

Frank Bauer

***Planungswerkzeug zur
wissensbasierten Produktions-
systemkonzipierung***

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2015

ISSN 2195-5239

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Frank Bauer

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Druck · Buch · Verlag
Münster

Printed in Germany

Geleitwort

Unternehmen sind heute mehr denn je dazu gezwungen, innovative und qualitativ hochwertige Produkte in kürzester Zeit zu attraktiven Preisen auf den Markt zu bringen. Damit einhergehend müssen in immer kürzeren Zyklen die notwendigen Produktionssysteme geplant oder bestehende Produktionsanlagen angepasst werden. Mit der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem wird dieser Herausforderung begegnet. So ist bereits während der Produktkonzipierung die Produktionssystemkonzipierung voranzutreiben. Durch eine gezielte Wiederverwendung bewährter Lösungen lässt sich der Aufwand für die Planer reduzieren. Weiterhin werden unnötige Neuentwicklungen von Betriebsmitteln vermieden. Dies erfordert eine geeignete Repräsentation von Fach- und Lösungswissen sowie einen einfachen Zugriff auf relevantes Wissen während der verschiedenen Planungsschritte.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Planungswerkzeug adressiert die aufgezeigten Handlungsfelder. Es unterstützt die Planer bei der Produktionssystemkonzipierung durch den kontinuierlichen Zugriff auf vorhandenes Wissen. Kernelemente des Planungswerkzeugs sind Modellierungsregeln zur Spezifikation von Anforderungen, Prozessen und Ressourcen sowie eine Ontologie, welche die grundlegenden Klassen und Beziehungen zur Repräsentation von Wissen bereitstellt. Die durchzuführenden Planungsschritte werden in einem Vorgehensmodell beschrieben und am Beispiel der Konzipierung einer Knetstraße erläutert.

Das von Herrn Bauer entwickelte Planungswerkzeug stellt einen pragmatischen Ansatz bereit, mit dem sich die zukünftige Wissensarbeit in produzierenden Unternehmen verbessern lässt. Weiterhin ordnet sich seine Arbeit in die bestehende Systematik zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ein und liefert somit Bausteine für eine neue Schule der Produktentstehung.

Paderborn, im Juni 2015

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

***Planungswerkzeug zur wissensbasierten
Produktionssystemkonzipierung***

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Frank Bauer
aus *Olsberg*

Tag des Kolloquiums: 18. Dezember 2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis meiner erfolgreichen Zeit am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts. Der Grundstein dieser Arbeit wurde durch meine Forschungstätigkeit im Projekt ENTIME - "Entwurfstechnik Intelligente Mechanik" gelegt. In Verbindung mit dem Interesse für die Produktionssystementwicklung ist daraus das Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung entstanden.

Mein erster Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die Möglichkeit an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und für die wissenschaftliche Betreuung in den vergangenen Jahren. Es war eine prägende und sehr lehrreiche Zeit. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis vom Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover danke ich für die Übernahme des Korreferates meiner Dissertation.

Ein ganz großer Dank gilt all meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen. Die gute Zusammenarbeit und die tollen Erlebnisse werden mir immer in Erinnerung bleiben. Besonders hervorheben möchte ich die Mitglieder des Teams Integrative Produktionssystemplanung: Rinje Brandis, Jan Brökelmann, Dominic Dettmer, Daniel Nordsiek, Mariana Reyes Krupp, Johannes Kolsch, Daniel Köchling, Marcus Petersen, Vinzent Rutsch, Gerald Rehage, Marcel Schneider, Tobias Mittag und Jörg "Yogi" Schaffrath. Rinje, Jan und Yogi danke ich zudem für die bereichernden Diskussionen im Büro, im Labor und an der Kletterwand. Weiterhin danke ich meinen studentischen Hilfskräften Sascha Sander, Marcel Wellpott und Marcel Otto für ihren Beitrag bei der Umsetzung meines Planungswerkzeugs.

Ich danke meinen Eltern und meiner Schwester für ihre fortlaufende Unterstützung entlang meines Wegs zur Promotion. Mein größter Dank geht an meine Frau Silke. Ohne sie wäre der erfolgreiche Abschluss nicht möglich gewesen. Sie hat mich 2007 bestärkt das Projekt "Dr.-Ing." zu starten, sie hat mich motiviert und sie hat mir in den vergangenen Jahren immer wieder den notwendigen Freiraum verschafft. Danke!

Abschließend danke ich meinen beiden Kindern, die mir immer wieder gezeigt haben, dass es noch wichtigere Dinge als eine Doktorarbeit gibt.

Scharfenberg, im Juni 2015

Frank Bauer

Zusammenfassung

Kürzere Produktlebenszyklen zwingen Unternehmen dazu notwendige Produktionssysteme in immer kürzeren Abständen neu zu planen oder anzupassen. Grundlegende Entscheidungen über den Aufbau des Produktionssystems werden bereits in der Konzipierungsphase festgelegt. Anhand des vorliegenden Produktkonzepts sind Produktionsprozesse zu spezifizieren und umsetzende Betriebsmittel auszuwählen. Zur Reduzierung der Planungsaufwände und zur Wiederverwendung bewährter Lösungen ist eine gezielte Bereitstellung von Fach- und Lösungswissen erforderlich.

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Planungswerkzeug, welches die Planer während der Produktionssystemkonzipierung durch den kontinuierlichen Zugriff auf verfügbares Wissen unterstützt. Mittels semantischer Technologien wird das Wissen repräsentiert und in einer Wissensbasis bereitgestellt. Benötigte Abfragen werden automatisch erzeugt und das Wissen direkt für die graphische Spezifikation des Produktionssystemkonzepts verwendet. Eine einheitliche Spezifikation wird über Modellierungsregeln sichergestellt. Ein Vorgehensmodell beschreibt die einzelnen Planungsschritte, die exemplarisch am Praxisbeispiel einer Knetstraße erläutert werden.

Summary

Shorter product life cycles force companies to develop or adapt production systems in shorter intervals. Important decisions about the structure of the production system are already defined in the early design phase. Based on the principal solution of the product the necessary production processes have to be specified and appropriate production resources have to be selected. To reduce the planning effort and to support the reuse of proven solutions, knowledge available in the company has to be used in an efficient manner.

The present work describes a planning tool that supports the planners during the conceptual design of a new production system. This is achieved by continuous access to available knowledge about known processes and resources. Using semantic technologies the knowledge is represented and provided in a knowledge base. Required queries are generated automatically and the knowledge is directly used for the graphical specification of the production system concept. Modeling rules ensure a uniform specification and a procedure model describes the necessary activities. The use of the planning tool is illustrated and explained by means of an application example.

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [ABG+14] ANACKER, H.; BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.; SCHIERBAUM, T.: Systementwurf mit Hilfe von Lösungsmustern aus dem Semantic Web. In: Gausemeier, J.; Trächtler, A.; Schäfer, W. (HRSG.). Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme, Hanser, München, 2014
- [BDG+14] BAUER, F.; DZIWOK, S.; GAUSEMEIER, J.; JUST, V.; OESTERSÖTEBIER, F.; POHLMANN, U.; SCHÄFER, W.; SCHIERBAUM, T.; TRÄCHTLER, A.: Frühzeitige integrierte Analyse des Systemverhaltens. In: Gausemeier, J.; Trächtler, A.; Schäfer, W. (HRSG.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme, Hanser, München, 2014
- [RBG13a] BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.; REHAGE, G.: Arbeitsvorbereitung 4.0 - Cloud-basierte Nutzung virtueller Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online 2-2013, Sonderheft Industrie 4.0, 2013
- [RBG13b] REHAGE, G.; BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.: Specification Technique for the Consistent Description of Manufacturing Operations and Resources. In: 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2013), 7. - 9. Okt. 2013 (CIRP) Center for international research in production, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [RBG13c] REHAGE, G.; BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.: Intelligent Manufacturing Operations Planning, Scheduling and Dispatching on the Basis of Virtual Machine Tools. In: New Prolamat 2013, 10. - 11. Okt. 2013, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013
- [BGK+13] BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.; KÖCHLING, D.; OESTERSÖTEBIER, F.: Approach for an Early Validation of Mechatronic Systems using Idealized Simulation Models within the Conceptual Design. In: Smart Product Engineering - Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Mrz. 2013, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013
- [BGR13] BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.; RUDTSCH, V.: Automatisierte Generierung von Materialflusssimulationsmodellen zur frühzeitigen Absicherung von Produktionssystemen. In: 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Heinz Nixdorf Institut, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 311, Paderborn, 2013
- [OSB+12] OESTERSÖTEBIER, F.; DZIWOK, S.; BAUER, F.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.; GAUSEMEIER, J.: Unterstützung des mechatronischen Entwurfs durch die effektive Suche nach Lösungselementen mithilfe von semantischen Technologien. In: Tag des Systems Engineerings 2012, Gesellschaft für Systems Engineering e.V. (GfSE), Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [OJT+12] OESTERSÖTEBIER, F.; JUST, V.; TRÄCHTLER, A.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Model-Based Design of Mechatronic Systems by Means of Semantic Web Ontologies and Reusable Solution Elements. In: Proceedings of the ASME 2012, 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Nantes, France, 2012
- [DAB+12] DUMITRESCU, R.; ANACKER, H.; BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.: Computer support for the identification of solution patterns for the conceptual design of advanced mechatronic systems. In: Proceedings of the ASME 2012, 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Nantes, France, 2012
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [GBD+10] GAUSEMEIER, J.; BAUER, F.; DETTMER, D.; REYES PEREZ, M.: Planning of Manufacturing Processes for Graded Components. In: Proceedings of the 1st International Conference on Product Property Prediction, 2010

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
1.1 Problematik	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
2 Grundlagen und Problemanalyse.....	5
2.1 Begriffsbestimmung.....	5
2.1.1 Entwicklung – Konzipierung – Prinziplösung.....	5
2.1.2 Systembegriff	6
2.1.3 Modell – Modellierungssprache – Modellierungsmethode.....	7
2.1.4 Produktion und Produktionssysteme	8
2.1.5 Arbeitsvorbereitung	10
2.1.6 Fabrik – Fabrikplanung.....	11
2.1.7 Wissen – Wissensmanagement.....	12
2.1.8 Wissensbasierte Systeme	13
2.1.9 Semantische Technologien – Ontologie	14
2.2 Produktentstehungsprozess	16
2.3 Produkt- und Produktionssystemkonzipierung.....	18
2.3.1 Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem ..	18
2.3.2 Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption	21
2.3.3 Modellierungsregeln für die Produktionssystemkonzipierung....	26
2.3.4 Fazit und Einordnung der Arbeit	27
2.4 Ausarbeitung von Produktionssystemen.....	27
2.4.1 Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme	28
2.4.2 Aufgaben der Arbeitsplanung	30
2.4.2.1 Planungsraum der Arbeitsplanung.....	31
2.4.2.2 Arbeitsablaufplanung / Prozessgestaltung	32
2.4.2.3 Arbeitssystemplanung	35
2.4.3 Vorgehen zur Fabrikplanung	38
2.4.4 Fazit und Einordnung der Arbeit	40
2.5 Simulative Absicherung der Produktionssystemplanung.....	41
2.5.1 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien	41
2.5.2 Analyse und Bewertung von Produktionssystemkonzepten	44
2.5.3 Fazit und Einordnung der Arbeit	45

2.6	Lösungswissen während der Produktionssystemkonzipierung	46
2.7	Einsatz wissensbasierter Systeme zur Bereitstellung von Fach- und Lösungswissen.....	48
2.7.1	Systemkomponenten eines wissensbasierten Systems	48
2.7.2	Wissensrepräsentation mit semantischen Technologien	50
2.7.2.1	Datenmodellierung mit dem Resource Description Framework.....	51
2.7.2.2	Wissens- / Ontologiemodellierung	52
2.7.2.3	Wissensverarbeitung und Wissensabfrage	54
2.7.3	Fazit und Einordnung der Arbeit	56
2.8	Problemabgrenzung	56
3	Stand der Technik.....	61
3.1	Planungswerkzeuge für die wissensbasierte Produktionssystementwicklung.....	61
3.1.1	Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung SCHADY	61
3.1.2	Ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion nach KÖSTERS.....	64
3.1.3	Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen HARMS	66
3.1.4	Ontology Framework for the Integrated Design of Modular Assembly Systems LOHSE	69
3.1.5	Combining a SysML-based modeling approach and semantic technologies nach FELDMANN ET AL.	71
3.1.6	Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche GAAG.....	72
3.2	Ontologien im Kontext Produktion	74
3.2.1	Manufacturing Service Description Language (MSDL)	74
3.2.2	MANufacturing's Semantics ONtology (MASON)	76
3.2.3	Manufacturing System Engineering (MSE) Ontology Model	77
3.2.4	Ontology-based Manufacturing Design System	79
3.2.5	A Modular Production System Description Ontology (OntoMoPS)	80
3.3	Bewertung und Handlungsbedarf	81
4	Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung ..	85
4.1	Spezifikationstechnik zur graphischen Modellierung.....	86
4.1.1	Grundlegende Richtlinien und Bedingungen der Modellierung ..	87
4.1.2	Parametermodellierung	88
4.1.3	Partialmodell Prozesse	89

4.1.4	Partialmodell Ressourcen	91
4.1.5	Partialmodell Gestalt	98
4.2	Ontologie zur Wissensaufbereitung für die Produktionssystemkonzipierung	99
4.2.1	Grundstruktur der Ontologie	99
4.2.2	Klassen und Relationen zur Parametermodellierung	101
4.2.3	Klassen und Relationen zur Prozessmodellierung	103
4.2.4	Klassen und Relationen zur Ressourcenmodellierung	106
4.3	Problemlösungskomponente zur Modellierungsunterstützung	110
4.3.1	Wissensbasierte Modellierung auf Prozessebene	111
4.3.2	Synthese von Ressourcen	113
4.3.3	Prüfen des Systementwurfs / Ermitteln von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen	114
4.4	Prototypische Implementierung	118
5	Anwendung des Planungswerkzeugs zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung	125
5.1	Einordnung in die bestehende Entwicklungsmethodik	125
5.2	Konzipierung des Produktionsprozesses	126
5.3	Modellierung der Grundstruktur des Produktionssystems	131
5.4	Detaillierung der Grundstruktur	137
5.5	Analyse des Produktionssystemkonzepts	140
5.6	Bewertung des Planungswerkzeugs anhand der Anforderungen	142
6	Zusammenfassung und Ausblick	145

Anhang

A1	Relevante Teilergebnisse des Projekts ENTIME	A-1
A2	Vorgehensmodelle zur Produktionssystemkonzipierung	A-3
	A2.1 Vorgehensmodell nach NORDSIEK.....	A-3
	A2.2 Vorgehensmodell nach BRANDIS.....	A-6
A3	Ergänzungen zu Kapitel 4	A-9
	A3.1 Modellierung einer Zahlenwert-Einheit-Kombination.....	A-9
	A3.2 SPAQRL-Abfragen zur Modellierung	A-10
A4	Ergänzungen zu Kapitel 5	A-11
	A4.1 Konzipierung auf Ressourcenebene	A-11
	A4.2 Konzipierung auf Gestaltebene	A-12

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit basiert zum Teil auf den Arbeiten im Verbundprojekt ENTIME „Entwurfstechnik intelligent Mechatronik“. Ein Ziel des Projekts war die Unterstützung des Entwicklers¹ beim Entwurf eines neuen Produkts durch den Einsatz semantischer Technologien. Damit sollen die Suche nach passenden Lösungen verbessert und der Zugriff auf verfügbares Lösungswissen vereinfacht werden. Während das Projekt ENTIME eine Unterstützung bei der Entwicklung intelligenter mechatronischer Produkte fokussierte, wird in dieser Arbeit die Konzipierung des Produktionssystems betrachtet. Der grundsätzliche Ansatz ist identisch. Vorhandenes Lösungswissen für die frühe Planungsphase wird maschinenverständlich aufbereitet und für Entwickler verfügbar gemacht.

1.1 Problematik

Produzierende Unternehmen sehen sich in Zukunft einer Reihe von Entwicklungen gegenüber, die einen gravierenden Einfluss auf das unternehmerische Handeln haben und auf die in geeigneter Weise reagiert werden muss. Zu den sogenannten Megatrends zählen beispielsweise die Globalisierung, die Ressourcenverknappung und die Dynamisierung der Produktlebenszyklen [AR11, S. 10]. Dies führt dazu, dass Unternehmen neue Produkte schnell und effizient entwickeln müssen. Damit einhergehend müssen auch die notwendigen Produktionssysteme schneller geplant und umgesetzt werden.

Eine Möglichkeit die Zeit bis zum Markteintritt zu verringern, ist die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem². Der Produktentstehungsprozess wird hierzu ganzheitlich betrachtet und die vormals sequenziellen Arbeitsabläufe parallelisiert. Die vielfachen Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung erfordern eine enge Kommunikation und Kooperation der beteiligten Fachleute der unterschiedlichen Disziplinen [GLL12, S. 29]. Bereits in der Konzipierungsphase müssen die Informationen zwischen den Bereichen ausgetauscht und die Auswirkungen auf die erstellten Konzepte analysiert werden [VDI2206, S. 43], [Mic06, S. 19].

Das Produktionssystemkonzept stellt auf der einen Seite die Schnittstelle zur Produktentwicklung dar. Auf der anderen Seite bildet es den Ausgangspunkt für die weitere Ausarbeitung im Rahmen der Arbeitsplanung. Diese setzt sich zusammen aus den Aufgabebereichen Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung sowie der

¹ Die Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße sowohl auf Frauen als auf Männer. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch die männliche Form (Planer, Entwickler etc.) für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weibliche Form wird dabei stets mitgedacht. Eine Ausnahme bilden die Inhalte, die ausdrücklich auf Frauen bezogen werden.

² Synonym wird auch der Begriff *Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung* verwendet [AR11].

Materialflussplanung [GP14, S. 31ff.]. Im Produktionssystemkonzept müssen alle relevanten Planungsinformationen enthalten sein, die für die weiteren Arbeiten in den genannten Bereichen notwendig sind.

Für die Erarbeitung von Produktionssystemen in der frühen Planungsphase wurde am Lehrstuhl für Produktentstehung eine Spezifikationstechnik entwickelt [Rey11], [GLL12]. Sie erlaubt eine graphische Modellierung der Aspekte Anforderungen, Prozesse, Ressourcen und Gestalt. Die entsprechenden Spezifikationen dienen als Grundlage für die Kommunikation und Koordination der beteiligten Entwickler bzw. Planer. Für eine Absicherung der erstellten Konzepte müssen diese mit geeigneten Simulationsprogrammen validiert werden [NHK+09]. Für die Erstellung der Simulationsmodelle benötigen die Simulationsexperten alle relevanten Daten und Informationen über das abzubildende Produktionssystem. Diese müssen in der Spezifikation des Produktionssystemkonzepts enthalten sein.

Bei der Konzipierung neuer Produktionssysteme ergeben sich zwei Hauptaufgaben. Zum einen sind geeignete Prozesse und Ressourcen zu identifizieren, mit denen das Produkt hergestellt werden kann. Zum anderen sind die Prozesse und Ressourcen so zu beschreiben, dass alle benötigten Informationen für die Ausarbeitung und Analyse in der Prinzipiellösung enthalten sind. Notwendiges Wissen für die Bearbeitung der Aufgaben ist häufig im Unternehmen vorhanden. Es liegt in Form von Prozess- oder Ressourcenbeschreibungen (z. B. Projektdokumentationen) oder als implizites Wissen der Mitarbeiter vor. Dieses implizite Wissen ist das Erfahrungswissen der Mitarbeiter und muss maschinenverständlich aufbereitet werden.

Der gezielte Einsatz von vorhandenem Wissen im Unternehmen kann die einzelnen Planungsaufgaben maßgeblich beschleunigen und die Qualität der Planungsergebnisse verbessern. Eine Möglichkeit dieses Wissen dem Entwickler verfügbar zu machen ist der Einsatz von wissensbasierten Systemen. Das Fach- und Erfahrungswissen muss in einer geeigneten Art und Weise repräsentiert und dem Produktionssystemplaner zur Verfügung gestellt werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist ein *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung*. Es unterstützt den Produktionssystemplaner¹ in der frühen Entwicklungs- und Planungsphase bei der Erstellung erster Produktionssystemkonzepte. Die Konzipierung erfolgt dahingehend wissensbasiert, dass bei der Erarbeitung der unterschiedlichen Aspekte kontinuierlich auf das verfügbare Fach- und Lösungswissen zugegriffen wird.

¹ Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Bezeichnungen Produktionssystemplaner und Produktionssystementwickler sowie Entwickler und Planer synonym verwendet.

Ausgangspunkt für die Produktionssystemkonzipierung ist ein vorliegendes Produktkonzept. Daraus ergeben sich die produktionsrelevanten Anforderungen sowie die Fertigungs- und Montageprozesse. Zur Umsetzung der Prozesse sind geeignete Ressourcen auszuwählen und ein initiales Layout des Produktionssystems zu erstellen. Das Planungswerkzeug ermöglicht die rechnerinterne Abbildung der einzelnen Aspekte und stellt Suchanfragen an eine Wissensbasis, in der sich das Fach- und Lösungswissen befindet. Suchergebnisse werden aufbereitet und in den Modellierungsprozess integriert.

Kernelemente des Planungswerkzeugs sind eine graphische Modellierungsmethode, eine semantische Repräsentation zur Abbildung von Fachwissen und ein Vorgehensmodell für die wissensbasierte Produktionssystemkonzipierung. Die graphische Modellierungsmethode bietet dem Anwender eine intuitive Möglichkeit, das Produktionssystemkonzept zu erarbeiten. Die semantische Repräsentation von Fachwissen fokussiert die Interpretation vorliegender Daten und Informationen durch das Planungswerkzeug. Anhand einer spezifizierten Problemstellung, werden die benötigten Planungsinformationen situationsgerecht zur Verfügung zu stellen. Das Planungswerkzeug bildet demnach die Schnittstelle zwischen graphischer und semantischer Abbildung und ermöglicht die Vorteile und Potentiale beider Modellierungsmethoden für die Produktionssystemkonzipierung zu nutzen. Das Vorgehensmodell dient dem Anwender als roter Faden während der einzelnen Arbeitsschritte und stellt den zielgerichteten Einsatz der semantischen Technologien sicher. Durch die Wiederverwendung von vorhandenem Wissen wird der Planungsaufwand reduziert und der Wissenstransfer verbessert.

1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird zunächst die beschriebene Problematik detaillierter betrachtet. Relevante Begriffe werden erläutert und die Arbeit in den Produktentstehungsprozess eingeordnet. Anschließend wird das generelle Vorgehen zur Produktionssystemkonzipierung sowie die eingesetzte Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems) beschrieben. Im Hinblick auf die weitere Ausarbeitung des Produktionssystems werden die Aufgaben der Arbeits- und Fabrikplanung präsentiert. Weiterhin werden ein Vorgehen zur Absicherung von Produktionssystemen und Bewertungsmethoden vorgestellt. Danach erfolgt die Betrachtung wissensbasierter Systeme und der Möglichkeiten der Wissensrepräsentation. Das Kapitel schließt mit der Problemabgrenzung und den Anforderungen an das Planungswerkzeug.

Gegenstand von **Kapitel 3** ist der Stand der Technik für die semantische Repräsentation von Fachwissen. Es werden unterschiedliche Ontologien im Kontext Produktion vorgestellt und deren Eignung für die Produktionssystemkonzipierung diskutiert. Zusätzlich werden wissensbasierte Planungssysteme betrachtet, die eine semantische Repräsentation mit einem angepassten Softwarewerkzeug oder einer graphischen Modellierung kombinieren.

Kapitel 4 bildet den Hauptteil der vorliegenden Arbeit und behandelt die notwendigen Bestandteile zur Umsetzung einer wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Zunächst werden die relevanten Aspekte der Spezifikationstechnik CONSENS vorgestellt und Grundklassen sowie Modellierungsregeln definiert. Damit wird sichergestellt, dass die Modellinhalte von unterschiedlichen Betrachtern gleich interpretiert werden. Im Anschluss erfolgt die Vorstellung der entwickelten Ontologie zur semantischen Abbildung von Fach- und Lösungswissen in der Konzipierungsphase. Darauf aufbauend wird eine Problemlösungskomponente erläutert. Sie unterstützt den Anwender während der Konzipierung durch die automatisierte Erzeugung von Suchanfragen auf Basis der graphisch modellierten Planungsinhalte. Zum Ende des Kapitels wird die technische Umsetzung des Planungswerkzeugs kurz vorgestellt.

In **Kapitel 5** wird das Vorgehensmodell zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung anhand eines Praxisbeispiels erläutert. Im Fokus steht dabei nicht die vollständige Erarbeitung der einzelnen Aspekte, sondern die Verknüpfung zwischen der graphischen Modellierung und der Wissensbasis. Es wird aufgezeigt, welche Informationen an den graphischen Elementen annotiert werden, wie der Zugriff auf das Fachwissen und die Verwendung aus Sicht des Anwenders erfolgt.

Den Abschluss der Arbeit bildet **Kapitel 6**. Darin wird eine Zusammenfassung gegeben und mögliche Ansätze für weitere Forschungsarbeiten beschrieben. Im **Anhang** finden sich ergänzende Informationen zu den einzelnen Kapiteln.

2 Grundlagen und Problemanalyse

In diesem Kapitel wird die vorab vorgestellte Problematik detaillierter betrachtet und die einzelnen Punkte analysiert. Daraus werden die Anforderungen an ein *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung* abgeleitet. Kapitel 2.1 umfasst für die Arbeit relevante Begriffe. In Kapitel 2.2 erfolgt eine Beschreibung des Produktentstehungsprozess und eine Einordnung der vorliegenden Arbeit. Kapitel 2.3 befasst sich mit dem Vorgehen zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, der Spezifikationstechnik CONSENS und bestehenden Modellierungsregeln für deren Einsatz. Es folgen Vorgehensweisen und Arbeitsinhalte zur Ausarbeitung von Produktionssystemen in Kapitel 2.4. Die Absicherung der Produktionssystemplanung mittels Simulations- und Bewertungsmethoden wird in Kapitel 2.5 behandelt. Das benötigte Lösungswissen während der Produktionssystemkonzipierung wird in Kapitel 2.6 diskutiert. Kapitel 2.7 stellt den Aufbau wissensbasierter Systeme sowie Techniken zur Wissensrepräsentation vor. Abschließend erfolgen in Kapitel 2.8 eine Problemabgrenzung und das Ableiten der Anforderungen.

2.1 Begriffsbestimmung

In den folgenden Unterkapiteln werden einige Begriffe kurz erläutert, die für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind. Im Bedarfsfall werden sie definiert und in den Kontext der vorliegenden Arbeit eingebettet.

2.1.1 Entwicklung – Konzipierung – Prinziplösung

Der Begriff **Entwicklung** bezeichnet sowohl eine Tätigkeit im Produktentstehungsprozess als auch die Abteilung im Unternehmen, welche diese Tätigkeit ausführt. Im Rahmen der Entwicklungstätigkeit / des Entwicklungsprozesses werden die geometrisch-stofflichen Merkmale eines Produkts festgelegt. In der Praxis werden die Begriffe Konstruktion, Konstruktionstätigkeit und Konstruktionsprozess synonym verwendet [Ehr09], [PBF+07]. Das generelle Vorgehen während des Entwicklungs-/Konstruktionsprozesses lässt sich aufteilen in die vier Hauptphasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* [PBF+07], [VDI2221].

Während der **Konzipierungsphase** wird die prinzipielle Lösung des Produkts bzw. des Systems erarbeitet. Die wesentlichen Problemstellungen der Entwicklungsaufgabe werden abstrahiert und in Teilaufgaben (z. B. Teilfunktionen) zerlegt. Im Anschluss erfolgt die Suche nach passenden Lösungen zur Erfüllung der Teilaufgaben. Der Entwickler greift hierzu auf Lösungssammlungen (z.B. mechanische Wirkprinzipien), Zulieferkataloge und sein Erfahrungswissen zurück. Aus der Kombination der Teillösungen ergeben sich unterschiedliche Lösungsvarianten. Diese werden nach technischen und wirtschaft-

lichen Kriterien bewertet und die geeignetste Variante ausgewählt. Das Ergebnis der Konzipierung wird als **Prinziplösung**, prinzipielle Lösung oder Lösungskonzept bezeichnet [PBF+07], [VDI2221], [Ehr09], [PL11].

