M.; Jasper, R. (1999): *A Framework for Understanding and Classifying Ontology Applications*. In: Proceedings of the IJCAI-99 workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods, Sweden, Stockholm 2.8.1999.
- VDI 3633 (1993): *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Grundlagen*. Blatt 1, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.), Düsseldorf 1993.

- VDI 3633 (2003): *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Simulation und Visualisierung*. Blatt 11 Entwurf, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.), Düsseldorf 2003.
- VDI 3637 (1996): *Datenermittlung für langfristige Fabrikplanungen*. Beuth Verlag, Berlin 1996.
- VDI 4499 (2006): *Digitale Fabrik: Grundlagen*. Blatt 1 Entwurf, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.), Düsseldorf 2006.
- VDI-EKV (1992): *Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung*. VDI Verlag, Düsseldorf 1992.
- Vester, F. (2000): *Die Kunst vernetzt zu denken – Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität*. 3. Auflage, DTV, München 2000.
- Vollmer, L.; Schlörke, S. (2005): *Zielgerichtete Umsetzung von Variantenwertströmen: Kaizen und Lean-Methoden auf System- und Prozessebene*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2005, S. 222-226.
- Weber, Ch.; Pohl, M.; Steinbach, M. (2004): *New Ideas for Knowledge Management in Product Development Projects*. International Design Conference – Design 2004, Dubrovnik 18.-21.5.2004.
- Wehner, P. (2003): *Ein Ansatz zur feature- und produktmodellbasierten Integration von CAD und FEA*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 362, VDI Verlag, Düsseldorf 2003.
- Wendenburg, M. (2004): *Geballtes Wissen für die Produktentwicklung*. In: Digital Engineering, URL: <http://www.digital-engineering-magazin.de/index.php3?page=02-04/fokus.html>, Aufruf 5.9.2007.
- Wenzel, S. (2004): *Die Digitale Fabrik – Ein Konzept für die interoperable Modellnutzung*. In: Industrie Management. 3, 2004, S. 54-58.
- Werner, H.; Weber, Ch.; Pohl, M.; Steinbach, M. (2005): *Innovatives Wissensmanagement auf Basis semantischer Netze*. In: ZWF, 4, 2005, S. 212-218.
- Werner, S. (2006): *Ontologie-basiertes Agentenmatching*. TZI-Bericht Nr. 38, Technologie-Zentrum Informatik, Universität Bremen 2006.
- Westkämper, E. (2005): *Von der „Realen Fabrik“ zur „Intelligenten Fabrik“*. Tagungsband 6. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Ludwigsburg 8.-9.11.2005.
- Westkämper, E.; Runde, C. (2006): *Anwendungen von Virtual Reality in der Digitalen Fabrik: eine Übersicht*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2006, S. 99-103.
- Westkämper, E.; Winkler, R. (2002): *Praxisbeispiel und Nutzen der objektorientierten Konzeption für die Fabriksimulation: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit als Anforderungen an Fabrikstrukturen und Produktionssysteme*. In: wt Werkstattstechnik online, 3, 2002, S. 52-56.