Bei der Prinziplösung handelt es sich somit um den prinzipiellen Lösungsvorschlag für die gestellte Aufgaben- bzw. Problemstellung. Sie beschreibt jedoch noch nicht die vollständige Lösung [PL11]. Die Prinziplösung umfasst die grundlegenden Aspekte und bildet die Ausgangsbasis für den weiteren Entwurf und die weitere Ausarbeitung des Systems. Änderungen an der Prinziplösung sind dabei nicht ausgeschlossen. Die Prinziplösung wird folglich als erster Entwurf bzw. Konzept angesehen [Nor12]. Das Resultat der Produktkonzipierung wird im Folgenden auch als **Produktkonzept**, das Resultat der Produktionssystemkonzipierung als **Produktionssystemkonzept** bezeichnet.

2.1.2 Systembegriff

Für Entwicklungs- und Planungsprojekte bietet es sich an, den Betrachtungsgegenstand (technisches Produkt, Fertigungsanlage, etc.) zunächst abzugrenzen. Damit lassen sich beispielsweise die Schnittstellen bestimmen, Verantwortungs-, Kompetenz- oder Lieferbereiche definieren sowie Beziehungen zu anderen Elementen klären. Der Betrachtungsgegenstand wird hierzu als eigenständiges System angesehen. Nach EHRENSPIEL ist der Systembegriff wie folgt definiert:

"Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System)" [Ehr09, S. 19].

Jedes System besteht somit unter Berücksichtigung der gewählten Systemgrenze aus einer Reihe von Elementen. Elemente können ihrerseits wiederum als eigenständige Systeme aufgefasst und entsprechend aufgegliedert werden. Ebenso kann das betrachtete System ein Teilsystem eines übergeordneten Systems sein und wird dementsprechend auf der höheren Ebene als Element erfasst. Es ergibt sich eine Hierarchie von (Teil)Systemen. Zwischen den Elementen bestehen Beziehungen. Aus der Kombination von Elementen und Beziehungen ergibt sich die Struktur des Systems. Weiterhin lässt sich jedes System, jedes Element und jede Beziehung über eine Reihe von Eigenschaften beschreiben. Alle Elemente außerhalb der Systemgrenze definieren die Eingangs- und Ausgangsgrößen des betrachteten Systems [Ehr09].

In Abhängigkeit der vorliegenden Entwicklungs- oder Planungsaufgabe, lassen sich unterschiedliche Arten von Systemen erstellen. Für die Ingenieurwissenschaften sind technische Systeme von besonderem Interesse. Darunter werden künstlich erzeugte Gebilde verstanden, die eine bestimmte Funktion oder Produktionsprozess erfüllen sollen. Wird nur der Aufbau des Systems betrachtet, d.h. das geometrisch-stoffliche Gebilde, wird

auch der Begriff technisches Produkt verwendet. Technische Systeme sind heutzutage in der Regel soziotechnische Systeme. Dies bedeutet, dass neben der maschinellen Funktionserfüllung auch die Interaktion des Menschen benötigt wird [Ehr09].

2.1.3 Modell – Modellierungssprache – Modellierungsmethode

Durch die modellhafte Abbildung werden Systeme sowie die komplexen Zusammenhänge veranschaulicht. Ein Modell ist die Abstraktion und Vereinfachung der Realität mit dem Ziel, nur einen Teilaspekt darzustellen:

„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“ [Dan99, S. 11].

Gedankliche, graphische oder mathematische Modelle ermöglichen die Eigenschaften und Zusammenhänge eines Systems frühzeitig darzustellen, das Problembewusstsein zu fördern sowie Analysen und Simulationen durchzuführen [Ehr09], [HWF+12].

Grundlage der Modellerstellung ist eine geeignete Modellierungssprache, mit der der Anwender das reale System abbilden kann. Modellierungssprachen bestehen aus einer Syntax und einer zugehörigen Semantik. Die *abstrakte Syntax* legt fest, welche Elemente zur Verfügung stehen, wie sie eingesetzt und untereinander verbunden werden können. Über die *konkrete Syntax* wird die Darstellungsform der Elemente definiert, z. B. textuell oder graphisch. Mit der *statischen Semantik* werden Einschränkungen für Modellelemente erfasst. Dazu zählen beispielsweise Einschränkungen für den Wertebereich von Attributen oder für Beziehungen zwischen Elementen. Mit der *dynamischen Semantik* wird die inhaltliche Bedeutung der einzelnen Elemente beschrieben [VAC+09, S. 267]. Als Erweiterung einer Modellierungssprache ist die Modellierungsmethode zu sehen. Zusätzlich zu den genannten Bestandteilen der Sprache, liefert die Modellierungsmethode ein spezifisches Vorgehen wie die Sprache anzuwenden ist. So definiert DANGELMAIER die Modellierungsmethode wie folgt:

"Eine Modellierungsmethode umfasst Konstrukte, Regeln zur richtigen Benutzung der Konstrukte und die Beschreibung einer Vorgehensweise zur Modellierung von Systemen eines gewissen Anwendungsbereiches“ [Dan99, S. 11].

2.1.4 Produktion und Produktionssysteme

Der Begriff der Produktion wird in der Fachliteratur auf unterschiedliche Art und Weisen definiert und im Bereich der Betriebswirtschaftslehre bisweilen weit gefasst¹. Im Allgemeinen wird darunter der Prozess zur Kombination von Produktionsfaktoren (z. B. Maschinen, Rohstoffe, Energie oder Arbeitskraft) und deren Transformation zu Produkten verstanden. DOMSCHKE und SCHOLL definieren den Produktionsbegriff wie folgt:

"Produktion (oder Fertigung) ist ein Prozess, bei dem zum Zweck der Erstellung von Gütern Produktionsfaktoren kombiniert und transformiert werden. Die Menge der in die Produktion eingehenden Produktionsfaktoren wird auch als Input, der Kombinations- und Transformationsprozess als Produktionsprozess bezeichnet. Die hergestellten Güter nennt man Produkte oder Output" [DS05, S. 85].

Wie aus der Definition hervorgeht, wird der Begriff Produktion häufig synonym mit dem Begriff Fertigung verwendet. Insbesondere wenn die Produktion vorwiegend unter technischen Gesichtspunkten betrachtet wird und die *eigentlich Be- und Verarbeitung von Rohstoffen zu Halb- und Fertigfabrikaten* gemeint ist [WK09, S. 111].

Die Produktion lässt sich unterteilen in die Teilefertigung und die Montage. Unter Teilefertigung wird die Herstellung von Einzelteilen verstanden. Diese sind entweder die Eingangselemente für weitere Montagebereiche im Unternehmen oder werden an Endkunden geliefert. In der Montage werden Einzelteile zu Baugruppen oder fertigen Produkten zusammengebaut. Neben den Hauptaufgaben Fertigen und Montieren müssen zur Herstellung von Produkten weitere Nebenaufgaben erfüllt werden. Diese umfassen z. B. Prüf- und Kontrollaufgaben oder Logistikttätigkeiten wie Handhabung, Transport und Lagerung [War93, S. 8], [GT05, S. 9]. Die VDI-RICHTLINIE 5200 schließt diese Nebenaufgaben in die Definition des Produktionsbegriffs mit ein:

„Alle zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlichen Tätigkeiten, die unmittelbar an der Produktherstellung beteiligt sind und insbesondere die Prozesse Konstruieren und Arbeitsplan erstellen, Fertigen und Montieren, Lagern und Transportieren, Prüfen, Planen und Steuern, Waren vereinnahmen und versenden sowie Hilfsprozesse wie Instandhalten umfassen“ [VDI5200, S. 4].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der Produktion als Oberbegriff für die (Teile-)Fertigung und Montage sowie die notwendigen Nebenaufgaben verwendet. Soweit nicht anders angegeben, wird der Begriff Fertigung anstelle von Teilefertigung verwendet und

¹ vgl. [Pau11]

bezieht sich auf die Herstellung von Einzelteilen. Folglich ist auch der Begriff Produktionsprozess als Oberbegriff für Fertigungs-, Montage-, Transport- oder Handhabungsprozesse zu verstehen.

Die Ausführung der unterschiedlichen Produktionsprozesse erfolgt durch Produktionssysteme, die sich wiederum in Fertigungssysteme, Montagesysteme, Transportsysteme etc. unterscheiden lassen. Werden in einem Produktionssystem mehrere Einzelprozesse der Fertigung und Montage sowie des Material- und Informationsflusses selbstständig durchgeführt, so werden diese nach REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. als komplexe Produktionssysteme bezeichnet (Bild 2-1). Die informationstechnische Verknüpfung der einzelnen Komponenten des Systems ist das wesentliche Merkmal komplexer Produktionssysteme [REF90, S. 15]. Entsprechend des vorgestellten Systembegriffs können Produktionssysteme wiederum Teilsysteme von übergeordneten Produktionssystemen sein bzw. selbst weitere Produktionssysteme enthalten. Die Spanne reicht somit vom Arbeitsplatz, über flexible Fertigungs- und Montagesysteme bis zum gesamten Produktionsbetrieb.

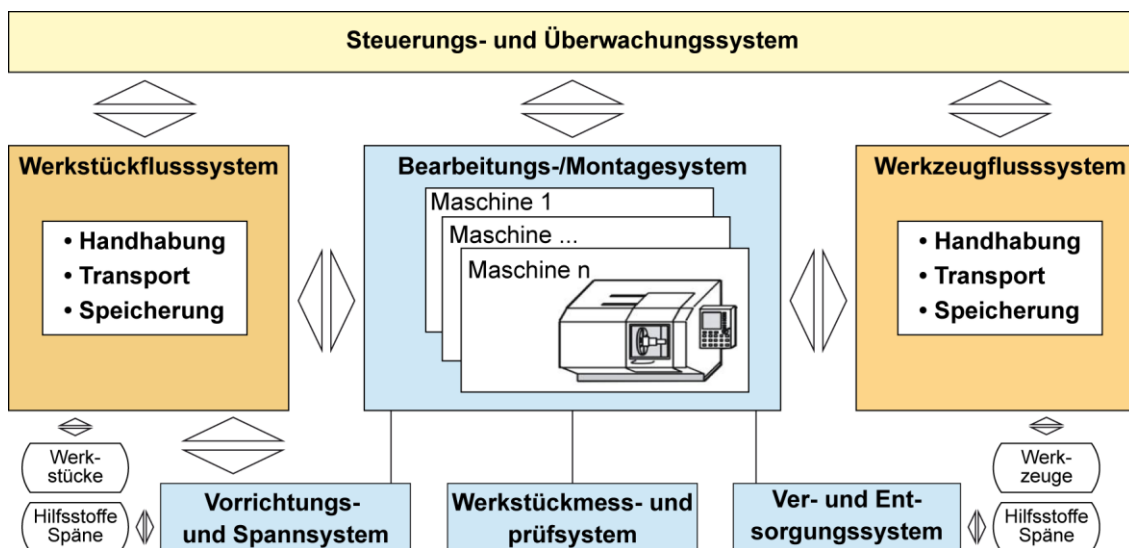


Bild 2-1: Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach [Eve89, S. 55]

Unabhängig von der Systemgröße lassen sich komplexe Produktionssysteme in drei grundlegende Bestandteile gliedern. Die eigentliche Bearbeitungsaufgabe wird vom **Bearbeitungs-/Montagesystem** durchgeführt. Dies umfasst alle Betriebsmittel¹, die zur Erfüllung der Produktionsaufgabe notwendig sind, beispielsweise Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfmittel. **Materialflusssysteme** übernehmen das Lagern, Speichern, Transportieren, Bereitstellen und Handhaben von Werkstücken, Werkzeugen

¹ Unter Betriebsmitteln werden generell alle Elemente verstanden, die zur unmittelbaren und mittelbaren Durchführung der Produktion benötigt werden. Im weiteren Sinne umfasst dies z. B. auch die Beleuchtungsanlage der Fabrikhalle, Büroausstattung oder Kommunikationstechnik [HMR10, S. 645ff.]. Im Fokus dieser Arbeit stehen die Betriebsmittel, die direkt am Herstellprozess beteiligt sind.

und Vorrichtungen. Notwendige Fördermittel und Förderhilfsmittel sind z. B. Lager, Fahrzeuge, Paletten oder Industrieroboter mit Greifer. Der dritte Bestandteil sind die **Informationssysteme**. Sie umfassen alle Einrichtungen zum Speichern, Verwalten, Bearbeiten, Versenden und Empfangen von Daten, die während des Produktionsablaufs benötigt werden. Neben den Hardwareelementen wie Terminals oder Datenträger, zählen hierzu auch die Steuerungs- und Überwachungsprogramme [REF90, S. 41f.].

Produktionssysteme lassen sich weiterhin einteilen in einstufige, mehrstufige und kombinierte Produktionssysteme. Die Einteilung ergibt sich aus den möglichen Arbeitsaufgaben sowie deren Verteilung auf die einzelnen Betriebsmittel. In einem **einstufigen Produktionssystem** können alle notwendigen Arbeitsaufgaben auf einer Bearbeitungs-/Montagestation¹ durchgeführt werden. Sind mehrere identische Stationen z. B. Werkzeugmaschinen mit gleichen Maschinendaten verfügbar, lassen sich die eingesetzten Betriebsmittel ersetzen. In einem **mehrstufigen Produktionssystem** durchlaufen die Werkstücke mehrere Bearbeitungs-/Montagestationen. An den einzelnen Stationen werden jeweils nur Teilvorgänge durchgeführt. Daraus ergeben sich ergänzende Betriebsmittel. Für das Werkstück ergibt sich eine feste Reihenfolge, in der die Stationen zu durchlaufen sind. Als Mischform der beiden Systemarten ergibt sich ein **kombiniertes Produktionssystem**. Hierzu werden ersetzende und ergänzende Betriebsmittel gezielt miteinander kombiniert. Der Ausfall eines Betriebsmittels kann somit durch die Verlagerung der Arbeitsaufgaben auf ersetzende Betriebsmittel kompensiert werden. Die negativen Auswirkungen auf den Produktionsfortschritt werden gemildert [REF90, S. 43].

2.1.5 Arbeitsvorbereitung

Die Arbeitsvorbereitung umfasst alle Maßnahmen für die Vorbereitung einer wirtschaftlichen Fertigung von Erzeugnissen. Sie lässt sich in die Bereiche Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung aufteilen [AR68, S. 5ff.].

Die **Arbeitsplanung**² umfasst alle einmaligen Tätigkeiten und Planungsmaßnahmen zur Gestaltung des Produktionssystems [Dan99, S. 5], [AR68, S. 6]. Für ein neues Produkt werden Stücklisten erstellt, die Materialplanung durchgeführt, Arbeitsvorgänge geplant und Vorgabezeiten ermittelt. Dies erfolgt losgelöst von konkreten Bestellaufträgen. Die Arbeitsplanung beantwortet zunächst die Fragestellungen, *Was* hergestellt wird, *Wie* es hergestellt wird und *Womit* es hergestellt wird [Eve97, S. 3]. Nach AWF/REFA lässt sich

¹ Eine Station bezeichnet einen räumliche abgegrenzten Bereich, in dem die Arbeitsaufgabe erfüllt wird [REF90, S. 43].

² In der Praxis wird der Begriff Fertigungsplanung häufig synonym verwendet, besonders wenn vorwiegend Fertigungsbetriebe betrachtet werden. Im Sinne einer ganzheitlichen Planung, die z. B. die Logistik mit einschließt, ist der Begriff der Fertigungsplanung jedoch nicht anwendbar [AR68, S. 6]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Arbeitsplanung verwendet.

die Arbeitsplanung weiter unterteilen in die Bereiche Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitszeitplanung, Bedarfsplanung je Einheit, Arbeitsfristenplanung und Arbeitskostenplanung [AR68, S. 9].

Die **Arbeitssteuerung** umfasst alle Maßnahmen die zur Auftragsabwicklung notwendig sind. Sie steuert, plant und überwacht die Produktionsabläufe im Unternehmen. Die Grundlagen für die Arbeitssteuerung sind die Ergebnisse der Arbeitsplanung. Zu den einzelnen Aufgaben gehören u.a. die Bedarfsermittlung, der Kapazitätsabgleich, die Maschinenbelegung und die Terminfeinplanung. Es werden die Fragestellungen beantwortet, *Wie viel* hergestellt wird, *Wann* etwas hergestellt wird, *Wo* etwas hergestellt wird und *durch Wen* es herzustellen ist [Eve97, S. 3]. Es ist somit Aufgabe der Arbeitssteuerung den reibungslosen Betriebsablauf sicherzustellen. Für ein gegebenes Produktionsprogramm sind die durch die Arbeitsplanung festgelegten Abläufe abzuwickeln. Sollten Abweichungen vom Plan (Überlastung oder Störung von Maschinen) auftreten, sind entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen, beispielsweise eine zeitliche Verschiebung oder ein Maschinenwechsel [Wie10, S. 196].

2.1.6 Fabrik – Fabrikplanung

Im Allgemeinen wird unter einer Fabrik meist das eigentliche Gebäude verstanden in dem der Produktionsprozess durchgeführt wird. Eine Fabrik umfasst jedoch alle Bereiche die für die Auftragserfüllung benötigt werden, vom Wareneingang über die Produktionssysteme bis zum Versand der hergestellten Produkte. Die VDI-RICHTLINIE 5200 definiert den Fabrikbegriff als:

„Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“
[VDI5200, S. 3].

Die notwendigen Teilprozesse sind durch Fabrikressourcen zu erbringen, die sich in die Bereiche Technik, Organisation und Personal einteilen lassen. Weitere relevante Bestandteile der Fabrik sind der eigentliche Standort und das Gebäude, die Unternehmenskultur und Nachhaltigkeitsaspekte [WRN09, S. 32]. Die Planung, Gestaltung und Umsetzung von Fabriken erfolgt im Rahmen des Fabrikplanungsprozesses. Der Begriff Fabrikplanung ist definiert als:

„Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauenden Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI5200, S. 3].

Aufgrund der komplexen Planungsinhalte erfolgt die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben in Form von Projekten, die mit Methoden des Projektmanagements gesteuert werden. Die grundlegenden Planungsfälle lassen sich unterscheiden in

- eine **Neuplanung** mit sämtlichen Gestaltungsfreiheiten,
- eine **Umplanung** innerhalb einer bestehenden Fabrik,
- dem **Rückbau** einer stillgelegten Fabrik und
- der **Revitalisierung** für eine erneute industrielle Nutzung.

Je nach Planungsfall ergeben sich unterschiedliche Zielstellungen für die Fabrikplanung. Beispiele sind die Erhöhung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, die Steigerung der Produkt- und Produktionsprozessqualität oder eine Verbesserung der Nachhaltigkeit [VDI5200, S. 5].

2.1.7 Wissen – Wissensmanagement

Für Unternehmen wird der zielgerichtete Einsatz des verfügbaren Wissens immer entscheidender. Das Wissensmanagement befasst sich mit dem Erwerb, dem Transfer, der Speicherung und der Nutzung von Wissen. Generell basiert Wissen auf der Wahrnehmung und Anwendung von Daten und Informationen. Daten sind zunächst Fakten, die ohne weitere Hintergründe nicht verständlich sind. Werden Daten strukturiert und in einen Kontext gebracht, liegen Information vor. Die Vernetzung von Informationen führt zu Wissen [VDI5610, S. 4]. Die Zusammenhänge sind in Bild 2-2 an einem Beispiel erläutert.

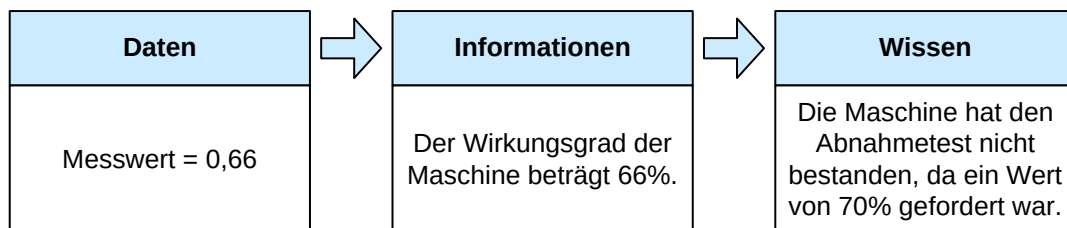


Bild 2-2: Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen nach [VDI5610, S. 4]

Im Gegensatz zu Daten und Informationen kann Wissen jedoch nicht einfach erworben werden [Gab14-ol]. Beispielsweise greift ein Mitarbeiter im Zuge von Konstruktions- oder Planungsaufgaben auf vorliegende Informationen zurück, zieht Schlüsse für die Problemstellung und generiert neues Wissen für die Lösung eines konkreten Problems. PROBST ET AL. definieren den Wissensbegriff daher wie folgt:

„Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge“ [PRR12, S. 23].

Die Dokumentation und Weitergabe von Wissen ist nicht ohne weiteres möglich. Es wird in dem Zusammenhang zwischen explizitem und implizitem Wissen unterschieden. Explizites Wissen ist formulierbar, lässt sich vermitteln und wird als fachspezifisches Wissen oder Faktenwissen bezeichnet. Durch geeignete Informations- und Kommunikationstechnologien lässt es sich übertragen. Im Gegensatz dazu ist das implizite Wissen stark an die Erfahrungen von Individuen geknüpft. Je nach Kontext, Aufgabe oder Situation wird

darauf zurückgegriffen und das Wissen intuitiv angewendet. Teilweise sind sich die Wissensträger dieses Wissens gar nicht bewusst und können es folglich nicht beschreiben. Implizites Wissen lässt sich daher nur schwer bzw. gar nicht formalisieren und vermitteln. Durch das Ausscheiden erfahrener Mitarbeiter verliert ein Unternehmen dieses wertvolle Wissen [PRR12], [Gab14-ol].

2.1.8 Wissensbasierte Systeme

Wissensbasierte Systeme sind computergestützte Informationssysteme bzw. Softwaresysteme, die das Fachwissen eines bestimmten Anwendungsbereichs darstellen und es zur Problemlösung einsetzen. Die Bereiche Wissensdarstellung und Wissensverarbeitung werden dabei strikt getrennt, wodurch sich wissensbasierte Systeme von konventionellen Softwaresystemen¹ unterscheiden. KURBEL definiert ein wissensbasiertes System als:

"...ein Softwaresystem, bei dem das Fachwissen über ein Anwendungsgebiet ("Domain knowledge") explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird" [Kur89, S. 18].

Der grundlegende Aufbau eines wissensbasierten Systems besteht aus einer **Wissensbasis** und der **Problemlösungskomponente**. In der Wissensbasis wird das Fachwissen mittels einer geeigneten Wissensrepräsentationssprache dargestellt. Stellt ein Anwender Anfragen an das System, werden durch die Problemlösungskomponente die vorliegenden Fakten verarbeitet und Schlüsse gezogen. Obwohl es sich um eigenständige Komponenten handelt, stehen sie in enger Beziehung zueinander. Die Wissensrepräsentation in der Wissensbasis hat maßgeblichen Einfluss auf die Wissensverarbeitung. Gleichzeitig ergeben sich aus der konkreten Problemlösungskomponente Anforderungen an den Aufbau der Wissensbasis [Kur89], [GR98].

Eine spezifische Form der wissensbasierten Systeme sind die sogenannten Expertensysteme. Mit ihnen wird das menschliche Problemlösungsverhalten nachgebildet, um komplexe Probleme lösen zu können:

¹ In konventionellen Informationssystemen werden das Wissen über den betrachteten Bereich und das Problemlösungswissen zur Bearbeitung von Fragenstellen im Quellcode abgelegt. Das Fachwissen verteilt sich auf die Datenstrukturen und Algorithmen und ist starr im System codiert. Zur Anpassung oder Erweiterung des Fachwissens ist somit Programmieraufwand erforderlich [Kur89].

"Ein Expertensystem ist ein Programm, das in einem eng abgegrenzten Anwendungsbereich die spezifischen Problemlösungsfähigkeiten eines menschlichen Experten erreicht oder übertrifft“ [Kur89, S. 22].

In der Praxis werden die Begriffe wissensbasiertes System und Expertensystem häufig synonym verwendet [GR98], [SAA+00]. Im sehr abgegrenzten Anwendungsbereich von Expertensystemen und dem spezifischen Fachwissen liegt jedoch der maßgebliche Unterschied zwischen beiden Systemarten [Kur89].

Im Rahmen dieser Arbeit wird explizit von einem Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung gesprochen. Im Fokus steht der Zugriff auf Fachwissen in einer Wissensbasis zur Unterstützung des Anwenders während der Konzipierung eines neuen Produktionssystems. Die unterschiedlichen Aufgabenstellungen der Produktionssystemkonzipierung werden vom Planer durchgeführt und sollen nicht automatisch durch das Planungswerkzeug gelöst werden.

2.1.9 Semantische Technologien – Ontologie

Die Informationsaufbereitung im World Wide Web ist heute fast ausschließlich auf den Menschen ausgerichtet [HKR+08, S. 10]. Wie vorliegenden Informationen zu interpretieren sind, ist Aufgabe des Betrachters [PB06a, S. 11]. Zusätzliche Metadaten¹ werden vorwiegend für die Darstellung der Inhalte verwendet. Das Konzept für die Weiterentwicklung des World Wide Webs hin zu einer maschinenverständlichen Darstellung der Inhalte wird als Semantik Web² bezeichnet [BHL01]. Die Informationen sollen von vorherein so aufbereitet werden, dass sie durch Maschinen verarbeitet werden können [HKR+08, S. 11], [Yu11, S. 9ff.]. Die notwendigen Standards und Grundlagentechnologien für die Umsetzung des Semantik Webs sind **semantische Technologien** [PB06a, S.20]. Sie umfassen u.a. Wissensrepräsentationssprachen zur Erstellung von Ontologien sowie Methoden und Werkzeuge für deren Erstellung und Anwendung. Abseits des Einsatzes im World Wide Web, werden semantische Technologien für wissens- und kommunikationsintensive Arbeitsabläufe verwendet. Derzeit werden sie vermehrt für das industrielle Wissensmanagement eingesetzt [Bai08, S. 21f.], [HKR+08, S. 12].

¹ Als Metadaten werden Informationen bezeichnet, die die eigentlichen Daten näher beschreiben. So werden beispielsweise in HTML-Dokumenten (Hypertext Markup Language) Metadaten verwendet um Textinhalte als Überschriften zu kennzeichnen oder Verlinkungen zu anderen Webseiten zu setzen.

² Die *Semantik* (semantische Theorie, Bedeutungslehre) ist die Wissenschaft von der Bedeutung von Zeichen.

In der Informatik¹ wird unter dem Begriff der **Ontologie** ein formales Repräsentationsmodell für Begriffe verstanden. Ausgehend von den Definitionen von GRUBER² und BORST³ definieren STUDER ET AL. eine Ontologie als:

“An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization” [SBF98, S. 184].

Ontologien beschreiben Konzepte sowie deren Beziehungen in einem betrachteten Themen- bzw. Wissensbereich. Mittels der formalen und expliziten Spezifikation wird die Konzeptualisierung in eine maschinenverständliche Sprache überführt [SS09, S. 3ff.], [PB06a, S. 12]. Eine Ontologie stellt somit ein wohldefiniertes Vokabular zur Verfügung, um die Bedeutung von Objekten in einem Wissensbereich zu spezifizieren. Sie liefert die Grundlagen für ein gemeinsames Verständnis⁴ über einen Bereich, für Schlussfolgerungen und für die Wiederverwendung von Wissen [GL02, S. 40]. Die Bestandteile einer Ontologie sind *Klassen*, *Instanzen*, *Eigenschaften/Relationen* und *Axiome*⁵. Entsprechend ihrer semantischen Ausdrucksstärke werden Ontologien in zwei Typen unterschieden:

- Leichtgewichtige (*lightweight*) Ontologien verwenden keinen oder nur sehr wenigen Restriktionen zur Spezifikation der Objekte. Beispiele sind ein kontrolliertes Vokabular, ein Glossar oder ein Thesaurus.
- Schwergewichtige (*heavyweight*) Ontologien beinhalten zusätzlich Axiome und Restriktionen, wodurch Aussagen über Objekte weiter eingrenzt und Schlussfolgerungen ermöglicht werden (Prädikatenlogik).

Eine weitere Unterteilung ergibt sich anhand der Spezialisierung, d.h. dem betrachteten Bereich und dem Detaillierungsgrad der mit der Ontologie abgedeckt wird. Sogenannte *Top-Level-Ontologien* definieren Konzepte, die in vielen verschiedenen (Wissens-)Bereichen verwendet werden und so den Informationsaustausch zwischen den Bereichen unterstützen. *Core-Ontologien* umfassen Konzepte, die in mehreren (ähnlichen) Bereichen zum Einsatz kommen. Fachspezifische Ontologien, die einen bestimmten Bereich detailliert beschreiben, werden als *Domain-Ontologien* bezeichnet [Obe06, S. 46f.], [Gua97, S.145].

¹ Ursprünglich stammt der Ontologiebegriff aus der theoretischen Philosophie und bezeichnet dort die Lehre vom Sein bzw. vom Seienden [Dud14a-ol]. Für weitere Informationen sei auf die Fachliteratur aus dem Bereich Philosophie verwiesen.

² vgl. [GRU93, S. 199]

³ vgl. [Bor97, S. 12]

⁴ Beispielsweise für den Datenaustausch zwischen Programmen, zur Strukturierung von Informationen oder zur Unterstützung der Kommunikation zwischen Menschen [PB06a, S. 12].

⁵ Axiome sind die Basis-Aussagen einer Ontologie, die immer wahr sind. Sie repräsentieren Wissen (z. B. „A ist Unterklasse von B“), dass nicht aus anderen Aussagen hergeleitet werden kann [Yu11, S. 159].

2.2 Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess erstreckt sich von der Geschäftsidee bis zum erfolgreichen Serienanlauf neuer Produkte. Während der Produktentstehung werden die drei Phasen Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung durchlaufen. Nach GAUSEMEIER handelt es sich beim Produktentstehungsprozess nicht um stringente Abfolge, sondern vielmehr um ein intensives Wechselspiel von Aufgaben. Im 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (siehe Bild 2-3) sind die Phasen als Zyklen dargestellt, die parallel durchlaufen werden können und ein iteratives Vorgehen ermöglichen.

Der Zyklus **strategische Produktplanung** unterteilt sich in die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung, wobei letzterer vorwiegend dem zweiten Zyklus zugeordnet ist. Im Rahmen der Potentialfindung werden zukünftige Erfolgspotentiale erkannt und daraus Handlungsoptionen ermittelt. Anschließend werden in der Produktfindung neue Produkt- und Dienstleistungsideen für das Unternehmen ausgewählt. Die Geschäftsplanung befasst sich mit der Erarbeitung einer Geschäftsstrategie, eines Geschäftsmodells, einer Produktstrategie sowie eines Geschäftsplans. Mit dem Geschäftsplan wird der Nachweis erbracht, dass für ein neues Produkt ein Return on Investment erzielt wird [GP14, S. 25f.].

Der zweite Zyklus, die **Produktentwicklung**, umfasst die Aufgabenbereiche Produktkonzipierung, Entwurf / Ausarbeitung und Produktintegration. Ergebnis der Produktkonzipierung ist die Prinziplösung bzw. prinzipielle Lösung des neuen Produkts. Es wird der Funktionsnachweis erbracht und eine gemeinsame Entwicklungsbasis für die beteiligten Fachdisziplinen geschaffen. Für mechatronische Produkte erfolgt der domänenspezifische Entwurf und die Ausarbeitung in den Fachdisziplinen Mechanik, Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik. Im Anschluss werden die einzelnen Ergebnisse während der Produktintegration zu einer Gesamtlösung kombiniert [GP14, S. 26].

Parallel zur Produktentwicklung startet die **Produktionssystementwicklung** als dritter Zyklus. Die Aufgabenbereiche sind die Produktionssystemkonzipierung, die Arbeitsplanung sowie die Produktionssystemintegration. Den Ausgangspunkt der Produktionssystemkonzipierung bildet die Prinziplösung des Produkts. So soll bereits frühzeitig zur Produktentwicklung das zugehörige Produktionssystem konzipiert werden. Analog zur Produktentwicklung wird zunächst eine prinzipielle Lösung des Produktionssystems erstellt. Die Ausarbeitung der Produktionssystemkonzeption erfolgt in der Arbeitsplanung. Es werden die Aspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Materialflussplanung und Arbeitsstättenplanung betrachtet. Die vier genannten Aspekte werden weiter detailliert und im letzten Schritt zum Produktionssystem integriert. Nach der Produktionssystemintegration liegt ein verifiziertes Produktionssystem vor, welches bereit für den Serienanlauf ist [GP14, S. 26].

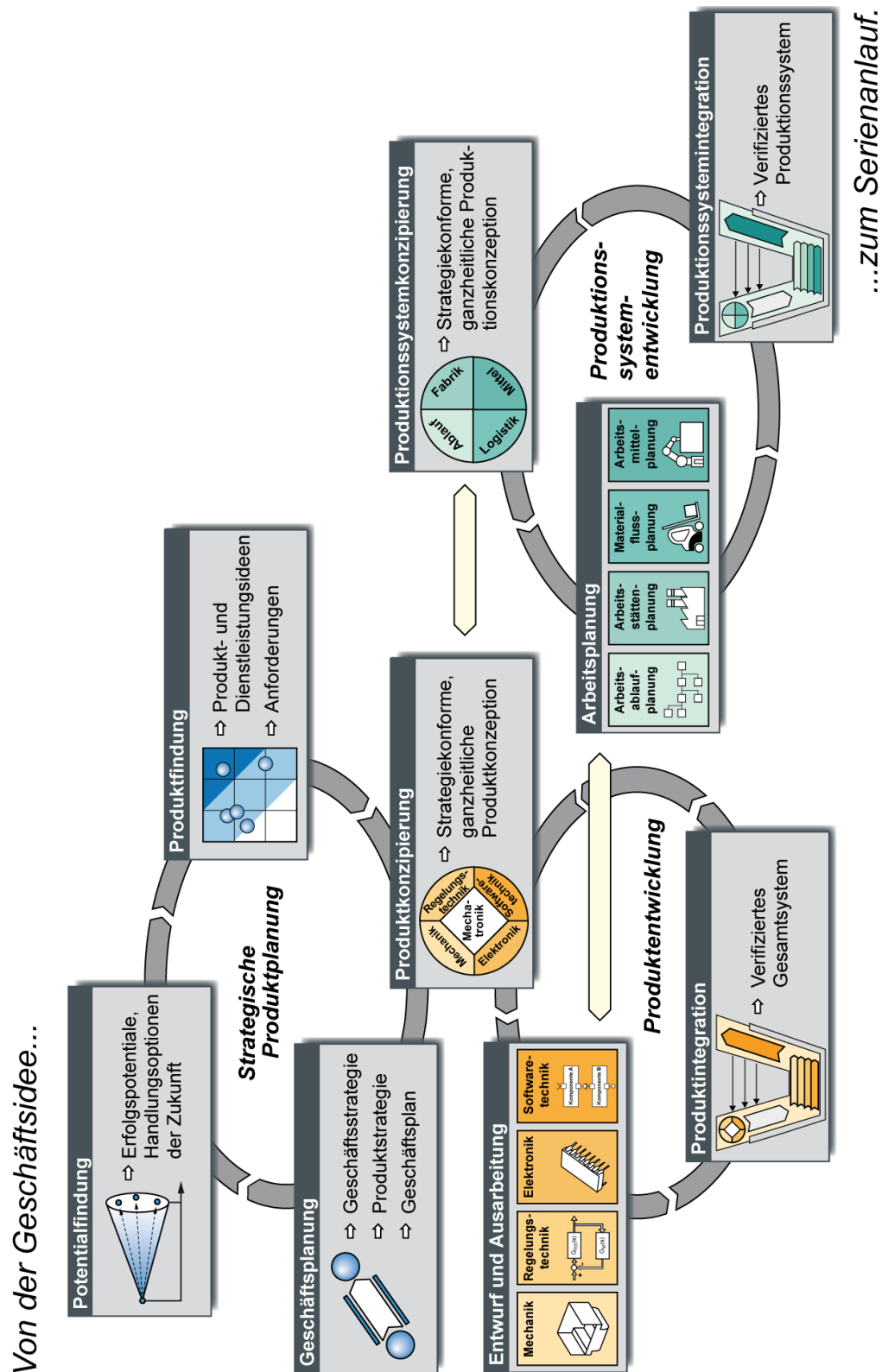


Bild 2-3: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung [GP14, S. 26]

Die Pfeile zwischen dem zweiten und dritten Zyklus heben die integrative und parallele Entwicklung zwischen Produkt und Produktionssystem hervor. Durch die enge Abstimmung...

mung zwischen beiden Zyklen wird sichergestellt, dass ein leistungsfähiges und kostengünstiges Erzeugnis hergestellt wird. Die Weichen werden bereits in der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem gestellt. So beeinflussen sich Produktkonzept und Produktionssystemkonzept gegenseitig. Die geforderten Produktmerkmale determinieren beispielsweise die Auswahl der einzusetzenden Fertigungstechnologien oder erfordern deren Neuentwicklung. Ebenso kann die Festlegung auf eine bestimmte Fertigungstechnologie Auswirkungen auf das Produktkonzept haben.

Fazit und Einordnung der Arbeit

Das 3-Zyklen Modell wird im Rahmen der Arbeit als Basismodell des Produktentstehungsprozesses verwendet. Im Fokus steht der dritte Zyklus und darin speziell der Aufgabenbereich der Produktionssystemkonzipierung. Mit den dort getroffenen Entscheidungen wird die weitere Ausarbeitung des Produktionssystems maßgeblich beeinflusst. Das zu entwickelnde Planungswerkzeug soll den Entwickler bei der Modellierung unterstützen, die Planungsinformationen rechnerintern ablegen und für Analysemethoden sowie die weitere Ausarbeitung aufbereiten. Maßgebliches Element ist eine Wissensbasis, in der Faktenwissen über Produktionsprozesse und Produktionsressourcen abgelegt wird und auf das der Entwickler im Zuge der Konzipierung zurückgreifen kann.

2.3 Produkt- und Produktionssystemkonzipierung

Für die Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme wurden am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn eine Entwicklungsmethodik sowie eine Spezifikationstechnik erarbeitet¹. Die grundlegenden Phasen der integrativen Konzipierung werden zunächst in Kapitel 2.3.1 erläutert. Im Anschluss werden in Kapitel 2.3.2 die Aspekte der Spezifikationstechnik vorgestellt. In Kapitel 2.3.3 wird auf Modellierungsregeln für die Anwendung der Spezifikationstechnik für die Produktionssystemkonzipierung eingegangen.

2.3.1 Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem

Für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystemen definieren GAUSEMEIER ET AL. ein generelles Vorgehen, bestehend aus sieben Phasen (siehe Bild 2-6). Die Phasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipierung auf Systemebene*, *Konzipierung auf Modulebene* und *Konzeptintegration* dienen der Konzipierung des Produkts und haben als Resultat die vollständige Prinziplösung des Produktes vorliegen.

¹ Für weitere Informationen sei auf die Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ [GFD+09], [GRS14] sowie der Verbundprojekte InZuMech [Gau10], VireS [GLL12] und ENTIME [GTS14] verwiesen. Die frühzeitige Konzipierung des Produktionssystems wurden zudem in [Mic06], [Zei08], [Rey11], [Nor12] und [Bra14] betrachtet.

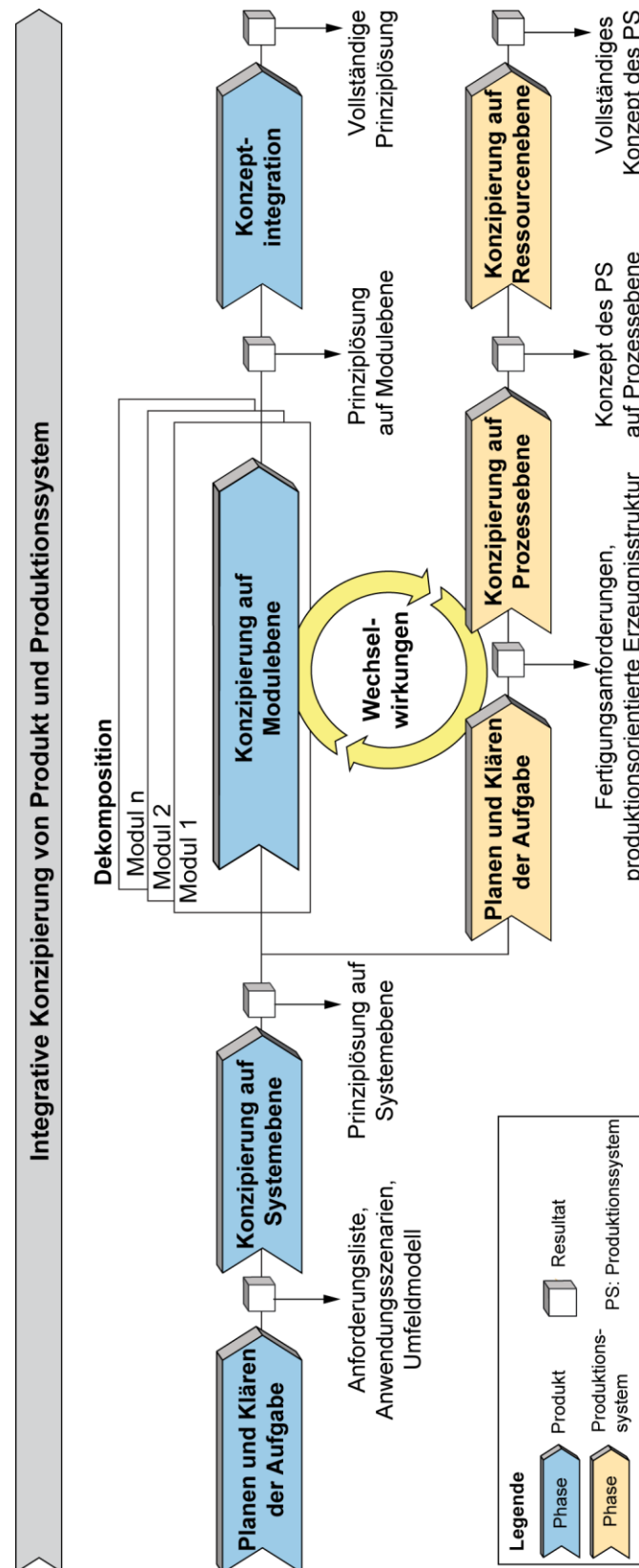


Bild 2-4: Generelles Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem [GDK+11, S. 755], [Nor12, S. 99]

Parallel zur *Konzipierung auf Modulebene* startet die Produktionssystemkonzipierung. Das Vorgehen umfasst das *Planen und Klären der Aufgabe*, die *Konzipierung auf Prozessebene* und die *Konzipierung auf Ressourcenebene*. Wie im Bild dargestellt, gibt es Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Phasen. Dies erfordert die intensive Abstimmung der beteiligten Entwickler der einzelnen Fachdomänen. Weiterhin ist das Vorgehensmodell nicht als stringente Abfolge von Aktivitäten zu verstehen. Je nach Komplexität der vorliegenden Entwicklungsaufgabe ergeben sich Rücksprünge und Iterations Schleifen [GDK+11, S. 774f.].

Zum Start der Produktkonzipierung in der Phase **Planen und Klären der Aufgabe** wird zunächst die Entwicklungsaufgabe abstrahiert, um den Kern der Entwicklungsaufgabe zu identifizieren. Es werden Randbedingungen sowie externe Einflüsse auf das System ermittelt und in einem Umfeldmodell dokumentiert. Spätere Betriebssituationen werden in Form von Anwendungsszenarien erfasst und die Systemzustände beschrieben. Daraus werden Anforderungen an das zu entwickelnde System abgeleitet. Resultat der ersten Phase ist die Anforderungsliste. Während der **Konzipierung auf Systemebene** wird eine fachdisziplinübergreifende Prinzipiellösung des zu entwickelnden Systems erarbeitet. Anhand der vorliegenden Informationen der ersten Phase werden die Hauptfunktionen abgeleitet, strukturiert und in Teilfunktionen untergliedert. Es folgt die Suche nach geeigneten Teillösungen zur Funktionserfüllung. Als Hilfsmittel für diese Tätigkeit kann beispielsweise ein morphologischer Kasten verwendet werden. Aus den möglichen Teillösungen werden konsistente Gesamtlösungen gebildet und die Lösungsalternativen gegenüber den Anforderungen bewertet. Die am besten geeignete Lösung wird ausgewählt und bildet die Prinzipiellösung auf Systemebene. Die Gesamtlösung wird mittels einer Wirkstruktur (logisches und funktionales Zusammenwirken der Teillösungen), der Systemgestalt und dem Systemverhalten spezifiziert. Zur weiteren Detaillierung des Systems erfolgt die **Konzipierung auf Modulebene**. Das Gesamtsystem wird in einzelne Module aufgeteilt, welche eigenständig konzipiert werden. Dies erfolgt entsprechend dem Vorgehen der beiden vorangegangenen Phasen. Somit werden die Prinzipiellösungen der einzelnen Module erstellt. Den Abschluss der Produktkonzipierung bildet die **Konzeptintegration**, bei der die einzelnen Prinzipiellösungen der Module zum Gesamtsystem integriert werden. Die Gesamtlösung wird schließlich unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Sie bildet die Grundlage für den fachdisziplinspezifischen Entwurf des Systems [GFD+09], [GD10].

Die Produktionssystemkonzipierung startet mit dem Vorliegen der Prinzipiellösung auf Systemebene. Analog zur Produktkonzipierung erfolgt zunächst das **Planen und Klären der Aufgaben**. Die Prinzipiellösung des Produkts wird aus Sicht der Produktionssystementwicklung analysiert und fertigungsrelevante Anordnungen abgeleitet. Diese umfassen beispielsweise Stückzahlen, Varianten, Abmessungen, Material und Gewicht. Aus der Wirkstruktur werden die zu fertigen Elemente (Bauteile, Baugruppen, Module) und deren Verbindungen (z. B. Bauzusammenhänge) identifiziert. Sobald diese Informationen erarbeitet wurden, startet die **Konzipierung auf Prozessebene**. In dieser Phase werden die

notwendigen Fertigungs- und Montagevorgänge bestimmt und deren Reihenfolgebeziehungen festgelegt. Weiterhin wird festgelegt, welche Elemente in Eigenfertigung hergestellt werden und welche als Zukaufteil von Lieferanten bezogen werden. Ergebnis ist eine erste Prozessfolge, die die eingesetzten Fertigungs- und Montagetechnologien, die Reihenfolge der Prozessschritte und die Zwischenzustände der Bauteile beschreibt. Die Umsetzung der geplanten Prozesse erfolgt durch die Produktionsressourcen (Maschinen, Werker, etc.). Diese werden während der **Konzipierung auf Ressourcenebene** spezifiziert und den Prozessen zugeordnet. Je Prozess ergeben sich meist unterschiedliche Möglichkeiten, wie dieser umgesetzt werden kann. Dies führt zu alternativen Gesamtlösungen für das Produktionssystem, aus denen eine für die weitere Konkretisierung im Zuge der Arbeitsplanung (siehe Kapitel 2.4.1) auszuwählen ist [BGN+09], [GDK+11], [NBG13].

Die **Wechselwirkungen**¹ zwischen der Produktkonzipierung und der Produktionssystemkonzipierung sind vielfältig und abhängig von der Komplexität des Produkts. Der Aufbau der einzelnen Module sowie die Gestalt der Bauteile beeinflusst massiv die Konzipierung auf Prozessebene, wenn die Fertigungs- oder Montagetechnologien ausgewählt werden. Die Festlegung auf eine bestimmte Technologie kann wiederum Auswirkungen auf einzelne Bauteile oder Baugruppe haben, wenn diese z. B. nicht in der erforderlichen Art und Weise montiert werden können. Dies zieht Anpassungen am Produkt nach sich, wodurch sich u.U. andere Anforderungen an das Produktionssystem ergeben. Diese Zusammenhänge erfordern die frühzeitige und kontinuierliche Abstimmung zwischen beteiligten Entwicklern [NWD+08], [GDK+11].

2.3.2 Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption

Zur Unterstützung der Entwickler während der Konzipierung neuer Systeme wurden am Lehrstuhl für Produktentstehung die Spezifikationstechnik CONSENS entwickelt. CONSENS steht für „CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems“ und ermöglicht eine ganzheitliche und fachdisziplinübergreifende Beschreibung der Prinzipiellösung eines mechatronischen Systems sowie des zugehörigen Produktionssystems. Das Produkt wird mittels der sieben Aspekte *Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten* und *Gestalt* spezifiziert. Auf Seiten des Produktionssystems werden neben den *Anforderungen* die Aspekte *Prozesse, Ressourcen* und *Gestalt* verwendet (Bild 2-5). Jeder Aspekt wird rechnerintern durch ein Partialmodell repräsentiert. Zwischen den Partialmodellen bestehen Beziehungen. Die Prinzipiellösung besteht somit aus einem kohärenten System von Partialmodellen [GBD+12, S. 89ff.].

¹ NYHUIS ET AL. sprechen von Interdependenzen zwischen den unterschiedlichen Planungsbereichen Fabrik-, Technologie- und Produktplanung.

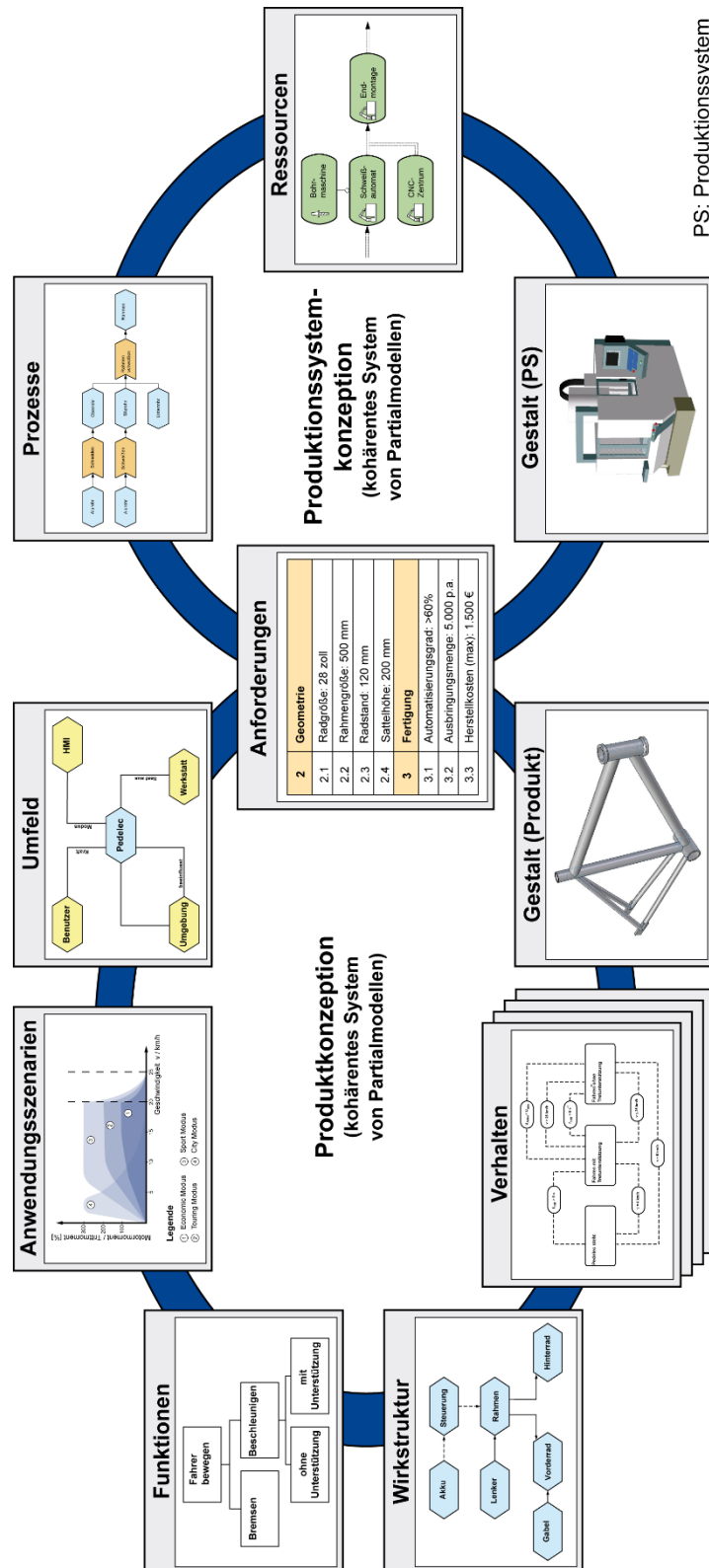


Bild 2-5: Partialmodelle zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinzipiellung eines mechatronischen Systems und des zugehörigen Produktionssystems [GBD+12, S. 90]

Die Reihenfolge in der die einzelnen Aspekte im Zuge der Konzipierung erstellt werden, wurde bereits im vorherigen Abschnitt kurz erwähnt. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Aspekte in einem engen Wechselspiel erarbeitet werden. Nachfolgend werden die einzelnen Aspekte kurz vorgestellt¹.

Gemeinsame Partialmodelle für Produkt und Produktionssystem

Anforderungen: Die Anforderungen werden in einer Anforderungsliste strukturiert und dienen zum Abgleich mit der entwickelten Prinziplösung für Produkt bzw. Produktionssystem. Sie definieren somit die Vorgaben für die Konzipierung. Es wird zwischen Festforderungen und Wunschforderungen unterschieden, die über qualitative oder quantitative Angaben konkretisiert werden [GFD+09, S. 211f.], [GBD+12, S. 94]. Ein Hilfsmittel zum Aufstellen von Anforderungslisten sind Checklisten, wie sie beispielsweise in [PBF+07] zu finden sind.

Partialmodelle der Produktkonzipierung

Umfeld: Das zu entwickelnde System wird zunächst als Black Box angesehen und die Einflüsse auf die Elemente im Umfeld des Systems betrachtet. Umfeldelemente sind beispielsweise der Benutzer, die Energieversorgung oder der Untergrund. Es werden die Beziehungen (z. B. Benutzereingaben, Versorgungsleistung, Vibrationen) zwischen den Umfeldelementen und dem System spezifiziert [GFD+09, S. 210], [GBD+12, S. 91f.].

Anwendungsszenarien: Anwendungsszenarien beschreiben die geplanten Betriebssituationen des Systems im späteren Einsatz. Für jede Situation wird das Verhalten des Systems festgelegt, beispielsweise den Wiederanlauf nach einer Not-Aus-Situation. Die Anwendungsszenarien bilden die Grundlage für die Ermittlung von Anforderungen und die Ausarbeitung des Verhaltens [GFD+09, S. 210f.], [GBD+12, S. 92f.].

Funktionen: Jede Funktion beschreibt eine Aufgabe die das System erfüllen muss. Die Funktionsbeschreibung erfolgt zunächst lösungsneutral, nur durch die Angabe des allgemeinen und gewollten Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen [PBF+07, S. 215]. Die notwendigen Systemfunktionen werden in Funktionshierarchie strukturiert und in Teilfunktionen gegliedert. Für die Teilfunktionen werden im Anschluss geeignete Lösungen gesucht [GFD+09, S. 212f.], [GBD+12, S. 94f.].

Wirkstruktur: In der Wirkstruktur werden die ausgewählten Lösungen zur Funktionserfüllung abgebildet und die Beziehungen zwischen ihnen beschrieben. Jede Teillösung wird als ein Systemelement innerhalb der Wirkstruktur modelliert. Je nach Konkretisierungsgrad handelt es sich um ein abstraktes Wirkprinzip, ein Modul, eine Baugruppe oder eine Software-Komponente. Mittels Schnittstellen (Ports) werden die Systemelemente über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse miteinander verbunden. Die Wirkstruktur ist

¹ Weitere Informationen zur Konzipierung mechatronischer Systeme finden sich in [GFD+09], [GD10] und [GBD+12].

der Kern der Prinziplösung eines mechatronischen Produkts und stellt den Ausgangspunkt für die Aspekte Gestalt, Verhalten und die Konzipierung des Produktionssystems dar [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 95ff.].

Gestalt (Produkt): Ausgehend von der Wirkstruktur und den vorliegenden Gestaltinformationen der ausgewählten Elemente (Bauteile, Baugruppen, etc.) wird die 3D-Gestalt des Produkts festgelegt. Mittels eines CAD-Systems¹ werden die Elemente modelliert, angeordnet und positioniert. Es werden Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte spezifiziert [GFD+09, S. 213], [GBD+12, S. 96ff.].

Verhalten: Das Systemverhalten wird für die Partialmodelle Verhalten-Zustände und Verhalten-Aktivitäten spezifiziert. Im Zustandsmodell werden die Systemzustände und die Zustandsübergänge erfasst. Die Aktivitäten beschreiben die Ablaufprozesse innerhalb eines Systemzustands. Diese Informationen dienen im weiteren Verlauf der Entwicklung als Ausgangspunkt für den Entwurf der Software- und Regelungstechnik. Weitere Systemverhalten, z. B. Kinematik oder Dynamik, können bei Bedarf ergänzt werden [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 98f.].