- Wiendahl, H.-P. (2000): *Partizipative Fabrikplanung: Methoden zur erfolgreichen Mitarbeiterbeteiligung*. TCW-report Nr. 23, TCW Transfer-Centrum, München 2000.
- Wiendahl, H.-P. (1997): *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 4. Auflage, Hanser, München/Wien 1997.
- Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Hernández, R. (2001): *Kooperative Fabrikplanung – Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2001, S. 186-191.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002): *Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2002, S. 122-127.
- Wildemann, H. (2005): *Unternehmensstandort Deutschland: Wege zu einer wettbewerbsfähigen Wertschöpfungsgestaltung*. TCW Transfer-Centrum-Verlag. München 2005.
- Willke, H. (1991): *Systemtheorie*. 3. Auflage, Fischer, Stuttgart u.a. 1991.
- Winston, P.H. (1993): *Artificial intelligence*. 3. Auflage, Addison-Wesley, New York 1993.
- Wirth, S. (1989): *Flexible Fertigungssysteme: Gestaltung und Anwendung in der Teilefertigung*. 1. Auflage, Verlag Technik, Berlin 1989.
- Wirth, S.; Erfurth, R.; Olschewski, T. (2003): *Mobilitätsstufenabhängige Fabrikplattformen: Flexibilisierung bestehender Fabrikstrukturen*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2003, S. 287-294.
- Witte, K.-W.; Vielhaber, W.; Ammon, C.: *Planung und Gestaltung wandlungsfähiger und wirtschaftlicher Fabriken*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2005, S. 227-231.
- Zäh, M. F.; Cisek, R.; Rimpau, C. (2005a): *Planung kontinuierlicher Strukturadaptation: Nutzung innerbetrieblicher Mobilitätspotenziale*. In: wt Werkstattstechnik online, 5, 2005, S. 383-387.
- Zäh, M. F.; Cisek, R.; Sudhoff, W.; Redelstab, P. (2003a): *Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2003, S. 327-331.
- Zäh, M. F.; Müller, N.; Aull, F.; Sudhoff, W. (2005b): *Digitale Planungswerkzeuge: Methodik zur Bewertung von Potentialen und Risiken*. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2005, S. 175-180.
- Zäh, M. F.; Müller, N.; Prasch, M.; Sudhoff, W. (2004): *Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen*. In: ZWF, 4, 2004, S. 173-177.
- Zäh, M. F.; Schack, R.; Carnevale, M.; Müller, S. (2005c): *Ansatz zur Projektierung der Digitalen Fabrik*. In: ZWF, 5, 2005, S. 286-290.
- Zäh, M. F.; Sudhoff, W.; Rosenberger, H. (2003b): *Wandlungsfähige Produktionsstrukturen und Logistiksysteme*. In: ZWF, 12, 2003, S. 646-651.

- Zahn, G. (1999): *Wissensbasiertes Datenmodell zur Integration von Konstruktion, Arbeitsplanerstellung und Spannplanung*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 294, VDI Verlag, Düsseldorf 1999.
- Zangemeister, C. (2000): *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA): Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein „3-Stufen-Verfahren“ zur Arbeitssystembewertung*. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2000.
- Zelewski, S. (1999): *Grundlagen*. In: Corsten, H.; Reiß, M. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftslehre*. 3. Auflage, Oldenbourg, München u.a. 1999, S. 1-125.
- Ziegler, J.; Kunz, Ch.; Botsch, V. (2002): *Matrix Browser – Visualisierung und Exploration vernetzter Informationsräume*. In: Herczeg, M.; Prinz, W.; Oberquelle, H. (Hrsg.): *Mensch & Computer 2002: Vom interaktiven Werkzeug zu kooperativen Arbeits- und Lernwelten*. B.G. Teubner, Stuttgart 2002, S. 373-382.
- Zuber, K.; Kress, M.; Wagner W. (2001): *Virtuelle Produktion – Partner der digitalen Produktentwicklung: Integration von Planungssystemen für einen durchgehenden Datenaustausch bei der Entwicklung von Produkt- und Produktionsprozess*. In: *wt Werkstattstechnik*, 6, 2001, S. 308-314.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Rico Schady
Geburtsdatum/-ort	4. Juli 1977 in Königs Wusterhausen
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schulbildung

1984 – 1994	Grund- und Gesamtschule Halbe
1994 – 1997	Friedrich-Wilhelm-Gymnasium in Königs Wusterhausen

Studium

Sep. 1997 – Sep. 1998	Technische Fachhochschule Wildau, Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen
Okt. 1998 – Aug. 2003	Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen
technische Vertiefung:	Fabrikbetrieb
wirtschaftliche Vertiefungen:	Investition & Finanzierung Marketing & Technologie- und Innovationsmanagement
Sep. 2001 – Jan. 2002	Studium an der University of Sunderland (England)

Berufserfahrung

Aug. 2002 – Dez. 2002	DaimlerChrysler AG, Werkslogistik Untertürkheim (Praktikum)
Dez. 2003 – Jan. 2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung (IFF) in Magdeburg
Jan. 2007 – Okt. 2007	Doktorand am Fraunhofer IFF in Magdeburg
seit Jan. 2008	Consultant bei der Siemens AG in München, Bereich Corporate Technology