Partialmodelle der Produktionssystemkonzipierung

Prozesse: Dieses Partialmodell beschreibt den geplanten Ablauf der Produktion zunächst unabhängig von den verwendeten Betriebsmitteln als eine Folge von Arbeitsvorgängen (Prozesse). Im Verlauf der Entwicklung werden die Prozesse immer weiter ausgearbeitet. Fertigungsprozesse werden zunächst über eine Fertigungsfunktion beschrieben, die über die Auswahl eines Fertigungsverfahrens schließlich zu einer Fertigungstechnologie konkretisiert wird (vgl. [DIN8580]). Ähnlich verhält es sich mit Montage- oder Transportprozessen [GBR10, S. 717]. Die Eingangs- und Ausgangsobjekte der Prozesse werden als Materialelemente bezeichnet. Bei der integrativen Entwicklung ergeben sie sich aus den Systemelementen des Produktes und den notwendigen Zwischenzuständen [GBR10, S. 717f.], [GBD+12, S. 100ff.]. Materialelemente umfassen alle Rohstoffe, Zulieferteile, Handelswaren sowie Roh-, Halb- und Fertigteile [GK06, Kap.2 - S. 2]. Prozesse und Materialelemente werden über Parameter (Prozesszeit, Gewicht, Material, etc.) näher beschrieben. Das Partialmodell Prozesse ist die Grundlage für die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung. Weiterhin ist die Prozessfolge der Ausgangspunkt für die Arbeitsablaufplanung (vgl. Kapitel 2.4.2.2).

Ressourcen: Die Umsetzung der unterschiedlichen Produktionsprozesse erfolgt durch Ressourcen. Jedem Prozess wird eine Ressource zugeordnet. Dabei kann eine Ressource, beispielsweise ein CNC-Dreh-Fräs-Zentrum, auch mehrere Fertigungsprozesse durchführen. Andere Ressourcen, wie spezialisierte Montageautomaten, können nur ganz be-

¹ CAD : Computer-Aided Design

stimmte Operationen umsetzen. Weiterhin werden die benötigten Bearbeitungswerkzeuge, Vorrichtungen, Hilfsmittel und Mitarbeiter im Partialmodell spezifiziert und den Bearbeitungsmaschinen zugeordnet. Jeder Ressource werden zusätzliche Parameter zugeordnet (Rüstzeiten, Layoutdaten, Pausenzeiten, Qualifikationen, etc.). Aus der Prozessfolge ergibt sich der Materialfluss zwischen den Ressourcen. Die Informationen dieses Partialmodells sind Ausgangspunkt für die weitere Ausarbeitung der Arbeitsmittel- und Materialflussplanung (vgl. Kapitel 2.4.2.3) [GBR10, S. 718f.], [GBD+12, S. 102f.].

Gestalt (Produktionssystem): Jede Ressource benötigt einen gewissen Platzbedarf, der bei der Planung des betrachteten Produktionsbereichs berücksichtigt werden muss. So werden analog zur Produktkonzipierung bereits frühzeitig erste Gestaltinformationen des Produktionssystems in Form von idealisierten Layouts, 2D-Skizzen oder 3D-CAD-Modellen erstellt. Im Zuge der Arbeitsstätten- und Materialflussplanung (vgl. Kapitel 2.4.2.3) werden diese Informationen verwendet [GBR10, S. 719], [GBD+12, S. 103].

Die Zusammenhänge der Partialmodelle sowie der zeitlichen Ablauf bei der Erstellung während der integrativen Produktionssystemkonzipierung sind in Bild 2-6 dargestellt. Die maßgeblichen Aspekte der Produktkonzipierung sind die Anforderungen, die Wirkstruktur und die Gestalt (Produkt). Aus diesen drei Partialmodellen werden die produktionsrelevanten Informationen ermittelt und die Baustruktur [Nor12] bzw. die montageorientierte Erzeugnisgliederung [Bra14] erstellt. Im nächsten Schritt wird die Prozessfolge spezifiziert, auf deren Basis die Ressourcenstruktur erarbeitet wird. Den Abschluss bildet die Festlegung der Produktionssystemgestalt.

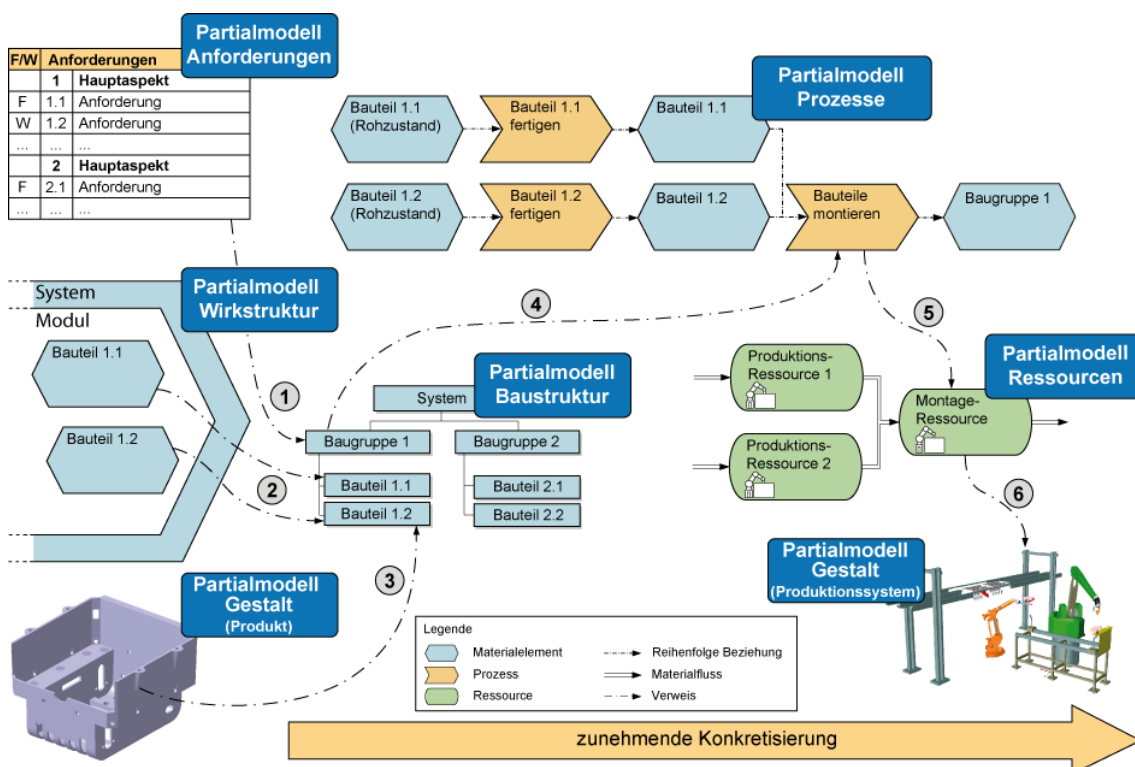


Bild 2-6: Genereller Ablauf der Produktionssystemkonzipierung nach [GBR10, S. 716]

2.3.3 Modellierungsregeln für die Produktionssystemkonzipierung

Für die Anwendung der Spezifikationstechnik zur Konzipierung des Produktionssystems definiert REYES-PEREZ einige Modellierungsregeln [Rey11, S. 91ff.]. Die Regeln umfassen generelle Vorgaben für die graphische Modellierung der Partialmodelle Prozesse und Ressourcen. Dazu zählen die zu verwendenden Elemente und Beziehungen sowie der grundlegende Aufbau der Modelle. Weiterhin werden das Modellieren mit ausgeblenden Elementen, die Verweise zwischen Elementen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen und die Modellierung von Schleifen im Materialfluss behandelt. Anhand der Modellierungsregeln ergeben sich für den Entwickler einige Einschränkungen, die er bei der Modellierung des Produktionssystemkonzepts berücksichtigen muss. Sie sind jedoch nicht so restriktiv, dass die Planungsinhalte eindeutig abgebildet werden können. Beispielsweise bestehen keine Vorgaben, wie der Materialfluss zwischen einzelnen Ressourcen spezifiziert oder wie Transportsysteme zur Umsetzung des Materialflusses modelliert werden. So könnten gleiche Sachverhalte von unterschiedlichen Personen u.U. unterschiedlich modelliert und verstanden werden. Dies ist jedoch ein generelles Problem von Modellierungssprachen (siehe Kapitel 2.1.3), deren Regeln nicht immer ausreichend sind.

BECKER ET AL. definieren daher weitere Empfehlungen und Konventionen, die bei der Modellerstellung zu beachten sind. Sie formulieren diese in den sechs Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung:

- Der **Grundsatz der Richtigkeit** bezieht sich auf die syntaktische und semantische Richtigkeit des Modells. Syntaktisch richtig ist ein Modell, wenn alle Regeln der Modellierungssprache eingehalten wurden. Eine semantische Richtigkeit ist gegeben, wenn verschiedene Betrachter des Modells eine Einigung über die Bedeutung der Modellinhalte erzielen. Die semantische Richtigkeit setzt voraus, dass die Betrachter das Themengebiet kennen und an einer Einigung interessiert sind [BPV12, S. 32f.].
- Mit dem **Grundsatz der Relevanz** werden die modellierten Sachverhalte adressiert. Sie müssen sich an dem angestrebten Modellierungszweck orientieren. Es sind nur Dinge abzubilden, die für den Zweck notwendig sind und für die es in der Realwelt ein entsprechendes Pendant gibt [BPV12, S. 33f.].
- Der **Grundsatz der Wirtschaftlichkeit** fordert einen minimalen Modellierungsaufwand hinsichtlich der benötigten Detaillierungsstufe. Jede Verfeinerung ist mit einem Mehraufwand und Kosten verbunden. Diese müssen dem zusätzlichen Nutzen gleichkommen. Allgemeingültige Referenzmodelle können den Aufwand reduzieren. Sie werden für den spezifischen Fall konfiguriert und angepasst [BPV12, S. 34].
- Leichte Lesbarkeit, Anschaulichkeit und Verständlichkeit sind die Kernpunkte des **Grundsatzes der Klarheit**. Durch eine geeignete Hierarchisierung und Layoutgestaltung sowie das Filtern von Elementen, soll die Lesbarkeit eines Modells erhöht werden. Weitere Aspekte sind die klare Benennung von Modellelementen und die gleiche Strukturierung gleicher Abläufe [BPV12, S. 35f.].

- Zwei Arten der Vergleichbarkeit werden mit dem **Grundsatz der Vergleichbarkeit** adressiert. Zum einen müssen gleiche Sachverhalte, die mit einer Modellierungssprache abgebildet wurden, immer gleich modelliert sein. Nur so sind zwei Modelle vergleichbar. Zum anderen müssen Modelle, die mit unterschiedlichen Modellierungssprachen erstellt werden und gleiche Inhalte abbilden, ebenfalls vergleichbar sein. Dazu müssen sich die Modelle ineinander überführen lassen [BPV12, S. 36].
- Der **Grundsatz des systematischen Aufbaus** bezieht sich auf die Konsistenz eines Gesamtmodells, welches aus unterschiedlichen Sichten aufgebaut ist. Es ist sicherzustellen, dass Elemente die in mehreren Sichten verwendet werden, entsprechend dokumentiert sind [BPV12, S. 36].

2.3.4 Fazit und Einordnung der Arbeit

Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem erfordert eine frühzeitige Abstimmung zwischen den beteiligten Entwicklern und Abteilungen. Klassischerweise sind dies die Konstruktions-/Entwicklungsabteilung auf der Produktseite sowie die Arbeitsvorbereitung¹ auf der Produktionssystemseite. Das in Kapitel 2.3.1 beschriebene Vorgehen für die integrative Entwicklung liefert die grundlegenden Phasen für die Produkt- und Produktionssystemkonzipierung. Die Spezifikationstechnik CONSENS ist speziell für diese frühzeitigen Entwicklungsphasen erarbeitet worden. Sie bietet den Entwicklern mit der graphischen Repräsentation der unterschiedlichen Aspekte eine Möglichkeit, sich über das System auszutauschen. Dies fördert die Kommunikation und Koordination aller beteiligten Fachdisziplinen. Während die Produktkonzipierung mechatronische Systeme fokussiert, sind die Phasen der Produktionssystemkonzipierung prinzipiell unabhängig vom herzustellenden Produkttyp. Die vorliegende Arbeit ist der Produktionssystemkonzipierung im dritten Zyklus des 3-Zyklen-Modells zugeordnet. Das Planungswerkzeug soll den Produktionssystementwickler bei der Erstellung des Produktionssystemkonzepts mittels CONSENS unterstützen. Damit wird die Suche und Auswahl geeigneter Elemente für die Modellierung der einzelnen Produktionssystemaspekte sowie die rechnerinterne Abbildung der Planungsinformationen unterstützt.

2.4 Ausarbeitung von Produktionssystemen

Die vorgestellte Produktionssystemkonzipierung bildet nur den Startpunkt der Entwicklung bzw. Planung neuer Produktionssysteme. Die weitere Ausarbeitung des Systems umfasst nach GAUSEMEIER im Wesentlichen die Arbeitsplanung, speziell die Aufgabebereiche Arbeitsablauf-, Arbeitsmittel-, Arbeitsstätten- und Materialflussplanung. In Kapitel 2.4.1 wird zunächst ein allgemeiner Leitfaden für die Planung und Einführung von

¹ In der Arbeitsvorbereitung laufen die produktspezifischen Informationen (z. B. Konstruktionsunterlagen) und die kundenspezifische Auftragsabwicklung zusammen [Eve97].

Produktionssystemen vorgestellt. Dieser zeigt grob, welche weiteren Schritte bis zum Serienanlauf notwendig sind. Auf die erwähnten Aufgabenbereiche der Arbeitsplanung wird in Kapitel 2.4.2 eingegangen. Anschließend wird in Kapitel 2.4.3 das generelle Vorgehen bei der Fabrikplanung beschrieben.

2.4.1 Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme

Einen verfahrens- und anlagenneutralen Leitfaden für die Planung von Produktionssystemen liefert die *Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme*. Die Planungssystematik hat die Zielsetzung dem Planer eine praxisnahe Hilfestellung zu geben und kann unabhängig von der Systemgröße eingesetzt werden. Es erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung des Produktionssystems, die die Bereiche Technik, Organisation, Mensch und Information umfasst. Schwerpunkte der Systematik sind die Erarbeitung sinnvoller Prinziplösungen, eine gute Transparenz des Planungsablaufs, die Bereitstellung der Planungsergebnisse, die Reproduzierbarkeit sowie die Verminderung des Zeit- und Kostenaufwands. Zur Erreichung dieser Punkte baut die Systematik auf einem 6-stufigen Vorgehen auf, dass in Bild 2-7 dargestellt ist. Die einzelnen Phasen werden iterativ durchlaufen und Planungsergebnisse bei Bedarf in die vorangegebenen Phasen zurückgeführt. Wesentlicher Punkt beim Durchführen der Planung ist die durchgängige und umfassende Dokumentation der Ergebnisse, um diese in nachfolgenden Planungsprojekten wiederzuverwenden. Nachfolgend werden die einzelnen Phasen kurz erläutert [REF90].

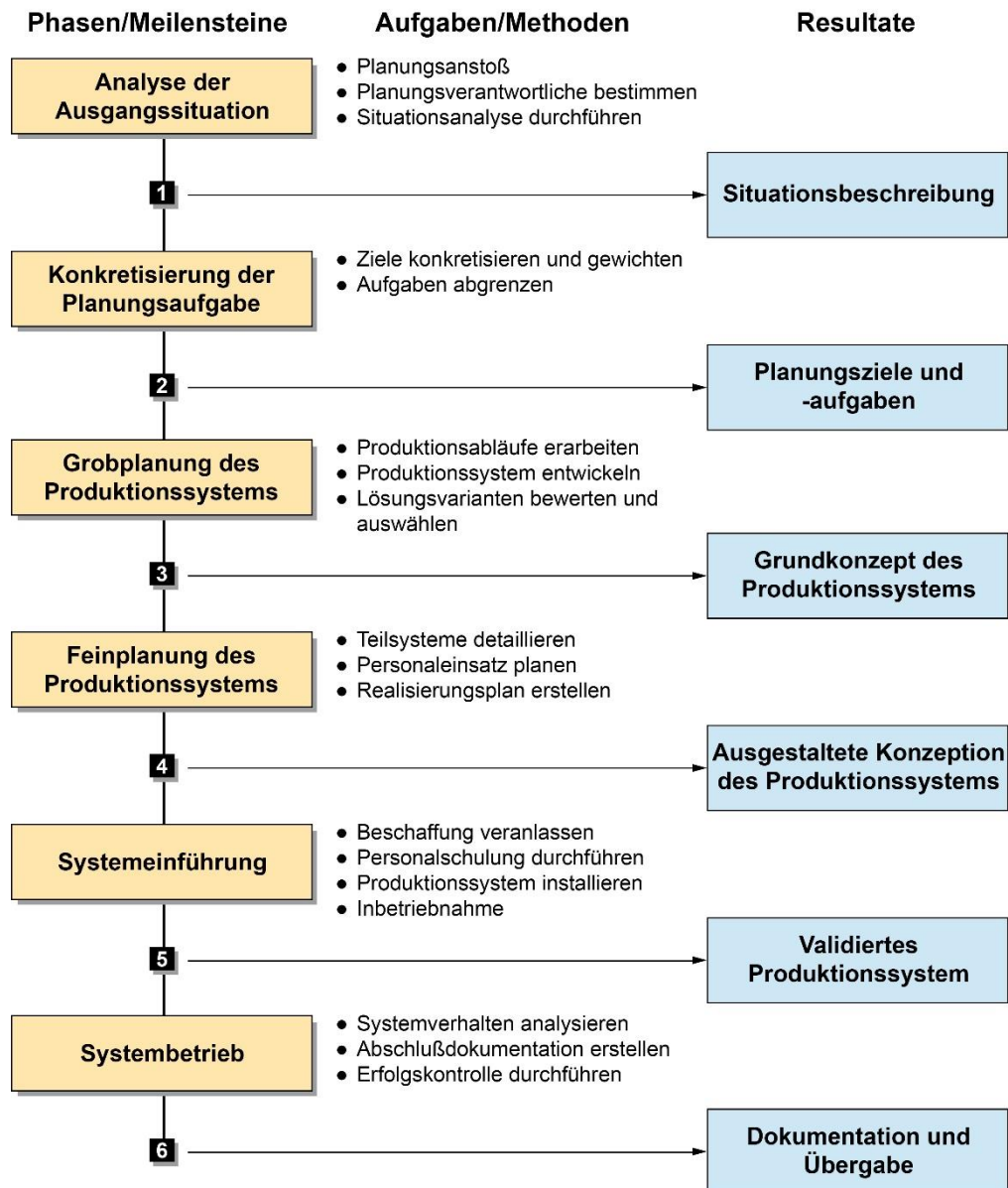


Bild 2-7: Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme nach [REF90]

Analyse der Ausgangssituation: Zu Beginn wird das Projektteam festgelegt, welches auf Basis der vorliegenden Planungsaufgabe (z. B. Senkung der Herstellkosten, Erhöhen der Kapazität) eine Situationsanalyse durchführt und die Datengrundlage absichert. Ergebnis ist eine Beschreibung der Ist-Situation [REF90, S. 91ff.].

Konkretisierung der Planungsaufgabe: In dieser Phase werden unter Berücksichtigung vorgegebener Grundanforderungen die Planungsziele und Planungsaufgaben festgelegt. Aus dem Gesamtziel sind die einzelnen Teilziele abzuleiten, die sich in organisatorische Ziele (z. B. besserer Materialfluss), technische Ziele (z. B. Fertigungssicherheit), Kostenziele (z. B. Senkung der Herstellkosten) und personelle Ziele (z. B. Akzeptanz der Pla-

nung) aufteilen. Die Ziele werden gewichtet und soweit möglich quantifiziert. Den Abschluss der Phase bildet die Festlegung der Systemgrenze und damit die Abgrenzung des Aufgabenbereiches [REF90, S. 98ff.].

Grobplanung des Produktionssystems: Die Grobplanung erfolgt in einem stufenweisen Vorgehen, in dem zunächst der Produktionsablauf erarbeitet wird. Dieser setzt sich aus in sich abgeschlossen Teilvorgängen zusammen, für die im nächsten Schritt die notwendigen Arbeitsstationen bestimmt werden. Aus der Anzahl der Stationen werden Anforderungen an die Materialfluss- und Informationsflusseinrichtungen abgeleitet. Abschließend erfolgt eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Alternativen und die Auswahl der bestmöglichen Lösung [REF90, S. 104ff.].

Feinplanung des Produktionssystems: Wie die Grobplanung erfolgt auch die Feinplanung stufenweise. Anhand des ausgewählten Grundkonzepts werden die technologischen Anforderungen bestimmt und die Teilsysteme des Produktionssystems detailliert. Es wird beispielsweise die genaue Bereitstellung von Werkstücken, Werkzeugen, etc. an den manuellen und automatisierten Arbeitsplätzen geplant und der Informationsfluss strukturiert. Die weiteren Schritte dieser Phase sind die Planung des Personaleinsatzes und das Erstellen eines Realisierungsplans für die Systemeinführung [REF90, S. 109ff.].

Systemeinführung: In dieser Phase werden die Betriebsmittel beschafft und installiert. Entsprechend der geforderten Mitarbeiter-Qualifikationen werden die Schulungsaktivitäten festgelegt. Sobald alle Vorbereitungen für den Betrieb des Produktionssystems abgeschlossen sind wird der Testbetrieb gestartet. Die Produktionsmenge wird kontinuierlich gesteigert und auftretende Fehler und Schwachstellen beseitigt [REF90, S. 111ff.].

Systembetrieb: Nach der erfolgreichen Testphase erfolgen die Übergabe und Dokumentation. Während des regulären Systembetriebs sind kontinuierlich die Betriebsdaten zu erfassen. Mit ihnen lässt sich überprüfen, wie gut die gestellten Anforderungen erfüllt wurden [REF90, S. 114ff.].

2.4.2 Aufgaben der Arbeitsplanung

Die Arbeitsplanung lässt sich anhand des Planungshorizonts der einzelnen Aufgaben in die Tätigkeitsbereiche Arbeitsablaufplanung und Arbeitssystemplanung gliedern [Eve97, S. 6f.]. Bild 2-8 zeigt diese Gliederung und die Einordnung der vier Aufgabenbereiche nach dem 3-Zyklen-Modell. Die Planungsergebnisse der einzelnen Bereiche beeinflussen sich gegenseitig, so dass eine enge Abstimmung erfolgen muss. Die Arbeitsablaufplanung (Kapitel 2.4.2.2) hat einen kurzfristigen Planungshorizont mit einer produkt- oder auftragsbezogenen Sichtweise. Im Zuge der Produktenwicklung wird daher auch häufig von Prozessgestaltung gesprochen. Ziel ist die wirtschaftliche Produktion von Produkten. Zusätzlich werden Teile der prozessbezogenen Arbeitsmittelplanung (eingesetzte Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen) während der Arbeitsablaufplanung durchgeführt. Demgegenüber steht die Arbeitssystemplanung (Kapitel 2.4.2.3) mit der

produktionsbezogenen Sichtweise und dem Fokus auf die wirtschaftliche Auslegung der Produktion. Die umfasst die Planung von Arbeitsstätten, Materialfluss und Arbeitsmittel (Maschinenpark und Anordnung).

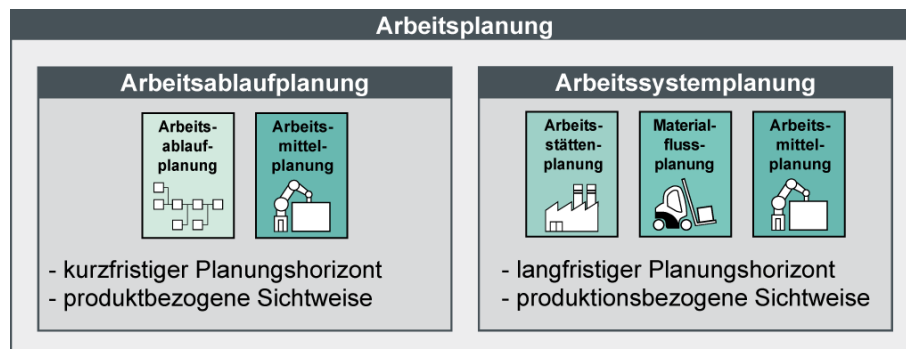


Bild 2-8: Unterteilung der Arbeitsplanung und Einordnung der Aufgaben

2.4.2.1 Planungsraum der Arbeitsplanung

Zur Systematisierung des Entwicklungsgeschehens führt GAUSEMEIER das Modell des Entwurfsraums ein (Bild 2-9). Dieser wird durch die drei Dimensionen *Abstraktion – Konkretisierung*, *Planungsebenen* sowie *Systemsicht* aufgespannt und zeigt den prinzipiellen Verlauf der Entwicklungs-/Planungsschritte. Die Planungsebenen bilden die Detaillierungsstufen im Rahmen der Produktionssystementwicklung und reichen von der gesamten Branchenwertschöpfungskette (Generalisierung) bis hin zum Arbeitsmittel (Detaillierung). Die Zwischenebenen umfassen den Produktionsbetrieb, die darin vorhandenen Produktionssysteme und die einzelnen Arbeitsplätze, die wiederum die Arbeitsmittel verwenden. Jede Ebene wird über die Sichten Struktur, Verhalten und Gestalt unterteilt. In den Planungsraum lassen sich die verwendeten Methoden, Werkzeuge und Spezifikationstechniken der Digitalen Fabrik/Virtuellen Produktion einordnen [GP14].

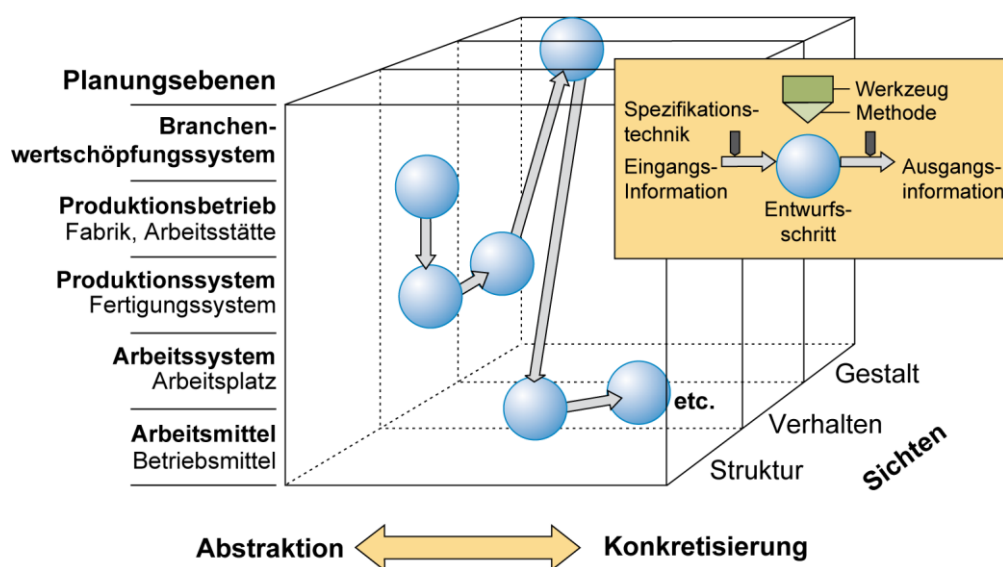


Bild 2-9: Planungsraum der Arbeitsplanung/Fertigungsplanung [GP14, S. 28]

2.4.2.2 Arbeitsablaufplanung / Prozessgestaltung

Die Arbeitsablaufplanung legt fest, in welcher Reihenfolge die einzelnen Produktionsschritte durchgeführt werden und welche Betriebsmittel für den Produktionsprozess zu verwenden sind. Nach EVERSHEIM [Eve97] lassen sich die Aufgaben in vier parallele Stränge unterteilen und in eine zeitliche Reihenfolge bringen (vgl. Bild 2-10).

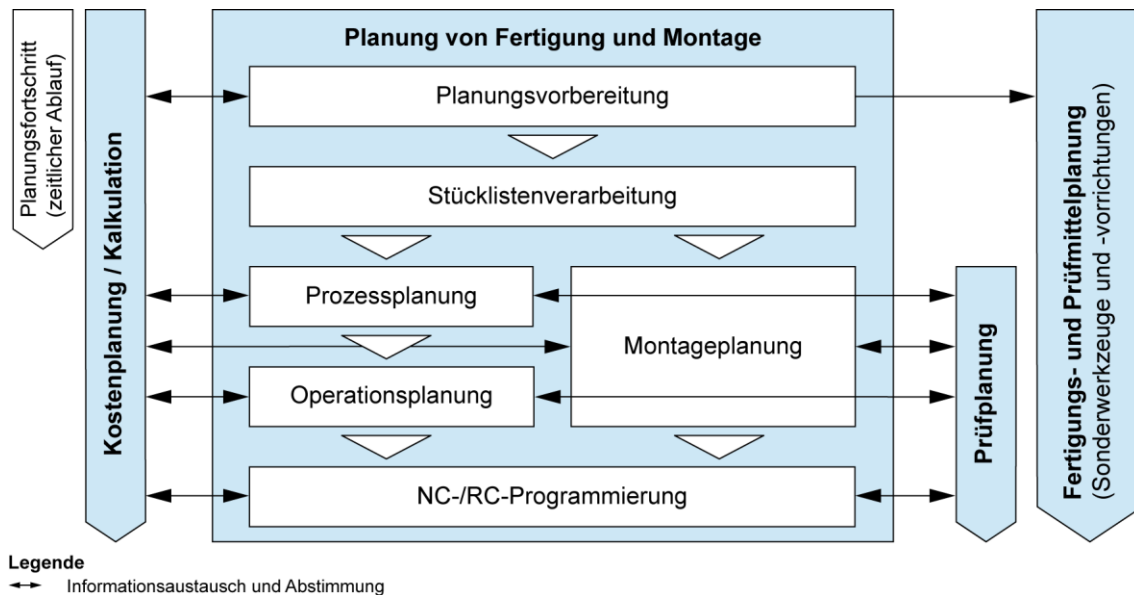


Bild 2-10: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten der Arbeitsablaufplanung [Eve97, S. 18]

Während der **Planungsvorbereitung** werden zunächst alle erforderlichen Informationen für die weitere Arbeitsablaufplanung gesammelt und geprüft. Hierbei handelt es sich vorwiegend um die Produktinformationen die seitens der Konstruktion-/ Entwicklungsabteilung im Rahmen der Produktentwicklung erstellt werden. Für die herzustellenden Produkte werden Konstruktionszeichnungen sowie Stücklisten angefertigt. In der Stückliste sind alle zur Herstellung benötigten Baugruppen und Einzelteile aufgeführt und deren Menge erfasst. Sollte es sich um eine Änderungs-, Varianten- oder Anpassungskonstruktion handeln, werden die bereits vorliegenden Arbeitsplanunterlagen beschafft. Zusätzlich werden mögliche Engpässe identifiziert und bei Bedarf neue Fertigungs- und Prüfmittel beauftragt [Eve97, S. 20].

In der **Stücklistenverarbeitung** werden die Stücklisten der Konstruktion hinsichtlich fertigungs- und montagegerechter Ausführung ergänzt. So entstehen u.a. Fertigungs-, Mengenübersichts- oder Strukturstücklisten, die auf die Bedürfnisse der Produktion zugeschnitten sind. Anhand dieser Stücklisten werden die weiteren Fertigungs- und Montagevorgänge, Rohstoffe, Halbzeuge und Zukaufteile geplant [Eve97, S. 21f.], [PBF+07, S. 560f.].

Die **Prozessplanung** legt die notwendigen Bearbeitungsvorgänge (Prozess) der Fertigung sowie deren Reihenfolge fest. Jedem Prozess wird eine Maschinengruppe bzw. ein

Arbeitsplatz zugewiesen. Weiterhin werden die benötigten Rohteile nach technologischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Kriterien ermittelt. Für jeden Prozess werden zudem Vorgabezeiten¹ festgelegt. Die weitere Detaillierung der Bearbeitung erfolgt in der **Operationsplanung**. Jeder Prozess wird in einzelne Bearbeitungsoperationen aufgeteilt, mit denen das Rohteil in das gewünschte Werkstück überführt wird. Jeder Bearbeitungsoperation werden z. B. spezifische Werkzeuge und Vorrichtungen zugeordnet und die Schnittstrategie bestimmt. Mit diesen Informationen kann im Anschluss die NC-/RC-Programmierung² durchgeführt werden [Eve97, S. 23ff.].

Parallel zur Planung der Fertigungsprozesse erfolgt die **Montageplanung**. Basierend auf den Stücklisten wird ein Montageplan erstellt, der die Reihenfolge der Montageoperationen aufzeigt. Das geforderte Erzeugnis wird hierzu in die Einzelteile und Baugruppen strukturiert. Hilfsmittel zur Montageplanung sind beispielsweise die Netzplantechnik bzw. der Vorranggraph [Eve97, S. 57ff.].

Nach der Planung der Fertigung- und Montageprozesse werden notwendige Steuerungsprogramme für Werkzeugmaschinen und Robotersysteme erstellt (**NC- und RC-Programmierung**). Für einen Großteil der Produktionssysteme hat sich der Einsatz von CAD/CAM³-Systemen in der Industrie etabliert. So lassen sich für NC-gesteuerte Werkzeugmaschinen und für Robotersysteme die benötigten Steuerungsprogramme am Computer erstellen. Durch den Einsatz von Simulationsprogrammen werden beispielsweise Schnittstrategien optimiert oder Kollisionsprüfungen durchgeführt [Eve97, S. 78ff.].

Begleitend zur Planung der Fertigung und Montage erfolgen die drei weiteren Stränge der Arbeitsablaufplanung. Die **Kostenplanung und Kalkulation** vergleicht alternative Prozessfolgen, um die wirtschaftliche Herstellung der Erzeugnisse sicherzustellen. Neben einer wirtschaftlichen Bewertung der Alternativen werden auch Entscheidungen über Eigenfertigung und Fremdvergabe getroffen [Eve97, S. 89ff.]. Zur Sicherstellung der geforderten Qualität sind neben den Fertigungs- und Montageprozessen zusätzliche Prüfprozesse durchzuführen. Die Festlegung dieser Prozesse sowie der zu verwendenden Prüfmittel ist Aufgabe der **Prüfplanung**. Geeignete Prüfmerkmale werden identifiziert, Prüfintervalle und Prüfmethoden festgelegt und dokumentiert [Eve97, S. 61ff.]. Die Beschaffung von auftrags- oder produktbezogenen Betriebsmitteln ist Bestandteil der **Fertigungs- und Prüfmittelplanung**. Sie wird erforderlich, wenn die benötigten Betriebsmittel nicht verfügbar sind und durch den Betriebsmittelbau zunächst angefertigt oder beschafft werden müssen [Eve97, S. 69ff.].

¹ Darunter sind SOLL-Vorgaben für Menschen und Betriebsmittel zu verstehen, die sich aus Grund- und Verteilzeiten zusammensetzen. Bei der Planung der Mitarbeiter werden zusätzlich Erholzeiten berücksichtigt [Eve97, S. 41f.].

² NC: Numerical Control / RC: Robot Control

³ CAM : Computer-Aided Manufacturing,

Ergebnis der Arbeitsablaufplanung ist der Arbeitsplan. Dieser dokumentiert die notwendigen Bearbeitungsschritte (Prozessfolge) und weist jedem Prozess Material, Arbeitsplatz, Betriebsmitteln, Vorgabezeiten und ggf. eine Kostenstelle zu. Der Arbeitsplan ist das zentrale Planungsdokument und dient dazu den Produktionsablauf zu lenken [Eve97].

Auftrags- bzw. produktbezogene Arbeitsmittelplanung

Die Zuordnung der notwendigen Betriebsmittel im Arbeitsplan erfordert dass ein Teil der Arbeitsmittelplanung während der Arbeitsablaufplanung erfolgen muss. Da sich die erforderlichen Arbeitsmittel aus den Merkmalen der Produkte sowie der festgelegten Prozessen ergeben, wird von der auftrags- bzw. produktbezogenen Arbeitsmittelplanung gesprochen. Sie umfasst die Auswahl von Maschinen bzw. Maschinengruppen im Zuge der Prozessplanung sowie die Auswahl von Werkzeugen und Vorrichtungen im Rahmen der Operationsplanung.

Maschinenplanung: Fertigungsprozesse werden vorwiegend von Werkzeugmaschinen umgesetzt, welche die Bearbeitung voll- oder teilautomatisiert durchführen. Zur Unterteilung der Werkzeugmaschinen werden häufig die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 herangezogen [DIN8580]. So ergibt sich aus dem gewählten Fertigungsverfahren bereits eine Einschränkung der möglichen Maschinen. Die Einflussgrößen (vgl. [Eve97, S. 34]) für die Maschinenplanung lassen sich unterteilen in:

- Werkstückdaten: Gestalt, maximale Abmessungen, Werkstoff etc.
- Maschinendaten: Arbeitsraummaße, Leistung, Maschinenfähigkeiten etc.
- Prozessfolge: Vorgänger-/Nachfolgerprozess, Zwangsfolge
- Auftragsdaten: Losgröße, Optimierungskriterium (Kosten, Zeit etc.)

Werkzeug- und Vorrichtungsplanung: Für die ausgewählten Maschinen müssen anschließend die für die Prozesse notwendigen Werkzeuge und Vorrichtungen ermittelt und zugeordnet werden. Es lässt sich zwischen Standardwerkzeugen und -vorrichtungen sowie Sonderwerkzeugen und -vorrichtungen unterscheiden. Standardausführungen sind produktneutral und lassen sich somit flexibel einsetzen. Sonderbauformen werden für spezifische Bearbeitungsaufgaben gefertigt und weisen nur eine geringe Einsatzflexibilität auf. Die Planung der Werkzeuge hängen maßgeblich vom jeweiligen Fertigungsverfahren ab. So ist die Werkzeugplanung für die Fertigungsverfahren *Urformen*, *Umformen* und *Fügen* Bestandteil der auftrags- bzw. produktbezogenen Arbeitsmittelplanung. Werkzeuge für Verfahren *Beschichten* und *Stoffeigenschaft ändern* werden in der Regel nicht geplant. Eine Sonderstellung haben die Werkzeuge der Hauptgruppe *Trennen*. Durch den modularen Aufbau ergibt sich die Aufgabenstellung der Werkzeugkonfiguration [Eve97, S. 35ff.].

2.4.2.3 Arbeitssystemplanung

Die Aufgaben der Arbeitssystemplanung umfassen die produktionsprogrammbezogene Arbeitsmittelplanung, die Planung des Materialflusses sowie die Arbeitsstättenplanung. Im Vordergrund steht somit die Planung des Produktionsbereichs, z. B. der Fabrik oder Produktionslinie, losgelöst von einem spezifischen Produkt. Weitere Teilaufgaben sind die Personalplanung und die Investitionsplanung. Die Planung erfolgt unter technischen und organisatorischen Gesichtspunkten. Wird die Ergonomie zusätzlich betrachtet, wird von Arbeitssystemgestaltung gesprochen [Eve97, S. 99]. Dies erfolgt beispielsweise bei der konkreten Ausgestaltung eines Arbeitsplatzes und ist daher nicht mehr als Teil der Produktionssystemkonzipierung zu sehen.

Produktionsprogrammbezogene Arbeitsmittelplanung

Die produktionsprogrammbezogene Arbeitsmittelplanung besitzt einen langfristigen Planungshorizont und umfasst Fertigungsanlagen und Bearbeitungsmaschinen. Eingangsgrößen für diese Planung sind das herzustellende Teilespektrum, die gewünschte Fertigungstiefe und Variantenvielfalt sowie die zu produzierende Stückzahl. Es ergibt sich eine zweistufige Vorgehensweise bestehend aus der Auswahl der Bearbeitungsmaschinen und der Planung der Anordnungsstruktur (Layout). Die vorliegenden Planungsinformationen aus der Konstruktion sowie der Arbeitsablaufplanung werden verwendet, um unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten die optimalen Maschinen auszuwählen. Dies erfolgt nicht für ein spezifisches Bauteil, sondern für Teilefamilien. Für eine Teilefamilie ergeben sich unterschiedliche Merkmale, z. B. Abmessungen, Gewicht, Formelemente, Toleranzen, Handhabbarkeit. Diese werden in Kriterien für die Maschinenauswahl überführt z. B. Arbeitsraumabmessungen, Bearbeitungsverfahren, Art der Steuerung, Art der Werkstückzufuhr. Ist die Auswahl erfolgt, wird die Anzahl der benötigten Maschinen bestimmt. Hierzu sind Angaben über die notwendigen Bearbeitungszeiten, den Nutzungsgrad sowie die Stör- und Wartezeiten relevant. Lassen sich diese nicht ermitteln, muss auf Vergangenheitswerte zurückgegriffen werden. Abschließend wird die Anordnungsstruktur der Maschinen geplant. Aus den resultierenden Transportbewegungen zwischen den Bearbeitungsmaschinen wird das Fertigungsprinzip (z. B. Werkbankfertigung, Fertigung nach dem Fließprinzip, Fertigungsinsel oder Baustellenfertigung) abgeleitet. Das sich daraus ergebende Layout hat einen wesentlichen Einfluss auf die Funktion des Produktionssystems [Eve97, S. 100ff.].

Materialflussplanung / Produktionslogistik

Die Materialflussplanung beschäftigt sich mit sämtlichen Vorgängen des innerbetrieblichen Objektflusses. Maßgebliche Funktionen sind die Verkettung der Fertigungs- und

Montagemaschinen mittels Transport- und Lagervorgängen [Mar99]. Weiterer Bestandteil des Materialflusses ist das Handhaben¹ von Werkstücken oder Bauteilen [VDI2860]. Folglich werden während der Materialflussplanung weitere Betriebsmittel (Materialflusssysteme, Lagersysteme und Handhabungssysteme) ausgewählt und dem Produktionssystem hinzugefügt.

Projektierung des Materialflusssystems: Nach der VDI-RICHTLINIE 3300 wird der Materialfluss in vier Ebenen eingeteilt, wobei das Einteilungskriterium der jeweilige Bereich ist der betrachtet wird [Mar06], [Dan99]:

- Auf obersten Ebene (Materialfluss 1. Stufe) wird die Branchenwertschöpfungskette betrachtet. Aus Sicht des Produktionsbetriebs wäre dies der Transport vom Lieferant zum eigenen Unternehmen und vom Unternehmen zu den Kunden².
- Auf der zweiten Ebene (Materialfluss 2. Stufe) ist der betriebsinterne Bereich die Systemgrenze. Hierbei werden einzelne Bereiche auf dem Firmengelände miteinander verknüpft, beispielsweise Wareneingang, Fertigung, Vormontage und Verpackung.
- Die dritte Ebene (Materialfluss 3. Stufe) fokussiert den Materialtransport innerhalb eines Gebäudes. Es werden die einzelnen Abteilungen sowie die Bewegungen in den einzelnen Abteilungen geplant. Beispiele sind der Transport zwischen Arbeitsplätzen, Maschinengruppen oder Zwischenlagern.
- Die unterste Ebene ist der Arbeitsplatzbereich (Materialfluss 4. Stufe). Hier gilt es, den Arbeitsplatz nach materialflusstechnischen, ergonomischen und physiologischen Gesichtspunkten zu gestalten.

Kriterien für die Auswahl von Transportsystemen sind beispielsweise Entfernungen zwischen den Bearbeitungssystemen, Transportzeit, Grundfläche oder der angestrebte Automatisierungsgrad.

Projektierung der Lagersysteme: Die Funktion eines Lagers innerhalb des Produktionssystems ist der zeitliche und mengenmäßige Ausgleich von jeglichen Gütern [Dan99]. Ein (Zwischen-)Lager zwischen Bearbeitungssystemen dient somit zur Stabilisierung des Materialflusses, wenn die Nachfrage einer Maschine zeitlichen Schwankungen unterliegt. Ein weiteres Lagerbeispiel ist die Versorgung einer Maschine mit benötigten Teilen. Lagersysteme lassen sich nach der Lageraufgabe (Bereitstellung, Zwischenlager, etc.), dem Lagergut (Stückgut, Schüttgut, Flüssiggut) und dem Lagerprinzip unterscheiden. Für die

¹ Nach der VDI Richtlinie 3300 umfasst das Handhaben die Bewegungsvorgänge, beim Einleiten oder Beenden von Fertigungs-, Transport- oder Lagervorgängen [Dan99].

² Planungsaufgaben für den Materialfluss der 1. Stufe erfolgen losgelöst von der Planung der einzelnen Produktionssysteme. Die Gestaltung ist Gegenstand der Logistik und daher in der Produktionssystemkonzipierung nicht weiter betrachtet [GP14].

Auswahl von Lagersystemen sind Anforderung (Menge, Frequenz, Beschickungszeit, Bedienart) abzuleiten und mögliche Systemlösungen zu ermitteln [Eve97].

Projektierung der Handhabungssysteme: Zu den Hauptfunktionen des Handhabens gehören das Speichern, Verändern, Bewegen, Halten und Prüfen von Objekten (z. B. Rohmaterial, Werkstücke oder Werkzeuge). Entsprechend dieser Gliederung lassen sich die unterschiedlichen Handhabungssysteme (z. B. Magazine, Industrieroboter, Prüfeinrichtungen etc.) gruppieren [VDI2860]. Die Projektierung der Handhabungssysteme umfasst die Bestimmung der vorliegenden Handhabungsfunktion sowie die Auswahl und Planung der geeigneten Betriebsmittel [GP14, S. 33].

Arbeitsstättenplanung

Die räumliche Gestaltung des Produktionssystems ist Gegenstand der Arbeitsstättenplanung. Den Fertigungs- und Montagemaschinen sowie den Materialflusseinrichtungen werden die jeweiligen Standorte innerhalb des betrachteten Produktionsbereichs (Fabrik, Fertigungslinie) zugeordnet. Je nach Planungsebene ergeben sich die folgenden Aufgabenbereiche [GP14]:

Bebauungsplanung (Gebäude): Der Betrachtungsbereich der Bebauungsplanung umfasst das Betriebsgelände und die darauf befindlichen Gebäude. Es werden der Flächenbedarf der einzelnen Gebäude ermittelt, deren Funktionszusammenhänge bestimmt und die Gebäudearten festgelegt. Jedes Gebäude ist unter Berücksichtigung der Bauvorschriften, Geländeeigenschaften und weiterer Restriktionen (z. B. spätere Ausbaumöglichkeiten) weiter zu gestalten. Aus der Gebäudegestaltung und Grundstückplanung ergeben sich Rückwirkungen auf das technisch-organisatorische Konzept [GP14, S. 33], [Wie10, S. 233].

Anordnungsplanung / Planung der Produktionslinien: Dieser Schritt fokussiert die Planung der einzelnen Produktionsbereiche innerhalb einer Fabrik. Restriktionen für die Gestaltung ergeben sich aus der Arbeitsmittelplanung und der Gebäudeplanung. Ausgehend von der gewählten Anordnungsstruktur sind die einzelnen Bestandteile des Produktionssystems innerhalb des zur Verfügung stehenden Platzes anzuordnen. Hierzu werden die geplanten Fertigungs- und Montagesysteme, die Transport-, Lager- und Handhabungssysteme sowie Handarbeitsplätze ausgewählt, bei Bedarf dimensioniert und integriert [GP14, S. 33].

Gestaltung der Arbeitsplätze: Auf unterster Ebene werden die Arbeitsstationen und Arbeitsplätze entsprechend der Vorgaben aus Arbeitsablaufplanung und Anordnungsplanung im Detail gestaltet. Neben der Anordnung der Betriebsmittel, Transport- und Lager-einrichtungen, umfasst dies die Sicherstellung der Energie-, Material- und Werkzeugversorgung und die Vermeidung von gesundheitsschädlichen Einflüssen für das Personal. So wird der Arbeitsplatz unter ergonomischen (Sichtfelder, Erreichbarkeit von Objekten, Beleuchtung etc.) und physiologischen Aspekten (z. B. Farbgestaltung) geplant. Ein weiterer Bereich ist der Arbeitsschutz [GP14, S. 33].

2.4.3 Vorgehen zur Fabrikplanung

Analog zu den Planungsebenen der Arbeitsplanung (vgl. Abschnitt 2.4.2.1) wird auch die Fabrikplanung in fünf unterschiedliche Planungsebenen eingeteilt. Der kleinste Bereich ist der **Arbeitsplatz** als elementarer Produktionsbereich. Mehrere Arbeitsplätze mit definierten Produktionsaufgaben bilden ein **Segment**. Die nächste Ebene umfasst ein **Gebäude**, das mehrere (Teil-)Segmente beinhaltet. Im engeren Sinne wird diese Ebene als Fabrik bezeichnet. Sind an einem Produktionsstandort ein oder mehrere Gebäude vorhanden, wird von einem **Werk** gesprochen. Die oberste Ebene bildet das **Produktionsnetz**, welches als Verbund von mehreren Standorten anzusehen ist [VDI5200].

Eine weitere Einteilung von Fabrikplanungsprojekten ergibt sich anhand der Planungstiefe. Beispiele für Fabrikplanungsprojekt sind die Grobplanung eines einzelnen Montageplatzes, die Feinplanung des Layouts einer Produktionslinie, die Neuplanung einer Fabrikhalle oder die Planung der kompletten Werksstruktur [VDI5200].

Zur Durchführung von Fabrikplanungsprojekten finden sich in der Fachliteratur mehrere Vorgehensweisen¹. Im grundsätzlichen Ablauf der Planung sind alle Vorgehensweisen identisch, wobei sich je nach Fokus (Modularität, Wandlungsfähigkeit, etc.) die durchzuführenden Schritte unterscheiden. Unabhängig vom Planungsfall oder der Detaillierungstiefe lässt sich der Planungsablauf in die vier Hauptphasen² *Vorbereitung, Strukturierung, Gestaltung* und *Umsetzung* einteilen (siehe Bild 2-11).

¹ vgl. [VDI5200], [Gru12], [WRN09], [Wie96]

² vgl. [Wie10, S. 237], [WRN09, S. 429]

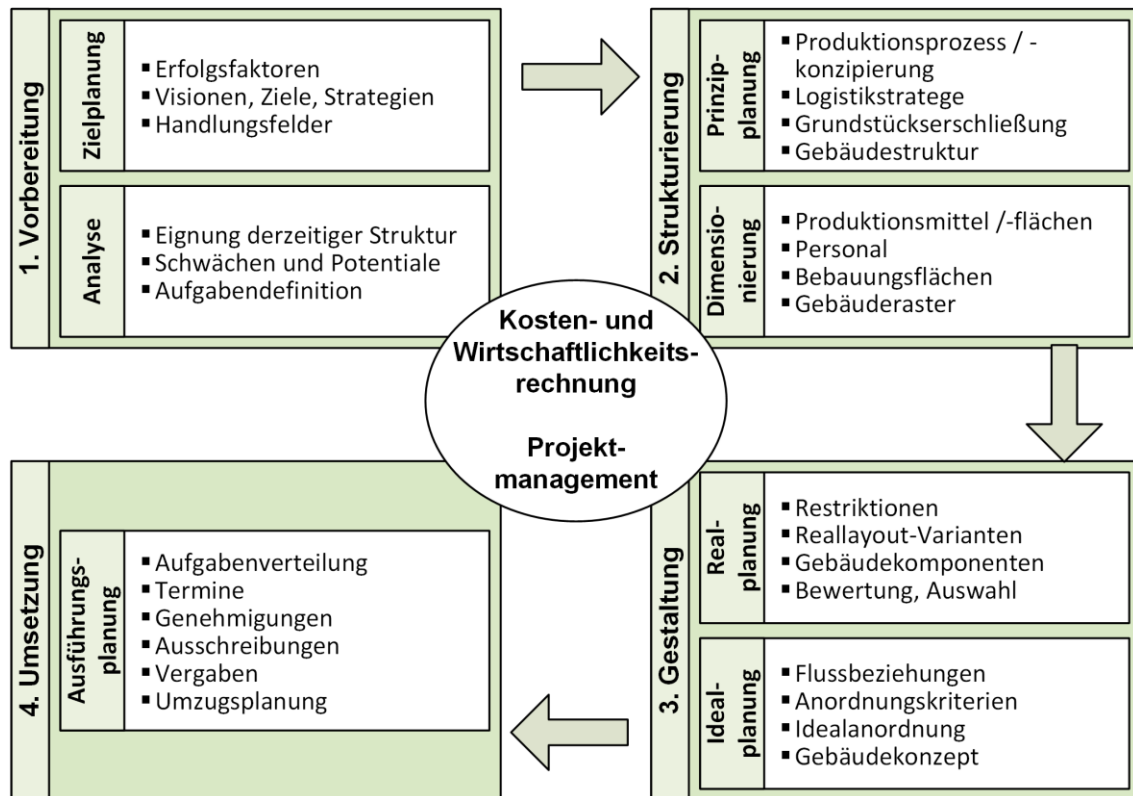


Bild 2-11: Phasen und Schritte eines systematischen Planungsablaufs der Fabrikplanung nach [Wie10, S. 237]

Vorbereitung: Startpunkt jeder Fabrikplanung ist die Zielplanung zum Klären der Planungsaufgabe. Sie dient dazu die grobe Zielsetzung festzulegen und die Fabrikplanung auf die übergreifenden Unternehmensziele abzustimmen. In dieser Phase können bereits erste Grobkonzepte und mögliche Lösungsvarianten erstellt und diskutiert werden. Der weitere Schwerpunkt der Vorbereitung ist die Analyse des bestehenden Ist-Zustands in der Fabrik bzw. dem Betrieb. Dies zeigt mögliche Schwachstellen und Potentiale auf und hilft bei der Konkretisierung und Detaillierung der Aufgabenstellung. Weiterhin werden notwendige Informationen über Produkte, Betriebsmittel und Immobilien gesammelt, abgelegt und im Hinblick auf die Planungsziele ausgewertet. Zum Abschluss der Vorbereitung liegen eine detaillierte Aufgabenstellung, ein Projektplan mit Arbeitspaketen sowie die gesammelten Planungsinformationen vor [Wie96], [VDI5200], [Gru12].

Strukturierung: In der zweiten Phase wird das grundlegende Konzept der Fabrik entworfen. Den Ausgangspunkt bildet ein ideales Arbeitsablaufschemata welches die Abfolge der Bearbeitungsschritte widerspiegelt. Darauf aufbauend werden die notwendigen Fertigungs- und Montagestrukturen und die benötigten Transport- und Lagerkonzepte definiert. Es ergibt sich ein erstes Funktionsschema der Fabrik, in dem die einzelnen Bereiche (Fertigung, Montage, Logistik) miteinander verknüpft sind. Diese 2D-Darstellung wird zunächst unabhängig von den realen Gegebenheiten erstellt und zeigt eine rein funktionale Sicht unabhängig vom Layout. Mögliche alternative Umsetzungen (unterschiedliche

Technologien, Automatisierungsgrad, etc.) werden während der Dimensionierung betrachtet. Es werden die Art und Anzahl der Produktionsmittel festgelegt und die Personalressourcen bestimmt. Liegen die Informationen zu Produktionsmittel und Personen vor, werden die Flächen der einzelnen Bereiche anhand von Berechnungen, Kennzahlen und Schätzung ermittelt. Eine abschließende Bewertung mittels technologischer, logistischer und wirtschaftlicher Kriterien führt zu einer Einschränkung möglicher Lösungen [Wie96], [VDI5200], [Gru12].

Gestaltung: In der dritten Phase wird das Layout der Fabrik stufenweise entwickelt. Mit den vorab ermittelten Informationen zum Flächenbedarf lässt sich ein maßstäbliches Funktionsschema ableiten. Dieses bietet erste Erkenntnisse zu Raumbedarfen und erlaubt die Einordnungen in bestehende Raumstrukturen. Unter Berücksichtigung der Material-, Personal- und Informationsflüsse wird eine ideale Anordnung der Bereiche erstellt. Es ergeben sich Groblayouts der realisierbaren Anordnungsvarianten. In einer weiteren Detaillierungsstufe wird für das favorisierte Groblayout eine Realplanung (Feinplanung) durchgeführt. Die genauen Aufstellflächen der Maschinen werden festgelegt, Arbeitsplätze gestaltet und Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen geplant. Es ergibt sich das Reallayout der Fabrik. Weitere Aspekte der Realplanung sind beispielsweise die Klimatechnik des Gebäudes oder die Informationstechnik (Leitstände, Betriebsdatenerfassung, etc.). Alle Dokumente der Feinplanung bilden die Grundlage für die Umsetzung der Fabrik [Wie96], [VDI5200], [Gru12].

Umsetzung: Die Umsetzungsphase teilt sich auf in die vorbereitenden Planungen (Genehmigungen, Lieferantenaufträge, Umzugsplanung, etc.) und die eigentliche Erstellung der Bauwerke und Anlagen. Abschließende Tätigkeiten umfassen die Inbetriebnahme des Fabrik- bzw. Produktionssystems bis zum angestrebten Normalbetrieb. Eine Bewertung der Fabrik dient zur Überprüfungen der erreichten Ergebnisse mit den festgelegten Fabrikzielen [VDI5200], [Gru12].

2.4.4 Fazit und Einordnung der Arbeit

Für die Ausarbeitung des Produktionssystems ergeben sich große Schnittmengen zwischen den Aufgabenbereichen der Arbeitsplanung sowie der Fabrikplanung. Dies zeigt sich in den Planungsebenen beider Bereiche, die vom einzelnen Arbeitsplatz bis zur kompletten Fabrik reichen. Vielfach wird die Fabrikplanung daher auch den langfristigen Aufgaben der Arbeitsplanung zugeordnet. Auch der vorgestellte Leitfaden zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme ist für alle Planungsebenen einsetzbar. Alle Vorgehensweisen beinhalten eine Konzeptphase bzw. Grobplanung in der der grundlegende Produktionsablauf, die Struktur und das Layout festgelegt werden.

Die in der Konzipierungsphase erstellte Prinzipiellösung des Produktionssystems dient als zentrales Planungsdokument für die unterschiedlichen Aufgabenstellungen. Das zu entwickelnde Planungswerkzeug soll die Bereitstellung der Planungsinformationen für die

weitere Ausarbeitung des Produktionssystems unterstützen. Relevante Planungsinformationen über Maschinen und Werker sowie benötigte Werkzeuge, Hilfsmittel und Flächen müssen in der Prinzipiellösung enthalten sein. Von den vorgestellten Planungsebenen werden vorwiegend die untere drei adressiert, d.h. Arbeitsplatz, Arbeitssystem und Produktionssystem. Bei der Konzipierung eines Branchenwertschöpfungssystems oder einer komplette Fabrik werden übergeordnete Ziele betrachtet, die häufig mehrere Produkte, Produktfamilien oder ganze Geschäftsbereiche umfassen.

2.5 Simulative Absicherung der Produktionssystemplanung

Zur Absicherung von Entwicklungs- und Planungsprojekten hat sich die Simulationstechnik als geeignetes Werkzeug erwiesen. Der Einsatz der Simulationstechnik ist ergänzend zur durchzuführenden Planungsleistung und kann diese in keinem Fall ersetzen [REF90, S.224]. Die Simulationsergebnisse dienen zur Entscheidungsunterstützung während des Planungsprozesses [FR00, S.1]. Anhand eines Modells des Produktionssystems lassen sich unterschiedliche Aspekte analysieren, bewerten und ggf. Verbesserungspotentiale identifizieren. In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst eine Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien (Kapitel 2.5.1) sowie die geeignete Analysemethode für die Produktionssystemkonzipierung vorgestellt (Kapitel 2.5.2).

2.5.1 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien

Die VDI-RICHTLINIE 3633 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ liefert eine allgemeine Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien. Diese besteht auf den drei Hauptphasen *Vorbereitung*, *Durchführung* und *Auswertung* die sich in mehrere Schritte aufteilen. Bild 2-12 zeigt die Phasen und Schritte sowie die Entscheidungspunkte während des Ablaufs.

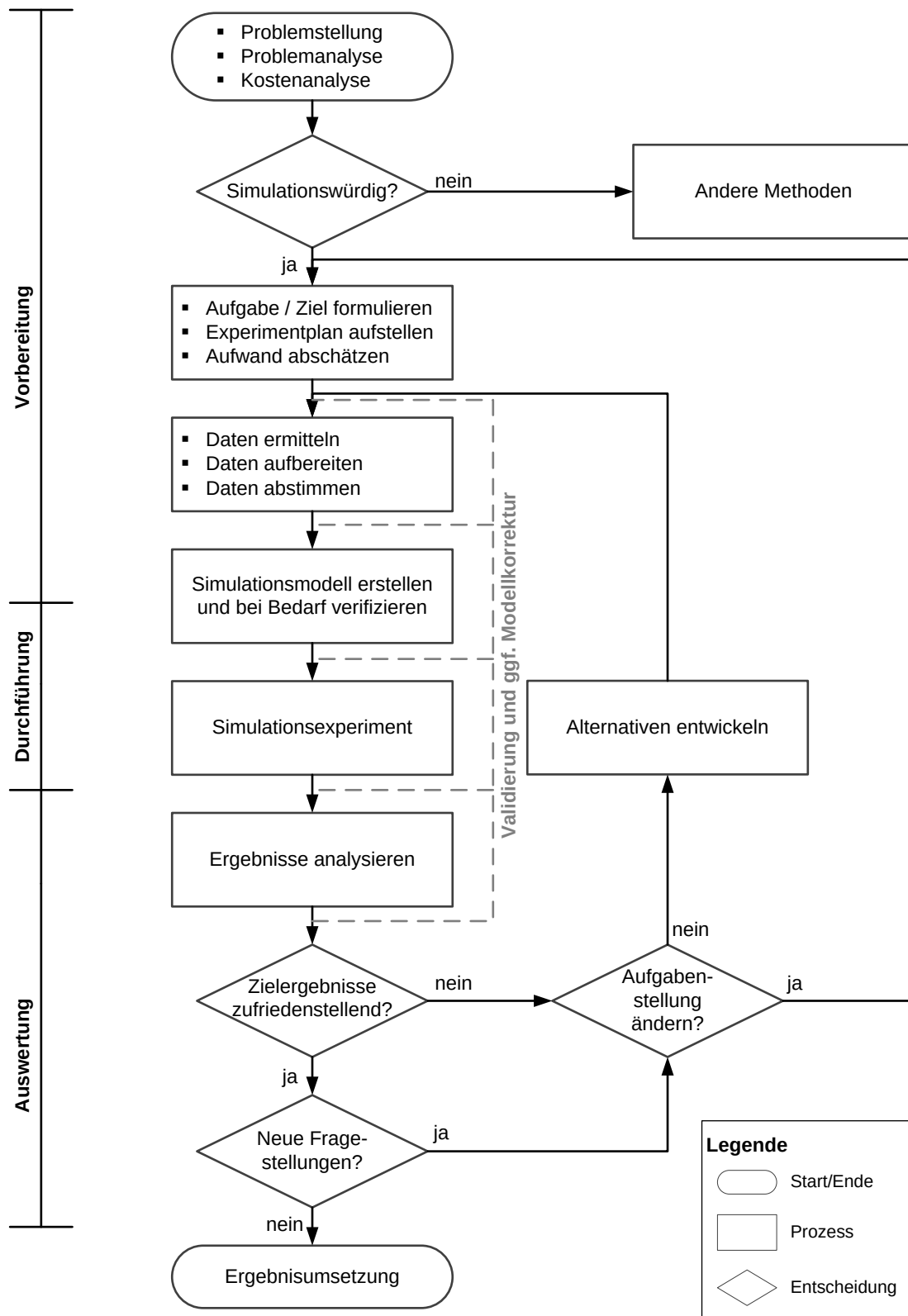


Bild 2-12: Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie nach [VDI3633-1]

Vorbereitung: Im ersten Schritt wird geprüft, ob eine Simulationsstudie für das vorliegende Problem überhaupt sinnvoll ist. Je nach Komplexität der Aufgaben ergibt sich ggf.

ein ungünstiges Kosten/Nutzen-Verhältnis, so dass andere Methoden anstelle der Simulation herangezogen werden müssen. Sofern eine Simulationsstudie durchgeführt werden soll, sind das Gesamtziel (z. B. Wirtschaftlichkeitsmaximierung) und die Teilziele (z. B. Minimierung der Durchlaufzeit) festzulegen. Die definierten Ziele haben maßgeblichen Einfluss auf die Modellerstellung sowie den Experimentplan. Der folgende Schritt dient dem Aufbau der Datenbasis. Daten über die Systemlast (Auftragseinlastung, Produktdaten), die Organisation (Arbeitszeiten, Ressourcenzuordnung, Ablauforganisation) und technische Daten (Layout, Leistungsdaten und Kapazitäten der Ressourcen, Störungen und Verfügbarkeiten, etc.) sind zu ermitteln, aufzubereiten und im Bedarfsfall abzustimmen. Ausgehend von den gesammelten Daten erfolgt eine überschlägige Berechnung des Systems, um zu prüfen ob die definierten Ziele überhaupt erreichbar sind. Ein Hilfsmittel ist beispielsweise ein Sankey-Diagramm zur Visualisierung der Materialflüsse (Menge/Zeit). Die eigentliche **Modellierung** des Systems lässt sich in zwei Modellierungsstufen aufteilen. In der ersten Stufe wird ein symbolisches Modell des Produktionssystems erstellt, welches noch nicht simulationsfähig ist. Diese Aufgabe liegt in der Verantwortung des Entwicklers, Anwenders oder Betreibers des Systems. Mit dem Modell wird festgelegt, welche Systemeigenschaften für die Simulation relevant sind und welche vernachlässigt werden können. In der zweiten Modellierungsstufe wird das Produktionssystem in ein Softwaremodell überführt und simulationsfähig gemacht. Aufgrund der spezifischen Kenntnisse über das verwendete Programm und die eingesetzte Programmiersprache, ist für diesen Arbeitsschritt meist ein Simulationsexperte zuständig. Die Vorbereitung endet mit der Validierung des Modells [VDI3633-1].

Durchführung: Nach Abschluss der Modellierung werden die einzelnen Simulationsexperimente geplant und durchgeführt. Es werden die zu variierenden Parameter bestimmt und die Auswertungstiefe festgelegt. Aus den Simulationsläufen lassen sich bereits Tendenzen zur Verbesserung des Systems erkennen [REF90, S. 224]. Oberste Prämisse ist es, möglichst schnell, d.h. mit wenigen Experimenten das Ziel zu erreichen, da jede Auswertung von Simulationsergebnissen einen erheblichen Aufwand mit sich bringt. Eine statistische Experimentplanung¹ sowie mathematische Optimierungsverfahren können den Anwender dabei unterstützen. Sollten sich im Zuge der Experimentplanung Änderungen am Simulationsmodell ergeben, sind diese entsprechend umzusetzen [VDI3633-1], [VDI3633-3].

Auswertung: Für jedes Simulationsexperiment liegen bestimmte Kennwerte (Durchlaufzeit, Auslastung, etc.) vor. Über grafische Darstellungen (z. B. Diagramme) werden die Daten aufbereitet und dem Anwender präsentiert. Die Simulationsergebnisse sind durch den Anwender zu interpretieren und entsprechende Rückschlüsse über das Experiment zu ziehen. Dieser Schritt ist von hoher Bedeutung, da sich daraus die notwendigen Maßnahmen ableiten. Wurden die Zielergebnisse erreicht? Ergeben sich aus den Ergebnissen

¹ Ein detaillierter Ablauf der statistischen Experimentplanung findet sich in der VDI-Richtlinie 3633 – Blatt 3 [VDI3633-3].

neue Fragestellung? Müssen weitere Alternativen des Produktionssystems entwickelt und simuliert werden? Die festgelegten Maßnahmen können wiederum mit Hilfe eines angepassten Simulationsmodells überprüft werden. Im letzten Schritt werden die gewonnenen Erkenntnisse am realen System umgesetzt [VDI3633-1], [FR00, S. 24f.].

2.5.2 Analyse und Bewertung von Produktionssystemkonzepten

Welche Simulationstechnik zur Absicherung eines Produktionssystemkonzepts zum Einsatz kommt, richtet sich nach der jeweiligen Planungsebene sowie den Planungsinhalten die analysiert werden sollen (vgl. Tabelle 2-1). Der Detaillierungsgrad des notwendigen Simulationsmodells steigt, je genauer ein Teilsystem betrachtet wird. Beispielsweise werden auf Fabrikebene grobe Ablaufsimulationen durchgeführt, für die der genaue Aufbau einzelner Arbeitssysteme oder Maschinen irrelevant ist. Diese werden im Simulationsmodell der Fabrik abstrahiert und nur durch die Bearbeitungszeiten berücksichtigt. Soll eine Maschine im Detail betrachtet werden, wird diese isoliert von der Fabrik, Anlage oder Zelle modelliert. Für Kinematik- oder Mehrkörpersimulation sind genaue Informationen über den mechanischen Aufbau der Maschine notwendig.

Tabelle 2-1: Modellierungsebenen für die Simulation von Produktionssystemen nach [FR00, S.15]

Planungsebene	Planungsinhalt	Simulationsmodell
Produktionsbetrieb (Fabrik)	• Fertigungsprinzip • Logistik • Systemleistung • Einlastungsstrategie • PPS-Parameter	• Ablaufsimulation (grob) • Wirtschaftlichkeitssimulation
Produktionssystem (Anlage)	• Anlagenlayout • Materialfluss/Logistik • Systemleistung • Steuerungsstrategie	• Ablaufsimulation (mittel)
Arbeitssystem (Zelle)	• Zellenlayout • Ablaufvorschriften • RC-/NC-Programmierung • Kollisionsvermeidung • Taktzeitoptimierung	• Ablaufsimulation (fein) • 3D-Kinematiksimulation
Arbeitsmittel (Komponente)	• Betriebsmittel beanspruchung • Prozessparameter • Werkzeuge und Hilfsmittel • NC-/RC-Programm	• Finite-Element-Methode (FEM) • 3D-Kinematiksimulation • Mehrkörpersimulation (MKS)

Für die Planung und Konzeption komplexer Produktionssysteme (vgl. Kapitel 2.1.4) eignet sich besonders eine Ablaufsimulation, um das dynamische Verhalten abzubilden und zu bewerten. Rein mathematisch-analytische Verfahren oder das Erfahrungswissen des Planers reichen nicht aus, um die zeitlichen Abläufe sowie zufallsbedingte Einflüsse (z. B.

Maschinenstörungen) ordnungsgemäß zu berücksichtigen. So lassen sich mit einer Ablaufsimulation in der Grobplanung alternative Lösungsvarianten auslegen und vergleichen. Auch in der weiteren Detailplanung und Optimierung eines ausgewählten Systemkonzepts kann die Ablaufsimulation eingesetzt werden [REF90, S.224].

Zwei weitere Simulationsmethoden zur frühzeitigen Bewertung von Produktionssystemen wurden im Verbundprojekt „VireS – Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung“ erarbeitet. Sie fokussieren die Herstellkosten¹ sowie die Robustheit² des Systems, speziell in der Konzipierungsphase neuer Produktionssysteme. Als Eingangsinformation dient die Prinzipiellösung des Produktionssystems. Die notwendigen Werte für Maschinenstundensätze, Rüstzeiten, Leistungsgrad oder Qualitätsgrad werden anhand von Vergangenheitswerten berechnet oder auf Basis des Erfahrungswissens des Anwenders geschätzt. Die hinterlegten Algorithmen³ zur Kostenermittlung berücksichtigen die Ungenauigkeiten sowie Wahrscheinlichkeiten und geben das Ergebnis mit einer Schwankungsbreite an. Diese wird verwendet, um die Robustheit des Produktionssystems zu ermitteln [GLL12, S. 153ff.].

2.5.3 Fazit und Einordnung der Arbeit

Die Simulationstechnik ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Unterstützung des Entwicklungsteams während der Planungsphase. Erarbeitete Konzepte können überprüft und abgesichert werden [NHK+09]. Mit Hilfe der Simulationsmodelle lassen sich alternative Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die vorliegende Problemstellung analysieren und bewerten. Dem Mehrwert, der sich durch den Einsatz der Simulationstechnik ergibt, steht der Aufwand für die Modellerstellung gegenüber. Zum Aufbau der Simulationsmodelle benötigt der Simulationsexperte alle für die gewählte Analysemethode relevanten Informationen über das System.

Mit Hilfe des Planungswerkzeugs zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung soll der Aufwand für die Durchführung von Simulationsstudien verringert werden. Die mittels CONSENS erstellte Prinzipiellösung des Produktionssystems stellt die erste Modellierungsstufe in der Vorbereitungsphase einer Simulationsstudie dar. Die Partialmodelle mit den enthaltenen Informationen über Prozesse und Ressourcen bildet die Datenbasis für die unterschiedlichen Simulationsprogramme. Damit die Datenbasis vollständig ist

¹ Die Herstellkosten eines Produkts setzen sich zusammen aus den Materialkosten sowie Kosten für die Fertigung und Montage [EKL13].

² GAUSEMEIER ET AL. definieren ein Produktionssystem als robust, wenn es die Produktion von Produkten gemäß der Anforderungen unabhängig von schlecht vorhersehbaren Ereignissen erlaubt [GLL12].

³ Zu näheren Informationen zum Ablauf der Simulationsalgorithmen, der Berechnungsformeln sowie der Ergebnisdarstellung sei auf [Rüh10] und [GLL12] verwiesen.

benötigt der Produktionssystemplaner während der Modellierung der Aspekte Wissen über die benötigten Parameter der einzelnen Elemente.

2.6 Lösungswissen während der Produktionssystemkonzipierung

In den vorherigen Unterkapiteln wurde die Erarbeitung der Prinziplösung des Produktionssystems, die weitere Ausarbeitung und Analyse vorgestellt. Die Aufgabe der Entwickler ist es, geeignete Prozesse und Ressourcen auszuwählen, deren Zusammenhänge in den Partialmodellen zu modellieren und alle notwendigen Planungsinformationen für die Ausarbeitung und Analyse zu spezifizieren. Hierzu greifen die Fachleute auf ihr vorhandenes Erfahrungswissen zurück. Das Erfahrungswissen setzt sich zusammen aus dem expliziten, theoretischen Wissen über die einzelnen Aspekte sowie das implizite Wissen über bestehenden Abhängigkeiten und Zusammenhängen [Pla02, S. 518f.]. Die Auswahl der unterschiedlichen Elemente sowie der Informationsgehalt der Partialmodelle hängen somit stark vom jeweiligen Kenntnisstand der beteiligten Personen ab. Ein Experte für Fertigungstechnik ist in der Lage, Werkzeugmaschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen im Detail zu spezifizieren. Aufgrund fehlender Kenntnisse würde er u.U. relevante Planungsinformationen für die weitere Montageplanung oder für eine Materialflusssimulation vernachlässigen. Ein Simulationsexperte hingegen würde die notwendigen Parameter für die Durchführung von Simulationsstudien spezifizieren, dafür ggf. fertigungsrelevante Informationen weglassen.

Das notwendige Lösungswissen im Rahmen der Produktionssystemkonzipierung umfasst somit das Fachwissen über die Elemente der unterschiedlichen Aspekte und die Art und Weise in der sie unter den gegebenen Randbedingungen zu spezifizieren sind. Jedes Partialmodell ist gleichzeitig die Lösung für einen bestimmten Konzipierungsschritt und definiert die Fragestellungen und Restriktionen für die Erstellung der weiteren Partialmodelle. Ist die Prozessfolge festgelegt, folgen daraus die Fragestellungen für die Auswahl der Produktionsressourcen. Weitere Anforderungen für die Ressourcenauswahl ergeben sich anhand der festgelegten Prozessparameter sowie der Verknüpfung zu den Materialelementen. Weiterhin sind die generellen Anforderungen an das Produktionssystem (z. B. Taktzeit) zu berücksichtigen. Neben der Auswahl prozessgeeigneter Maschinen müssen Werkzeuge, Vorrichtungen und Mitarbeiter geplant werden. Im Anschluss ergibt sich die Fragestellung, wie die einzelnen Bearbeitungsmaschinen und die Ressourcen für den Materialfluss im Fabrikbereich angeordnet werden.

In einem ersten Schritt wird folglich Lösungswissen für die Beantwortung der unterschiedlichen Fragestellungen beim Aufbau der Partialmodelle benötigt. Dabei ergeben sich meist mehrere Alternativen für die Herstellung eines Produktmerkmals, die Umsetzung des Herstellprozesses und die Anordnung der Maschinen (Bild 2-13). Für jeden Aspekt lässt sich eine Morphologie aufbauen und als Matrixform abbilden. Sobald die ein-

zelenen Elemente ausgewählt und ihre Struktur festgelegt wurden, müssen sie mit den benötigten Planungsinformationen beschrieben werden. In einem zweiten Schritt ist Lösungswissen für die Spezifikation der einzelnen Elemente notwendig.

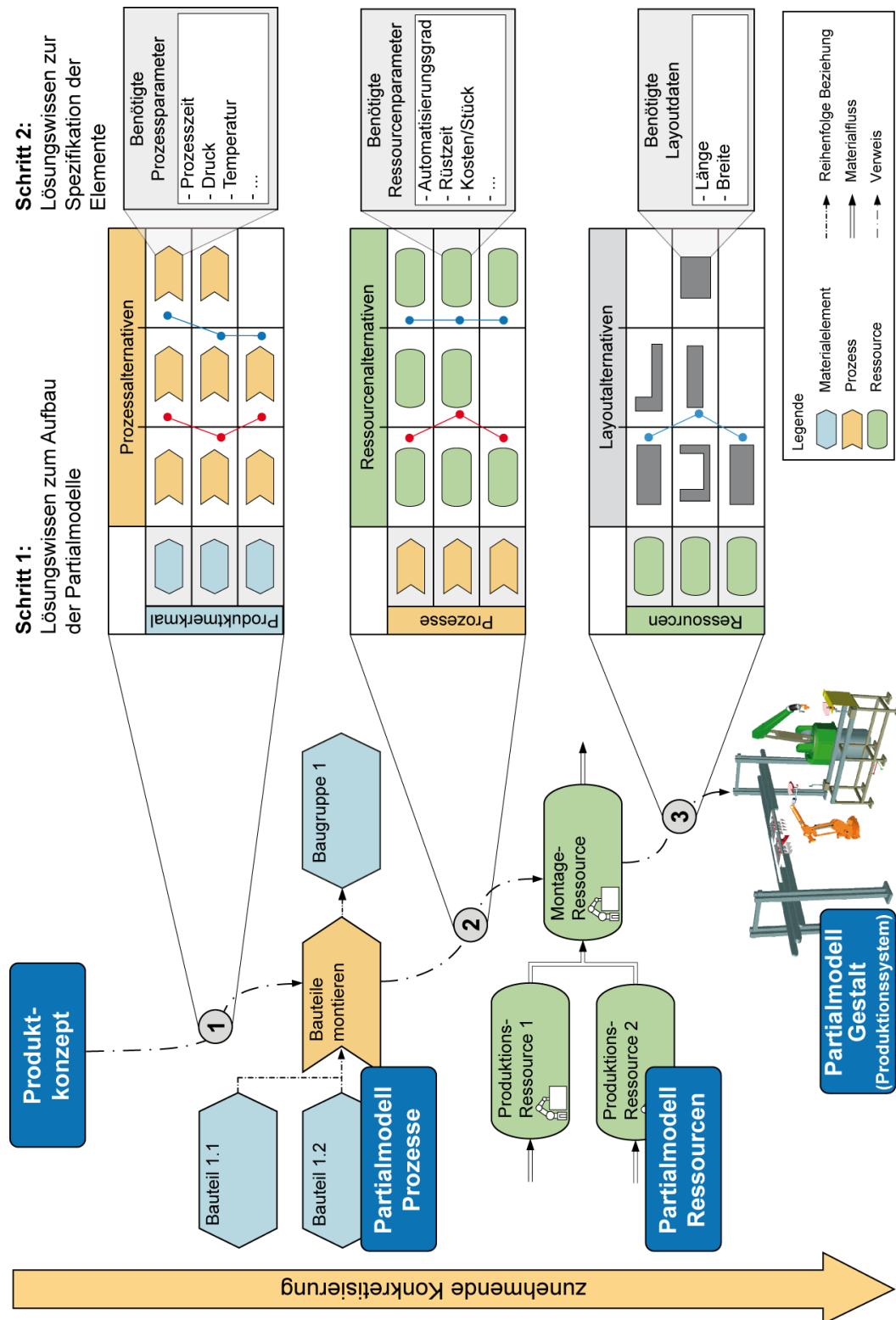


Bild 2-13: Verwendung von Lösungswissen während der Konzipierung eines neuen Produktionssystems

2.7 Einsatz wissensbasierter Systeme zur Bereitstellung von Fach- und Lösungswissen

Die Bereitstellung von Fach- und Lösungswissen wird durch den Einsatz wissensbasierter Systeme unterstützt. Die grundlegenden Komponenten eines wissensbasierten Systems, die Wissensbasis sowie die Problemlösungskomponente, wurden bereits in Abschnitt 2.1.8 erläutert. In Kapitel 2.7.1 werden die verschiedenen Anwenderrollen und Systemkomponenten zur Entwicklung und zum Einsatz eines wissensbasierten Systems beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 2.7.2 semantischen Technologien zur Daten- und Wissensmodellierung sowie zur Wissensverarbeitung präsentiert. Der Zusammenhang zwischen semantischen Technologien und einem System zur Unterstützung des Wissensmanagement ist in Bild 2-14 dargestellt. Die semantischen Technologien bilden die Grundlage für eine maschinenverständliche Aufbereitung der Daten. Im Zusammenspiel mit der definierten Semantik bieten sich Möglichkeiten zur Bewältigung der Informationsflut und eine einfachere Datenintegration. Das wissensbasierte System kann den Umgang mit Wissen besser unterstützen.

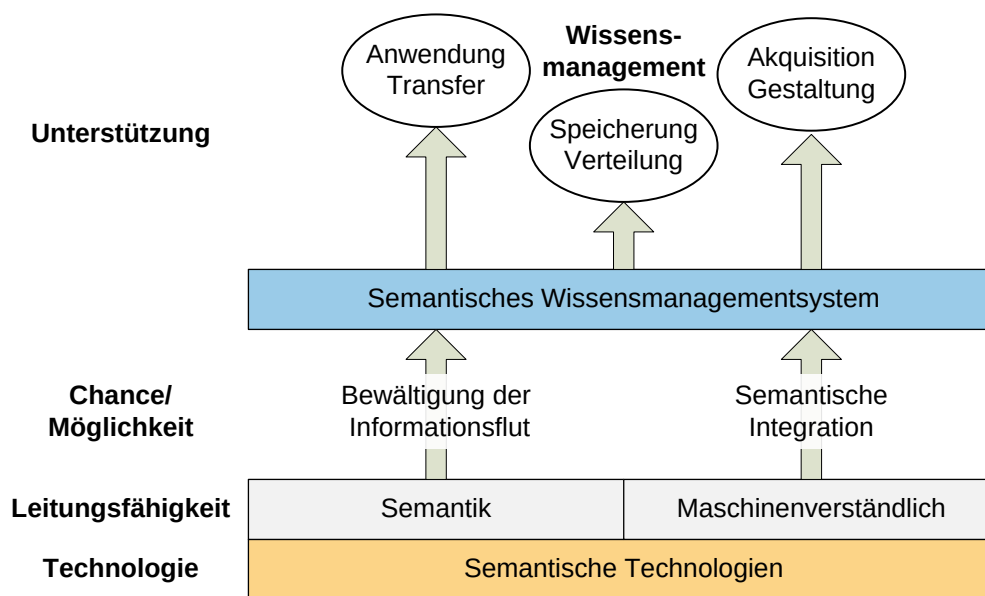


Bild 2-14: Zusammenhang zwischen semantischen Technologien und dem Wissensmanagementprozess nach [JL09, S. 7322]

2.7.1 Systemkomponenten eines wissensbasierten Systems

Das Gesamtsystem umfasst neben der Wissensbasis und der Problemlösungskomponente weitere Komponenten, die den Zugriff auf das abgelegte Fachwissen und die Interaktion mit den Anwender steuern. Bild 2-15 zeigt die grundsätzliche Struktur eines wissensbasierten Systems sowie die unterschiedlichen Anwenderrollen.

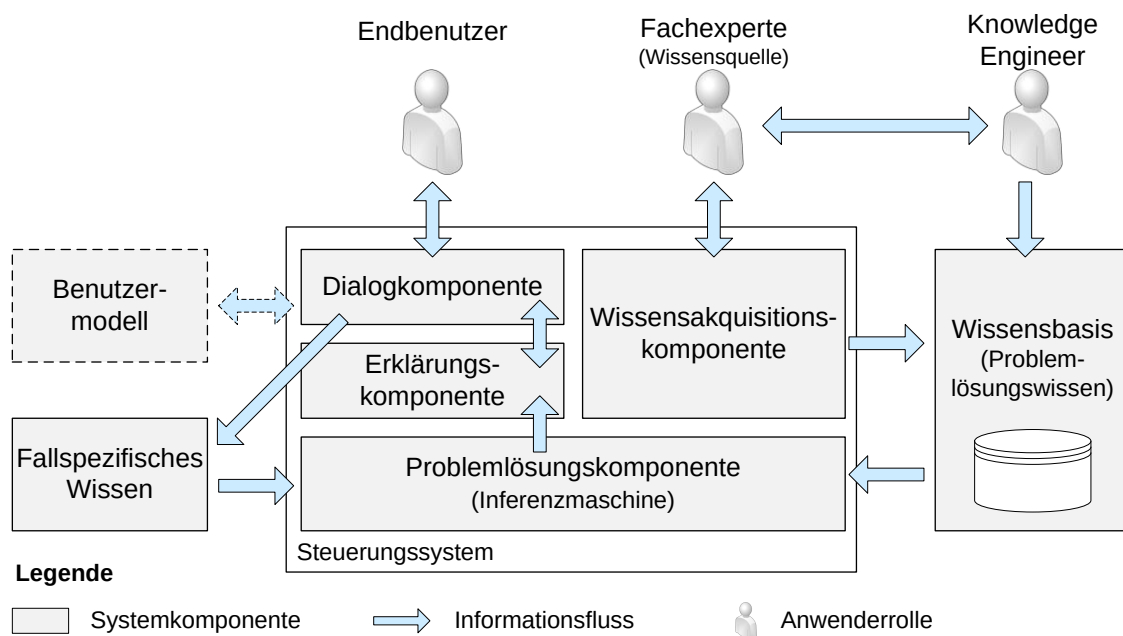


Bild 2-15: Grundsätzliche Struktur wissensbasierter Systeme nach [Kur89, S. 66]

In der **Wissensbasis** wird das domänenspezifische Problemlösungswissen abgelegt. Die Wissensrepräsentation wird unterschieden in die *deklarative* und *prozedurale* Darstellung. Deklarativ bedeutet in diesem Kontext, dass nur die reine Beschreibung von Sachverhalten erfolgt. Es handelt sich um eine statische Sammlung von Fakten, ohne die notwendigen Angaben, wie das Wissen zur Lösung eines bestimmten Problems einzusetzen ist. Jede Wissensseinheit muss nur einmal modelliert werden, unabhängig davon, wie oft und in welcher Form sie später verwendet wird. Bei der prozeduralen Wissensrepräsentation werden Struktur, Verarbeitung und Anwendung des Wissens zusammen dargestellt. Jede Wissensseinheit wird über Prozeduren beschrieben, die angeben, wie diese anzuwenden ist [Kur89, S. 36f.].

Zur Aufnahme von neuem Wissen in die Wissensbasis oder zur Änderung bestehender Wissensseinheiten wird eine **Wissensakquisitionskomponente** eingesetzt. Art und Funktionsweise der Komponente richtet sich nach der jeweiligen Wissensquelle. Für menschliche Wissensträger eignen sich beispielsweise angepasste Editoren. Der Experte modelliert sein Wissen und es wird automatisch in die Wissensbasis überführt (direkte Wissensakquisition)¹. Liegt das Wissen in Form von Daten vor, kommen intelligente Mechanismen bzw. Programme zum Einsatz, die die Daten analysieren und in die Wissensbasis aufnehmen (automatisierte Wissensakquisition) [Kur89, S. 68f.], [Bod06, S. 154].

¹ Wird die Aufgabe des Editors manuell durch einen Knowledge Engineer (Wissensingenieur) übernommen, wird der Vorgang als indirekte Wissensakquisition bezeichnet. Dies verursacht einen erheblichen Mehraufwand und wird als Engpass bei der Entwicklung eines wissensbasierten Systems angesehen [Kur89, S. 68].

Der Zugriff des Endbenutzers auf das Problemlösungswissen erfolgt über eine **Dialogkomponente**. Sie dient zur Erfassung des fallspezifischen Wissens sowie zur Aufbereitung der systeminternen Darstellung des Wissens in eine für den Benutzer verständliche Form (tabellarisch, graphisch etc.). Mit dem **fallspezifischen Wissen** wird das vorliegende Problem spezifiziert, welches mit Hilfe des Systems gelöst werden soll. Im Idealfall ist das System in der Lage, anhand getroffener Eingaben ein **Benutzermodell** zu erzeugen. Mit diesem Modell kann das System auf Vorkenntnisse schließen und den Dialog mit dem Benutzer besser gestalten [Kur89, S. 28f.], [Bod06, S. 154f.].

Die **Problemlösungskomponente** (Inferenzmaschine) wertet das in der Wissensbasis enthaltene Wissen unter Berücksichtigung des fallspezifischen Wissens aus, zieht Schlussfolgerungen und erzeugt neue Wissenseinheiten. Sie verarbeitet das vorliegende Wissen und dient zur Lösung des spezifizierten Problems. Zur Erläuterung der gefundenen Lösung oder eines Teilergebnisses wird die **Erklärungskomponente** eingesetzt. Die Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung erhöht die Akzeptanz des Systems durch den Anwender. Weiterhin hilft sie Fehler im System aufzudecken [Kur89, S. 28f.], [Bod06, S. 154f.].

2.7.2 Wissensrepräsentation mit semantischen Technologien

Das Zusammenspiel der semantischen Technologien zur Wissensrepräsentation ist in Bild 2-16 dargestellt. Die technischen Grundlagen bilden die Uniform Resource Identifier (URI)¹, der Unicode² und der XML-Standard³. Darauf aufbauend dient das Resource Description Framework (RDF) zur Datenmodellierung und zum Datenaustausch (Kapitel 2.7.2.1). Das Wissen über diese Daten wird mit dem Resource Description Framework Schema (RDFS) und der Web Ontology Language (OWL) modelliert (Kapitel 2.7.2.2). Für den Zugriff und zur weiteren Verarbeitung des Wissens werden Abfragesprachen und zusätzliche Regeln verwendet (Kapitel 2.7.2.3). Die oberste Ebene bildet die Benutzungsschnittstelle bzw. die Anwendung über die auf die Daten und Informationen zugegriffen wird.

¹ Mit einer URI wird einer abstrakten oder physischen Ressource ein eindeutiger Identifikator zugewiesen. Im Internet werden damit u.a. Webseiten oder EMail-Adressen identifizieren. Abseits der web-adressierten Ressourcen werden URI beispielsweise für die Identifikation von Bücher mittels der Internationale Standardbuchnummer (ISBN) verwendet [HKR+08, S.26].

² Der Unicode ist ein internationaler Standard, mit dem jedem Zeichen ein eindeutiger digitaler Code zugewiesen wird (z. B. @ = 0040, A = 0041, b = 0062) [The12-ol].

³ Mit der Auszeichnungssprache Extensible Markup Language (XML) lassen sich die Inhalte von Dokumenten strukturieren und zwischen unterschiedlichen Systemen austauschen. Für eine semantische Verarbeitung der Daten reicht XML alleine jedoch nicht aus [HKR+08, S.29f.].

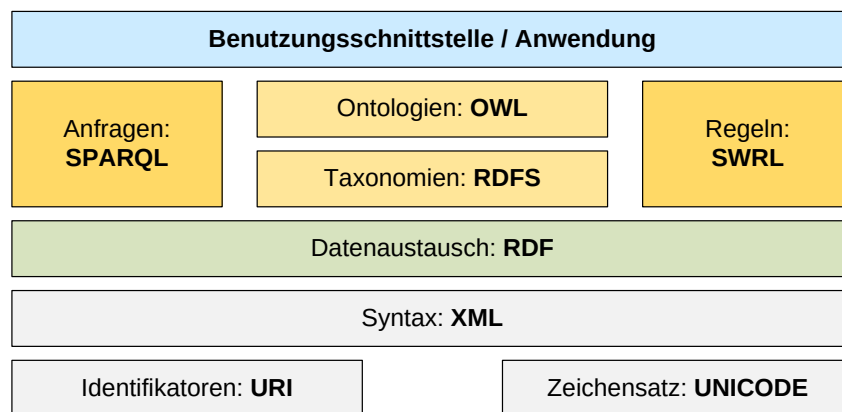


Bild 2-16: Ebenen der Wissensrepräsentation (Semantic Web Stack) nach [Bra06-ol]

2.7.2.1 Datenmodellierung mit dem Resource Description Framework

Das Resource Description Framework ist das zentrale Datenmodell mit dem Daten und Informationen im Internet repräsentiert werden. Mit dem RDF lassen sich beliebige Objekte (Ressourcen) modellieren und mit anderen Ressourcen in Beziehungen setzen. Die Daten werden in sogenannten *Tripeln* abgelegt. Jedes Tripel ist eine elementare Aussage über eine Ressource, die immer im Format Subjekt-Prädikat-Objekt vorliegen. Aus den verschiedenen Aussagen ergibt sich somit ein gerichteter Graph. Das **Subjekt** bezieht sich auf einen Knoten im Graph und gibt die zu beschreibende Ressource an. Mit dem **Prädikat** wird die Beziehung zwischen zwei Knoten bzw. Ressourcen definiert. Das **Objekt** ist folglich der Endknoten, der neben einer Ressource auch ein konkreter Datenwert sein kann. Sowohl die einzelnen Knoten als auch die verbindenden Kanten werden über einen Uniform Resource Identifier spezifiziert. Die Kanten werden im Resource Description Framework als Informationseinheiten betrachtet, da sie eine Aussage über die Beziehung zwischen zwei Objekten abbilden [CWL14-ol], [HKR+08, S.35ff.]. Bild 2-17 zeigt ein einfaches RDF-Beispiel mit 3 Tripeln zur Beschreibung eines Buchs. Es wird über einen Titel näher spezifiziert (Triple 1) und mit einem Verlag in Beziehung gesetzt (Triple 2). Für den Verlag wird der Namen angegeben (Triple 3).

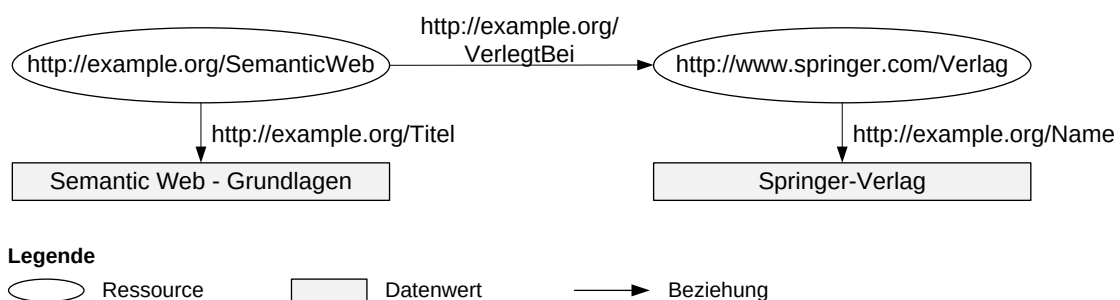


Bild 2-17: RDF-Beispiel mit Ressourcen und Datenwerten [HKR+08, S. 39]

RDF definiert zunächst nur das abstrakte Datenmodell, jedoch nicht die maschinenlesbare Repräsentation der Daten. Hierzu stehen unterschiedliche Formate zur Verfügung, z. B. RDF/XML (.rdf) oder Turtle (.ttl). Mit dem W3C-Standard RDF/XML wird der RDF-Graph in einem XML-Dokument abgebildet [GS14-ol]. Dies erlaubt eine leichte Verarbeitung der Daten mit XML-Parsern. Weit verbreitet ist zudem die Turtle-Syntax [BBP+14-ol]. Sie ermöglicht eine kompaktere Darstellung und ist für den Menschen einfacher lesbar. Für das gezeigte Bücherbeispiel sind in Bild 2-18 die drei Triple in der Turtle-Syntax dargestellt. Zu Beginn werden die verwendeten Namensräume aufgeführt und Abkürzungen (Präfixes) vergeben. Über die Namensräume können die verwendeten Namen für Ressourcen und Beziehungen eindeutig identifiziert werden. Die einzelnen Triple sind in der vorgestellten Subjekt-Prädikat-Objekt-Reihenfolge zu lesen.

```
@prefix ex: <http://example.org/> .
@prefix springer: <http://springer.com/> .

ex:SemanticWeb      ex:Titel      "Semantic Web - Grundlagen" .
ex:SemanticWeb      ex:VerlegtBei springer:Verlag .
springer:Verlag      ex:Name       "Springer-Verlag" .
```

Bild 2-18: RDF-Graph in der Turtle-Syntax [HKR+08, S. 41]

Die Speicherung und Verarbeitung von RDF-Daten erfolgt in sogenannten *RDF Stores*, *Data Stores* oder *Triple Stores*¹. Hierbei handelt es sich um spezielle Datenbanken die auf die Auswertung von RDF-Daten spezialisiert sind. Das Vokabular² des Resource Description Framework eignet sich dazu einzelne Ressourcen zu beschreiben, sie in Beziehung zu setzen und ihnen einen bestimmten Typ zuzuweisen. RDF definiert zwar die grundlegende Syntax für die Datenmodellierung und den Datenaustausch, bietet jedoch nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten der Wissensmodellierung.

2.7.2.2 Wissens- / Ontologiemodellierung

Als Erweiterung von RDF und zur Interpretation der RDF-Daten wurden das **Resource Description Framework Schema** (RDFS³) entwickelt [BG14-ol]. Mit Hilfe des RDFS-Vokabulars ist es möglich, Klassen expliziert zu definieren, Hierarchien aufzustellen,

¹ Alle drei Begriffe beziehen sich auf dasselbe System, so dass sie synonym verwendet werden können [Yu11, S. 243]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird durchgehend der Begriff *Triple Store* verwendet. Zur Darstellung von *Tripeln* wird die *Turtle*-Syntax genutzt.

² Unter Vokabular wird ein Satz von Bezeichnungen für Individuen, Beziehungen und Klassen verstanden. Das RDF-Vokabular ist verfügbar unter: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns>.

³ Das RDFS-Vokabular ist verfügbar unter: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema>.

Eigenschaften und Datenwerte genauer zu spezifizieren. Mittels RDFS wird ein terminologisches Wissen oder auch Schemawissen über den betrachteten Wissensbereich aufgebaut. Die Abbildung des Faktenwissens erfolgt weiterhin mit dem RDF. Die definierte Semantik basiert auf formaler Logik und erlaubt logische Schlussfolgerungen (Inferenzen), beispielsweise das Ableiten aller Eigenschaften einer Oberklasse auf die Unterklassen. RDFS ist eine Wissensrepräsentations- oder Ontologiesprache mit der sich Taxonomien und einfache Ontologien umsetzen lassen [HKR+08, S. 91ff.].

Die Web Ontology Language (OWL)¹ ist, wie das Resource Description Framework Schema, eine Wissensrepräsentations- oder Ontologiesprache und definiert ein einiges Vokabular zur Modellierung von Ontologien. Diese bestehen wie bei RDFS im Wesentlichen aus Klassen und Beziehungen. Letztere werden in OWL als Eigenschaften (englisch *Properties*) bezeichnet und teilen sich auf in *ObjectProperties* sowie *DataProperties*. ObjectProperties verbinden Instanzen mit Instanzen oder Klassen mit Klassen. DataProperties weisen einer Instanz einen Datenwert zu. Für die Modellierung von Klassen und Beziehungen bietet OWL eine Reihe von Ausdrücken. Dabei baut OWL auf dem RDFS-Vokabular auf, erweitert die Modellierungsmöglichkeiten (z. B. Merkmale für Eigenschaften, Kardinalität, Äquivalenz) und ermöglicht die Repräsentationen von komplexeren Wissensbestandteilen. Jedes gültige OWL-Dokument ist somit auch ein gültiges RDF-Dokument [HKR+08, S.126f.], [Yu11, S. 158ff.].

Für die Ontologiemodellierung bietet die Web Ontology Language drei Untersprachen (Profile) mit steigender Ausdrucksfähigkeit [MH04-ol]:

- *OWL Lite* schränkt den Modellierungsumfang am meisten ein und dient dazu Hierarchien mit einfachen Restriktionen zur modellieren.
- *OWL DL*² verwendet das vollständige OWL-Vokabular, definiert jedoch genaue Restriktionen für die Modellierungen. Dadurch ist gewährleistet dass die vorliegenden Daten vollständig verarbeitet werden können und Schlussfolgerungen auf Basis des vorliegenden Wissens in einer endlichen Zeit verfügbar sind.
- *OWL Full* verwendet ebenfalls das vollständige OWL-Vokabular, die Modellierungseinschränkungen beziehen sich nur auf die der RDF-Syntax. Diese Freiheit führt dazu, dass modellierte Daten nicht zwangsläufig semantisch verarbeitet werden können und keine Schlussfolgerungen gezogen werden könnten.

¹ Die Web Ontology Language ging aus der Ontologiesprache DAML+OIL hervor, die wiederum auf der DAML (DARPA Agent Markup Language), SHOE (Simple HTML Ontology Extensions) und OIL (Ontology Inference Layer) basiert. Im Jahr 2004 wurde OWL eine Empfehlung des W3C [MH04-ol] und ist in manchen Bereichen der de-Facto-Standard für die Ontologiemodellierung [Yu11, S. 157]. In den folgenden Jahren wurde OWL weiterentwickelt und zusätzliche Modellierungsmöglichkeiten hinzugefügt. Seit 2009 liegen diese Erweiterungen als OWL 2 ebenfalls als Empfehlung des W3C vor, inzwischen in einer zweiten Edition [W3C12-ol].

² Das Kürzel *DL* bezieht sich auf die Beschreibungslogik (englisch Description Logic). Die Beschreibungslogik bzw. terminologische Logik ist ebenfalls eine Wissensrepräsentationssprache.

Durch den Kompromiss zwischen Modellierungsfreiheit und Entscheidbarkeit wird in den meisten Anwendungen OWL-DL für die Ontologiemodellierung verwendet. Das OWL-Profil wird im Gegensatz zu OWL Full von sehr vielen Softwarewerkzeugen unterstützt [HKR+08, S. 127].

2.7.2.3 Wissensverarbeitung und Wissensabfrage

Ontologien die mit RDFS oder OWL erstellt wurden, bieten aufgrund der formalen Semantik bereits die Möglichkeit Schlussfolgerungen zu ziehen. Hierzu werden spezielle Softwareprogramme verwendet, die sogenannten **Reasoner**¹. Der Reasoner interpretiert ein vorliegendes RDF-Dokument und erzeugt, unter Verwendung der vorliegenden Ontologieinformationen, neue Triple in der Wissensbasis. Die *inferrierten* Triple sind kein neues Wissen sondern Wissensbestandteile die vorab nur implizit in der Wissensbasis vorlagen [Yu11, S. 471].

Regeln

Weiteres Wissen lässt sich über Regeln inferrieren, die zusätzlich zu den Sprachelementen der Ontologiesprache verwendet werden. Vorhandene Axiome der Ontologie werden durch die Regeln ergänzt. Die Semantic Web Rule Language (SWRL) bietet diese Möglichkeiten für die Web Ontology Language, durch die Kombination von Sprachelementen von OWL DL und OWL Lite mit der Unary/Binary Datalog RuleML [HPB+04-ol]. Eine SWRL-Regel besteht aus den Bestandteilen *antecedent* (Bedingungsteil) und dem *consequent* (Aktionsteil). Beide Teile werden durch Atome beschrieben, die mit einem *logischen UND* verknüpft werden können. Ein Atom wird mittels der OWL-Sprachelemente (Klassen, Beziehungen) erstellt und bezieht sich auf Variablen (Instanzen oder Wertebereiche). Sind die *antecedent*-Atome erfüllt, müssen ebenfalls die *consequent*-Atome erfüllt sein. Es ergibt sich eine Wenn-Dann-Regel. Zusätzlich bietet SWRL Erweiterungen, die sogenannten Built-Ins, mit denen sich beispielsweise Zahlenwerte, Stringeingaben oder Datumsangaben prüfen lassen oder Berechnungen durchgeführt werden können. Die Built-Ins werden als Atome im *antecedent*-Teil modelliert. Die nachfolgende Regel ermittelt, ob eine Instanz der Klasse *Book* einen Preis besitzt der größer als 200 ist. Ist dies der Fall, wird die Instanz auch der Klasse *ExpensivBook* zugeordnet.

```
Book(?book), hasPrice(?book, ?price), swrlb:greaterThan(?price, 200)
-> ExpensivBook(?book)
```

Die Ausdrücke *?book* und *?price* sind Variablen, die als Platzhalter für Individuen verwendet werden. Mit *?book* werden die Instanzen der Klasse *Book* erfasst, mit *?price* der

¹ Für die verschiedenen Ontologiesprachen gibt es eine Reihe kommerzieller und frei verfügbarer Reasoner.

jeweilige Wert des DataProperties *hasPrice*. Der Abgleich der Werte erfolgt über das Built-In *swrlb:greaterThan*. Die Verarbeitung der Regeln erfolgt durch den Reasoner.

SPARQL-Abfragen

Zur Abfrage von RDF-Daten wird die graph-basierte Abfragesprache SPARQL¹ verwendet [W3C13-ol]. Ein Abfragemuster besteht aus einem einfachen RDF-Graphen in Turtle-Syntax, in dem die zu ermittelnden Elemente über Abfragevariablen abgebildet werden (Bild 2-19). Als Ergebnis werden alle Daten des Triple Stores zurückgeliefert, die mit dem aufgestellten Muster überstimmen. Die nachfolgende SPARQL-Abfrage liefert beispielsweise die Titel und Autoren für Instanzen der Klasse *ExpensiveBook* zurück.

```
PREFIX ex:      http://example.org/
PREFIX rdf:    http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#
SELECT ?author ?titel
WHERE
{
    ?book rdf:type ex: ExpensiveBook .
    ?book ex:hasAuthor ?author .
    ?book ex:hasTitle ?title . }

```

Bild 2-19: SPARQL-Abfrage zur Ermittlung teurer Bücher

Jede SPARQL-Abfrage besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen, die Definition der verwendeten Namesräume (Schlüsselwort **PREFIX**), die Angabe der Abfragevariablen (Schlüsselwort **SELECT**) und die Modellierung des RDF-Graphen (Schlüsselwort **WHERE**). Variablen werden mit einem Fragezeichen gekennzeichnet und repräsentieren zunächst Platzhalter, die im Zuge der Abfrage mit Werten der Variablen ausgefüllt werden. Als Rückgabe werden die Werte für die Abfragevariablen angegeben. Die Variable *?book* wird innerhalb der Abfrage zur Verknüpfung der einzelnen Triple verwendet. Somit dient *?book* als Platzhalter für Bücherinstanzen innerhalb der Klasse *ExpensiveBook*, für die sowohl Titel als auch Autor angegeben sind [HKR+08, S. 202ff.].

Für erweiterte Anfragen stellt SPARQL eine Reihe von unterschiedlichen Schlüsselwörtern zur Verfügung, über die beispielsweise optionale Triple (**OPTIONAL**) in die Anfrage einbezogen, die Ergebnisse limitiert (**LIMIT**) oder sortiert (**ORDER**) werden können [HS13-ol]. Modifikation an RDF-Daten in einem Triple Store sind ebenfalls mit SPARQL möglich [GPP13-ol].

¹ SPARQL ist ein rekursives Akronym für **SPARQL Protocol And RDF Query Language** [Yu11, S. 241]

2.7.3 Fazit und Einordnung der Arbeit

Semantischen Technologien bieten umfangreiche Möglichkeiten für die maschinenverständliche Modellierung von Daten und Informationen sowie deren Verarbeitung und Abfrage. Mit einer Ontologie lassen sich die vorliegenden Daten eines Wissensbereichs strukturieren und auf Basis der formalen Semantik automatisch Schlüsse ziehen. Die einzelnen Technologien werden vom W3C kontinuierlich weiterentwickelt und der Funktionsumfang beispielsweise von SPARQL stetig erweitert. Somit ist davon auszugehen, dass semantische Technologien in den nächsten Jahren den Umgang mit Wissen in der Informationsgesellschaft maßgeblich beeinflussen werden. Im Rahmen des Projekts EN-TIME wurde der Einsatz semantischer Technologien für den Entwurf mechatronischer Systeme erforscht und der Nutzen aufgezeigt [GTS14]¹. Die Suche nach realisierten und bewährten Lösungen wird vereinfacht und deren Wiederverwendung verbessert.

Das in dieser Arbeit adressierte Planungswerkzeug soll den Anwender bei der Suche und Wiederverwendung von Lösungswissen während der Produktionssystemkonzipierung unterstützen. Es dient als Bindeglied zwischen der graphischen Modellierung von Produktionssystemkonzepten mit CONSENS auf der einen Seite und der computerverständlichen Modellierung von Wissen über Produktionssysteme auf der anderen Seite. Das Werkzeug soll dem Anwender den Zugriff und die Verarbeitung von Fachwissen während der Modellierung des Produktionssystemkonzepts ermöglichen, jedoch nicht die Planungsaufgabe selbstständig durchführen.

2.8 Problemabgrenzung

Produzierende Unternehmen sehen sich zukünftig neuen Herausforderungen gegenüber. Neue Produkttechnologien erfordern neue Produktionsverfahren, damit Herstellbarkeit und die geforderte Produktqualität erreicht werden. Kürzere Produktlebenszyklen führen dazu, dass Produktionssysteme immer schneller geplant werden müssen. Interdisziplinäre Entwicklungsteams müssen ein gemeinsames Verständnis für das Entwicklungsprojekt erlangen. Das Wissen über bestehende oder neue Produktionsprozesse, Bauteile und Maschinen ist häufig mitarbeitergebunden. Dieses Wissen gilt es im Unternehmen zu halten und anderen Mitarbeitern zur Verfügung zu stellen [AR11, S. 10ff.].

Einem Teil der geschilderten Herausforderungen kann mit einer integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem begegnet werden. Gemäß dem 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER startet diese bereits während der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem [GP14, S. 26]. Die von NORDSIEK und BRANDIS erarbeiteten Systematiken², unterstützen die Entwickler bei der Konzipierung des Produktionssystems auf Basis

¹ Der grundlegende Ansatz ist in Anhang A1 beschrieben.

² Ein Bestandteil der jeweiligen Systematik ist ein Vorgehensmodell. Diese sind im Anhang A2 aufgeführt.

der Prinzipiösung des Produkts [Nor12], [Bra14]. Damit wird sichergestellt, dass Wechselwirkungen mit der Produktentwicklung berücksichtigt, Probleme im Herstellprozess frühzeitig erkannt und teure Folgekosten¹ vermieden werden. Die generellen Phasen der Produktionssystemkonzipierung (Kapitel 2.3.1) bilden das Rahmenwerk für diese Arbeit. Für die weitere Ausarbeitung des Produktionssystems, muss die Prinzipiösung die Planungsinformationen für die Arbeits- bzw. Fabrikplanung bereitstellen. Dies erfordert ein Informations- und Datenmanagement zwischen den beteiligten Personen und Abteilungen [ES05, S. 21f.].

Je nach Umfang und Komplexität des Produktionssystems benötigt der Entwickler für die Konzipierung umfangreiche Informationen über Materialelemente, Prozesse und Ressourcen. Das notwendige Wissen ist häufig in Unternehmen vorhanden. Gerade in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) wird es meist gar nicht oder nur unzureichend dokumentiert [AR11, S. 162]. Aus unterschiedlichen Quellen müssen die Informationen gesammelt und in handlungsrelevantes Wissen überführt werden [BF06, S. 233]. Semantische Technologien bieten die Möglichkeiten diese Informationsbereitstellung zu verbessern. Daraus ergeben sich für Unternehmen folgende **Nutzenpotentiale**:

- **Effizientere Suche nach Informationen:** Mit dem Wandel zur Informationsgesellschaft steigt die Menge an Daten, Dokumenten und Informationen kontinuierlich an. Semantische Technologien erlauben die Strukturierung und Organisation von Daten und ermöglichen neue Suchalgorithmen. Dies verbessert u.a. die Suche nach Informationen, hilft bei der Bewältigung der Informationsflut und der Wiederverwendung von Dokumenten [MZK+10, S. 296].
- **Transfer von Planungswissen:** Die Wissensarbeit wird für Unternehmen zunehmend wichtiger. Ein zentraler Punkt ist der Transfer von Wissen auf andere Personen oder andere Problemstellungen [AR11, S. 67]. Mit semantischen Technologien lassen sich sowohl Faktenwissen als auch prozedurales Wissen maschinenverständlich aufbereiten und speichern. Andere Entwickler und Planer können darauf zugreifen und für neue Planungsprojekte nutzen.
- **Reduzierung des Planungsaufwands:** Durch die maschinenverständliche Aufbereitung der Informationen, lassen sich Planungsaufgaben teil-automatisieren [AR11, S. 45ff.]. Ein wissensbasiertes System kann anhand einer fallspezifischen Prozessbeschreibung beispielsweise ermitteln, welche Maschinen für die Bearbeitung in Frage kommen und eine Ressourcenmatrix aufstellen. Eine aufwändige manuelle Suche in unterschiedlichen Informationsquellen entfällt.

¹ Nach CLARK und FUJIMOTO steigen die Kosten für die Fehlerbeseitigung mit jedem Entwicklungsschritt um den Faktor zehn [CF92].

Grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Integration semantischer Technologien in die Produktionssystemkonzipierung ist eine abgestimmte Softwareunterstützung¹. Diese muss sich an den Bedürfnissen des Endanwenders orientieren, in diesem Fall dem Produktionssystemplaner. Die Softwareunterstützung umfasst die Modellierung des Produktionssystems mit CONSENS sowie die Aufbereitung und Nutzung des Wissens über Materialelemente, Prozess und Ressourcen. Im Hinblick auf eine wissensbasierte Produktionssystemkonzipierung bestehen derzeit folgende **Defizite und Herausforderungen**:

- **Softwaretechnische Umsetzung der Spezifikationstechnik CONSENS:** Im Projekt VireS wurde ein Softwareprototyp für die Umsetzung von CONSENS entwickelt, dieser unterstützt die Aspekte des Produktionssystems nur unzureichend. Lediglich das Ableiten einer ersten Prozessfolge anhand der Wirkstruktur wird unterstützt. Die Aspekte Ressourcen und Gestalt fehlen gänzlich [GLL12, S. 122f.].
- **Formalisierungsgrad der Partialmodelle:** Die Spezifikationstechnik CONSENS wurde in erster Linie als Kommunikationsmittel für interdisziplinäre Teams entwickelt. Anhand weniger graphischer Elemente werden Prozessfolge und Ressourcendiagramm visualisiert und ermöglichen so ein einfaches Verständnis für das System. Es liegt ein semi-formales Modell des Produktionssystems vor [Rey11, S. 107f.]. Dem gegenüber stehen die formalen semantischen Technologien für die maschinenverständliche Aufbereitung der Planungsinformationen.

Eine wesentliche Herausforderung im Hinblick auf eine wissensbasierte Produktionssystemkonzipierung ist die Kombination der graphischen Repräsentation mit CONSENS und der maschinenverständlichen Repräsentation mit semantischen Technologien. Es ist sicherzustellen, dass modellierte Informationen von Mensch und Maschine gleich interpretiert werden. Das IT-System muss verstehen welche Informationen der Anwendung zur Bewältigung einer vorliegenden Planungsaufgabe benötigt [BF06, S. 236].

- **Anwendungs- und benutzerorientierter Wissensnutzung:** Für die Wissensaufbereitung stehen Ontologie-Editoren² zur Verfügung. Mit ihnen lassen sich Ontologien modellieren, Instanzen beschreiben, Regeln erstellen und Anfragen ausführen. Damit bieten sie im Prinzip alle Funktionen für den Transfer und die Nutzung von Wissen. Die Editoren erfordern allerdings detaillierte Kenntnisse über die eingesetzten semantischen Technologien und eignen sich daher besser für den Aufbau einer Wissensbasis durch den Knowledge Engineer.

¹ Der Einsatz eines digitalen Planungswerkzeugs ist immer auf die Art und den Umfang des jeweiligen Planungsprojekts abzustimmen [NHK+09, S. 130].

² Einer der bekanntesten Editoren ist Protégé von der Stanford University (<http://protege.stanford.edu>). Er ist frei verfügbar, unterstützt die Standards (RDF, OWL, SPARQL) des World Wide Web Consortium und erlaubt den Einsatz von Reasonern.

Für den Produktionssystemplaner müssen die Informationen entsprechend der jeweiligen Planungsphase aufbereitet werden. So ist es nicht zwingend notwendig zu jedem Zeitpunkt alle Informationen über einen Prozess oder eine Maschine zu erhalten. Das IT-System muss anhand der formulierten Problemstellung die Informationsmenge filtern und bedarfsgerecht anzeigen [BHM+06, S. 34], [BF06, S. 238].

Aus den aufgezeigten Defiziten ergibt sich ein Bedarf nach einem *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung*. Das Werkzeug soll die Produktionssystemplaner unterstützen und die Vorteile einer intuitiven graphischen Modellierung mit den Potentialen semantischer Technologien kombinieren. Dies umfasst die Modellierung der Partialmodelle Prozesse, Ressourcen und Gestalt sowie die bedarfsgerechte Bereitstellung von Planungswissen. Die zu durchlaufenden Planungsschritte ordnen sich dazu in das Vorgehen zur Produktionssystemkonzipierung nach GAUSEMEIER ET AL. ein [GDK+11, S. 775]. Weiterhin sind die Planungsinformationen zum Abschluss der Konzipierung in geeigneter Weise zu exportieren und für die weitere Ausarbeitung zur Verfügung zu stellen. Auf Grundlage der Problemanalyse werden die folgenden Anforderungen an ein *wissensbasiertes Planungssystem zur Produktionssystemkonzipierung* gestellt.

Vorgehensweise und Spezifikation

A1) Einordnung in die bestehende Entwicklungsmethodik: Für die Konzipierung von Produktionssystemen existiert ein generelles Vorgehen, welches die notwendigen Arbeitsschritte definiert. Die wissensbasierte Produktionssystemkonzipierung muss sich in die bestehende Entwicklungsmethodik einordnen. Eine systematische Vorgehensweise stellt die zielgerichtete Kombination der graphischen Modellierung und der Nutzung semantischen Technologien sicher.

A2) Eindeutige graphische Modellierung: Die graphische Modellierung der unterschiedlichen Produktionssystemaspekte dient den beteiligten Entwicklern als Kommunikationsmedium während der Konzipierungsphase. In den Partialmodellen wird das projektspezifische Problemwissen festgehalten, für das Lösungen gesucht werden. Die graphische Modellierung muss dahingehend eindeutig sein, dass die modellierten Informationen von menschlichen Betrachtern gleich interpretiert werden und sich Fragestellungen an die Wissensbasis daraus ableiten lassen.

Wissensrepräsentation

A3) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitsablaufplanung: Im Partialmodell Prozesse werden die Planungsinformationen für die Arbeitsablaufplanung spezifiziert. Sie umfassen die Reihenfolge der Fertigungs- und Montageprozesse und die Verweise auf die umsetzenden Bearbeitungssysteme. Das Planungswerkzeug muss den Zugriff auf Fachwissen zur Modellierung der Prozessfolge ermöglichen. Die Wissensrepräsentation muss Konzepte für die unterschiedlichen Produktionsprozesse bereitstellen.

A4) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitssystemplanung: Die Prozessfolge bildet den Ausgangspunkt für die weitere Konzipierung auf Ressourcenebene. Je nach Planungsebene und Planungsaufgabe (Layoutplanung, Materialflussplanung, Mitarbeiterplanung etc.) rücken andere Aspekte des Produktionssystems in den Fokus. Die Wissensrepräsentation muss dies berücksichtigen und Konzepte zur Abbildung unterschiedlicher Ressourcen- und Layoutinformationen vorsehen.

A5) Flexible Wissensrepräsentation für die Konzipierungsphase: Der Umfang eines Produktionssystemkonzepts lässt sich nicht allgemeingültig festlegen. Je nach Unternehmen, Produkt oder Projekt ergibt sich ein unterschiedlicher Detaillierungsgrad, in dem die Prinzipiellösung vorliegen muss. Somit variiert der Bedarf an notwendigen Fachwissen. Die Wissensrepräsentation muss dies berücksichtigen und den individuellen Aufbau von Wissensbasen erlauben. Für die Kombination mit der graphischen Modellierung muss eine eindeutige Zuordnung der abgebildeten Wissensseinheiten auf die CONSENS-Elemente gewährleistet sein.

Anwendung und Wissensnutzung

A6) Intuitive Anwendung und Modellierungsunterstützung: Die Erarbeitung der Partialmodelle verursacht einen zusätzlichen Aufwand bei der Produktionssystementwicklung. Das Planungswerkzeug muss durch eine intuitive Anwendung sowie eine gezielte Modellierungsunterstützung den Mehraufwand so gering wie möglich halten. Dadurch lassen sich Hemmschwellen für den Einsatz neuer Entwicklungssystematiken und Softwarewerkzeugen zur Produktionssystemkonzipierung überwinden.

A7) Anwenderorientierte Wissensnutzung: Semantische Technologien bieten umfangreiche Möglichkeiten, den Umgang mit vorhandenem Wissen zu verbessern. Aus Sicht des Produktionssystemplaners ist die technische Umsetzung zum Finden einer passenden Lösung nicht interessant. Der Zugriff auf Fachwissen und das Aufbereiten von Ergebnissen ist so zu gestalten, dass die Ergebnisse direkt in den Planungs- und Modellierungsprozess integrieren werden.

A8) Unterstützung der frühzeitige Bewertung: Neben der Erarbeitung der Produktionssystemaspekte, ist die Absicherung des Konzepts in der frühen Planungsphase von Bedeutung. Hierzu ist Fachwissen über die Analyse- und Bewertungsmethoden erforderlich. Weiterhin sind die Planungsinformationen für die eingesetzten Simulationsprogramme aufzubereiten.

3 Stand der Technik

Inhalt dieses Kapitels sind Arbeiten und Ansätze zur Unterstützung der Entwickler während der Planung von Produktionssystemen sowie Ontologien zur maschinenverständlichen Abbildung von Planungswissen. In Kapitel 3.1 werden zunächst Arbeiten betrachtet, die eine wissensbasierte Modellierung von Produktionssystemen fokussieren. Anschließend werden in Kapitel 3.2 Ontologien im Kontext Produktion und Produktionssysteme vorgestellt. Die Ansätze adressieren vorwiegend die semantische Repräsentation von Fachwissen, ohne eine direkte Werkzeugunterstützung für den Planungsprozess. Zum Ende des Kapitels wird der Stand der Technik gegen die gestellten Anforderungen bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

3.1 Planungswerkzeuge für die wissensbasierte Produktionssystementwicklung

Die Produktionssystementwicklung erstreckt sich über mehrere Planungsebenen und unterschiedliche Aufgabenstellungen. Nachfolgend werden Planungswerkzeuge präsentiert, die den Anwender durch einen wissensbasierten Ansatz bei der Entwicklung unterstützen.

3.1.1 Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung SCHADY

Ziel der von SCHADY entwickelten Methode, ist eine verbesserte Informations- und Wissensversorgung für den Fabrikplaner im Kontext der Digitalen Fabrik [Sch08, S. 7]. Anwendungsfälle sind die Fabrikplanung, das Änderungsmanagement und der Fabrikbetrieb. Ein wissensorientiertes Fabrikmodell beinhaltet Wissen, welches als Eingangsinformation zur Lösung von Problemstellungen dient [Sch08, S. 43]. Dem Nutzer des Fabrikmodells werden Informationen und Wissen kontextsensitiv und zielgerichtet zur Verfügung gestellt. Hierzu kombiniert SCHADY semi-formale und formale Modellierungsmethoden (Tabelle 3-1). Die semi-formale Modellierung richtet sich an den Nutzer und repräsentiert das Wissen in Form von Formularen. Für die formale Modellierung wird ein hybrider Modellierungsansatz aus einem Objektmodell und einem Relationenmodell verwendet.

Das Objektmodell beinhaltet drei Partialmodelle, mit denen die drei Fabrikaspekte Fabrikelement¹, Fabrikprozess² und Produktelemente³ abgebildet werden.

Tabelle 3-1: Modellierungselemente für die wissensbasierte Fabrikmodellierung nach [Sch08, S. 142]

	Objektmodell (3 Partialmodelle)			Relationenmodell
	PE-Modell	FP-Modell	FE-Modell	
Modellierungsmethoden	Objektorientierte Modellierung (OOM) Unified Modeling Language (UML)			Description Logics (DL)
Adaption an den Modellzweck: Wissensorientierte Fabrikmodellierung für die Anwendungsgebiete Fabrikplanung, Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb	• Aufnahme von Features in die Produktstruktur • Produktattribute	• Erweiterung des Prozessbegriffs • Prozessketten • Prozessgruppen • Prozesshierarchien • qualitative und quantitative FP-Attribute • Attribut- und Prozessoperationen • Systematik (Ordnungen von Fabrikprozessen)	• Erweiterung des Ressourcenbegriffs • qualitative und quantitative FE-Attribute • Funktions- und Objektoperationen • Systematik (Ordnungen von Fabrikelementen)	• Systematik von Relationen zwischen Elementen der Partialmodelle

Legende: PE = Produktelement FP = Fabrikprozess FE = Fabrikelement

Im **Fabrikelement-Modell** werden die Ressourcen wie Maschinen, Werkzeuge oder Transportmittel erfasst, jedoch keine Mitarbeiter. Diese werden nur indirekt über die Planung der Fabrikelemente mit denen sie agieren berücksichtigt. Fabrikelemente werden hinsichtlich ihres Gestaltungsbereichs, ihrer Subklassenbeziehungen und ihren Planungs-

¹ Definition Fabrikelement (FE): „Unter einem Fabrikelement 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 Gestaltungsbereiche - Betriebsmittel, Raum und Gebäudetechnik oder Organisation - zugeordnet werden kann. Ein Fabrikelement lässt sich in weitere Fabrikelemente zerlegen.“ [Sch08, S. 57f.]

² Definition Fabrikprozess (FP): „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.“ [Sch08, S. 66]

³ Produktelemente (PE) sind das fertige Produkt, Baugruppen, Bauteile und Bauteilfeature [Sch08, S. 79].

feldern (z. B. Standort-, Struktur-, Bautechnik- oder Energieversorgungsplanung) klassifiziert. Beschrieben werden Fabrikelemente über Attribute sowie Funktions- und Objektoperationen. Attribute werden in quantitative Attribute (z. B. Länge, Breite) und qualitative Attribute (z. B. Mobilität einer Maschine) unterschieden. Funktionsoperationen beziehen sich auf die Funktionen die ein Fabrikelement selbst durchführen kann, etwa „Drehen“ oder „Einspannen“. Objektoperationen sind Aktivitäten die an einem Fabrikelement durchgeführt werden, wie „Versetzen“ oder „Instandhalten“.

Mit dem **Fabrikprozess-Modell** werden alle Funktionen der Fabrik erfasst, die für einen der Anwendungsfälle zu berücksichtigen sind. Zur Zielsetzung des FP-Modells gehören die Definition der notwendigen Funktionen für die FE-Gestaltung, die Festlegung der Bedingungen für die FE-Auswahl, die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Fabrik und die Abbildung der Produkt-Fabrikelemente-Beziehung. Energie- und Informationsflüsse werden im Modell vernachlässigt und der Materialfluss nur indirekt über die Prozesskette abgebildet. Fabrikprozesse werden ebenfalls über Attribute und Operationen beschrieben.

Im **Relationenmodell** sind die Beziehungen zwischen Klassen, zwischen Attributen, zwischen Operationen sowie zwischen Attributen und Operationen abgebildet. Ergänzt werden sie um Restriktionen, allgemeingültige Regeln und Expertenwissen in Form von Produktionsregeln. Ausgehend von Objekt- und Relationenmodell wird ein Referenzmodell definiert, welches Vorlagen (Klassen und Eigenschaften) zur Erstellung eines konkreten Fabrikmodells enthält. Das Referenzmodell wird unabhängig von spezifischen Problemstellung und Fabrikssystemen erstellt. In Tabelle 3-2 sind die beiden Anwendungsarten der wissensbasierten Fabrikmodellierung aufgeführt.

*Tabelle 3-2: Anwendungsarten der wissensorientierten Fabrikmodellierung
[Sch08, S. 121]*

Systemplanung und Modellaufbau	Informationsabfragen
Informationsquelle: Referenzmodell Unterstützung: • Abruf von Referenzinformationen, z. B. Gestaltungsempfehlungen für FP und FE • Bereitstellung von allgemeingültigem Planungswissen • Systematische Dokumentation von Wissen zu einem konkreten Fabrikssystem	Informationsquelle: konkretes Fabrikmodell Unterstützung: • Analyse der Wirkung von Elementveränderungen auf andere Elemente • Abruf fabrikelement- und fabrikprozessbezogener Informationen • Analyse des Einflusses von Produktänderungen auf das Fabrikssystem • Einflussanalyse für Attribute • Anzeige von Attributausprägungen mit Schnittstellen zur BDE¹

Für den Anwendungsfall *Fabrikplanung* präsentiert SCHADY ein funktionsorientiertes Planungsvorgehen. Anhand der Vorlagen des Referenzmodells werden Prozessinstanzen

¹ BDE - Betriebsdatenerfassung

erzeugt und die Soll-Ausprägungen für die Prozessattribute definiert. Unter Nutzung der Gestaltungsempfehlungen des Referenzmodells werden anschließend die Fabrikelemente ausgewählt und im Fabrikmodell abgebildet. In Verbindung mit den Produktelementen erfolgt die Ausprägung der Ist-Werte für die Attribute. Abschließend werden Soll- und Ist-Ausprägungen angenähert und evtl. Zielkonflikte zwischen Attributen aufgelöst.

Bewertung: SCHADY liefert mit seiner Methode und deren Anwendung einen umfassenden Ansatz für die Integration von Informationen und Wissen in den Fabrikplanungsprozess. Die Modellierung von Prozessen und Fabrikelementen erfolgt im Hinblick auf die fabrikspezifischen Gestaltungsbereiche. Eine Ontologieentwicklung stand nicht im Fokus der Arbeit von SCHADY, er verweist jedoch auf diese Möglichkeit für die Wissensverarbeitung [Sch08, S. 91]. Die Spezifikation von Prozessen und Fabrikelementen bildet eine gute Grundlage für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Ontologie.

3.1.2 Ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion nach KÖSTERS

Das von KÖSTERS erarbeitete Modell kombiniert eine Ontologie zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem mit einer graphischen Notation. Die graphische Modellierung dient den Planern als Hilfsmittel zum Austausch über ein reales oder geplantes Produktionssystem. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den diskreten Abläufen des Systems. Kernelemente des Ansatzes sind eine Basisontologie, eine Domänenontologie und die Modellierungsmethode. In der Basisontologie sind domänenunabhängige und wiederverwendbare Klassen modelliert. Darauf aufbauend definiert die Domänenontologie die spezifischen Klassen zur Modellierung der Abläufe in einem Produktionssystem. Weiterhin bildet die Basisontologie mit ihren Klassen die Grundlage für das Metamodell der Modellierungsmethode [Kös06].

Die **Basisontologie** umfasst objektorientierte, zeitorientierte und verhaltensorientierte Konzepte. Ein *Objekt* wird als materieller Gegenstand verstanden, dessen Zustand über Attribute (Kapazitäten, Zeitpunkte, Position) spezifiziert wird. Verhaltensorientierte Konzepte umfassen Klassen, die Zustandsänderungen an den weiteren Systemklassen veranlassen. Dazu zählen *Vorgang*, *Aufgabe* und *Auftrag*. Über die zeitorientierten Konzepte *Zeitpunkt*, *Ereignis*, *Zeitintervall* und *Zeitdomäne* werden die zeitlichen Aspekte modelliert. Für jede Klasse definiert die Ontologie einen Satz an Standardattributen aus denen sich die Relationen zwischen den Klassen ergeben.

In der **Domänenontologie** erfolgt die weitere Spezialisierung hinsichtlich folgender Bereiche:

- **Produktionssystem:** Zur Strukturierung des betrachteten *Produktionssystems* lässt sich dieses in *Produktionsstufen* und diese wiederum in *Produktionslinien* aufteilen.

- **Produktionsablauf:** Der Ablauf der Produktion wird durch eine *Produktionsaufgabe* definiert, welche sich aus unterschiedlichen *Produktionsvorgängen* zusammensetzt. Für die Unterteilung der Produktionsvorgänge werden beispielsweise die Hauptgruppen der DIN 8580 verwendet.
- **Produktionsfaktoren:** Es wird zwischen Gebrauchsobjekten und Verbrauchsobjekten unterschieden. Zur ersten Gruppe gehören *Werkzeuge*, *Mitarbeiter* und *Maschinen* sowie spezielle Maschinentypen, wie *Werkzeugmaschinen* und *Fördermaschinen*. Der zweiten Gruppe sind verwendete *Werkstoffe*, *Hilfsstoffe* und *Betriebsstoffe* zugeordnet. Für die Beschaffung von Produktionsfaktoren sind spezifische Aufgaben- und Auftragsklassen definiert.
- **Produkte:** Im diesem Bereich sind Klassen für die *Erzeugnisse* des Produktionssystems sowie die Tätigkeiten des Vertriebs (*Vertriebsaufgabe*, *Vertriebsvorgang*, *Kundenauftrag*) definiert.
- **Produktionsplanung:** Die Klassen im Bereich Produktionsplanung decken die Mengenplanung, Terminplanung und Kapazitätsplanung ab. Je Planungsart sind entsprechende Aufgaben und Vorgänge modelliert.

Analog zur Basisontologie liefert die Domänenontologie Standardattribute und Relationen und stellt somit ein Grundvokabular zur Verfügung. Für den anwendungsspezifischen Einsatz sind die Klassen und Attribute entsprechend zu erweitern.

Die **Modellierungsmethode** zur Abbildung des Produktionssystems basiert grundlegend auf der Modellierungsmethode MFert (Modell der Fertigung¹). Zur Abbildung der Konzepte der Basisontologie wurden die MFert-Konstrukte angepasst.

Bild 3-1 zeigt die Anwendung der Modellierungsmethode am Beispiel einer Produktion von Bremsleitungen. Der betrachtete Teilbereich umfasst einen Montage- und einen Transportvorgang, die verwendeten Materialien sowie die eingesetzten Mitarbeiter und Maschinen. Jedes Element wird über eine Zustandstabelle spezifiziert.

¹ vgl. [Dan99, S. 13ff.]

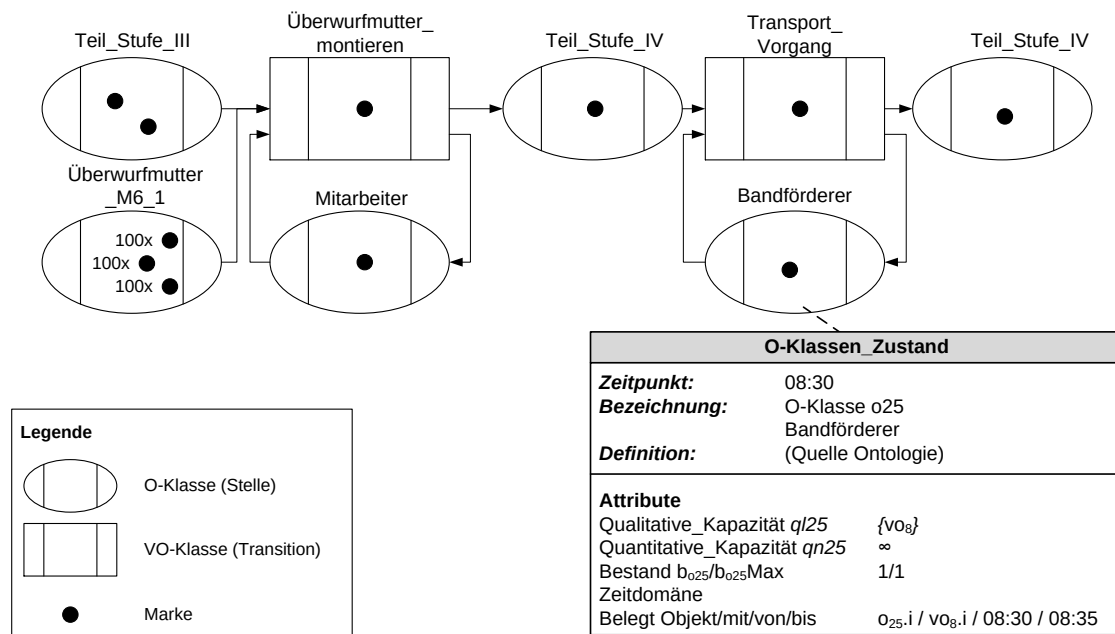


Bild 3-1: Ablauf zur Produktion von Bremsleistungen (Ausschnitt) mit Zustandstabelle nach [Kös06, S. 137]

Für softwaretechnische **Implementierung** wurde der OntoMod-Editor entwickelt. Dieser bietet dem Anwender die Möglichkeit das Produktionssystem mit den gezeigten Konstrukten zu modellieren und zu spezifizieren. Über eine Datenbankbindung wird auf die Basis- und Domänenontologie zugegriffen. Die Ontologien wurden mit Protégé erstellt und mit der Web Ontology Language umgesetzt.

Bewertung: Der Ansatz von KÖSTERS bietet sehr umfangreiche Möglichkeiten, die Abläufe in einem Produktionssystem mit einer Ontologie zu erfassen. Über die Kopplung mit den graphischen Konstrukten wird für den Anwender eine einfache Modellierungsmöglichkeit geschaffen. Der Fokus der Arbeit liegt jedoch klar auf der Produktionsplanung und weniger auf der Konzipierung eines neuen Produktionssystems im Sinne der Arbeitsplanung.

3.1.3 Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen HARMS

Die Wissensbank von HARMS unterstützt Systembetreiber und Systemintegratoren bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen während des Fabrikplanungsprozesses. Er zeigt hierfür zwei Anwendungsfälle. In der frühen Planungsphase erfolgt eine Wiederverwendbarkeitsbewertung von prozessgeeigneten Betriebsmittelklassen im Anschluss an die Strukturplanung (vgl. Strukturierung in Kapitel 2.4.3). Eingangsinformationen für die Bewertung sind Produkt- und Produktionssystemkonzept sowie die Daten zu vorhandenen Anlagen [Har10, S. 68]. Als Ergebnis liegt ein Lastenheft inkl. eines Wiederverwendungsgrobkonzepts vor. Wird die Wiederverwendung erst während der Feinplanung

der Fabrik berücksichtigt, steht die Konstruktion und Konfiguration einzelner Betriebsmittel (z. B. Industrieroboter mit Schweißzange) im Fokus.

Mit Hilfe von mehreren Ontologien (siehe Bild 3-2) werden die wissensintensiven Aufgaben bei der Wiederverwendungsplanung unterstützt. Eine Kernontologie liefert die grundlegenden Klassen und Rollen. Die Wertschöpfungsmodulontologie dient der Beschreibung der unterschiedlichen Domänen eines Wertschöpfungsmoduls (Produktionsanlage). Mit der Lebenszyklusontologie werden die Lebenszyklusdaten dem Wertschöpfungsmodul zugeordnet. Die Konzepte beider Ontologien werden für den Aufbau von unternehmens- oder anwendungsspezifischen Ontologien genutzt.

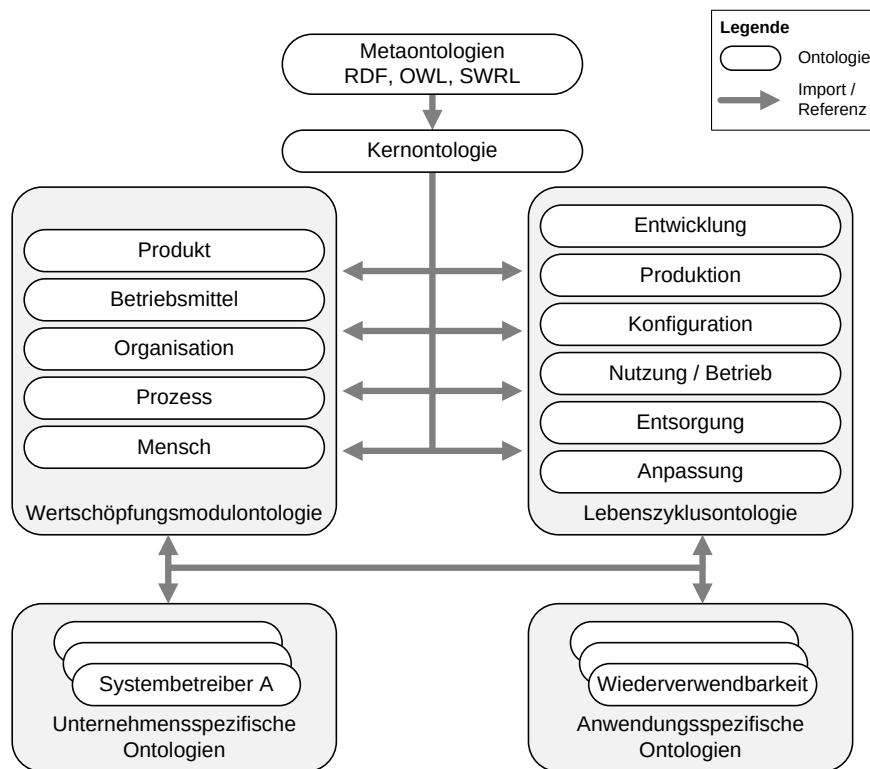


Bild 3-2: Ontologiestruktur als Grundlage der Wissensbank nach [Har10, S. 91]

Für die Klassifikation von **Betriebsmittel** und **Prozessen** werden die einschlägigen Normen¹ verwendet. Ebenso werden typische Leistungskennzahlen und Parameter für die unterschiedlichen Klassen in den Ontologien abgebildet. Zusätzlich können Nutzer eigene Klassifikationen erstellen und mit der Standardklassifikation gleichsetzen. Den Betriebsmitteln werden sogenannte Funktionalitäten zugeordnet. Diese beschreiben einen Satz an möglichen Prozessparametern, die eine Ressource ausführen kann. Die Parameter werden bei der Ressourcenplanung mit den Anforderungen abgeglichen. Für die Ermitt-

¹ z. B. Montage- und Handhabungstechnik nach [VDI2860], Fertigungsverfahren nach [DIN8580], Roboter nach [ISO8373]

lung geeigneter Betriebsmittel beschreibt HARMS die in Bild 3-3 gezeigte Inferenzstruktur¹. Wird für einen Prozess kein geeignetes Prozessmittel gefunden, wird der Prozess in seine Teilprozesse untergliedert und im Anschluss erneut nach Betriebsmittel gesucht.

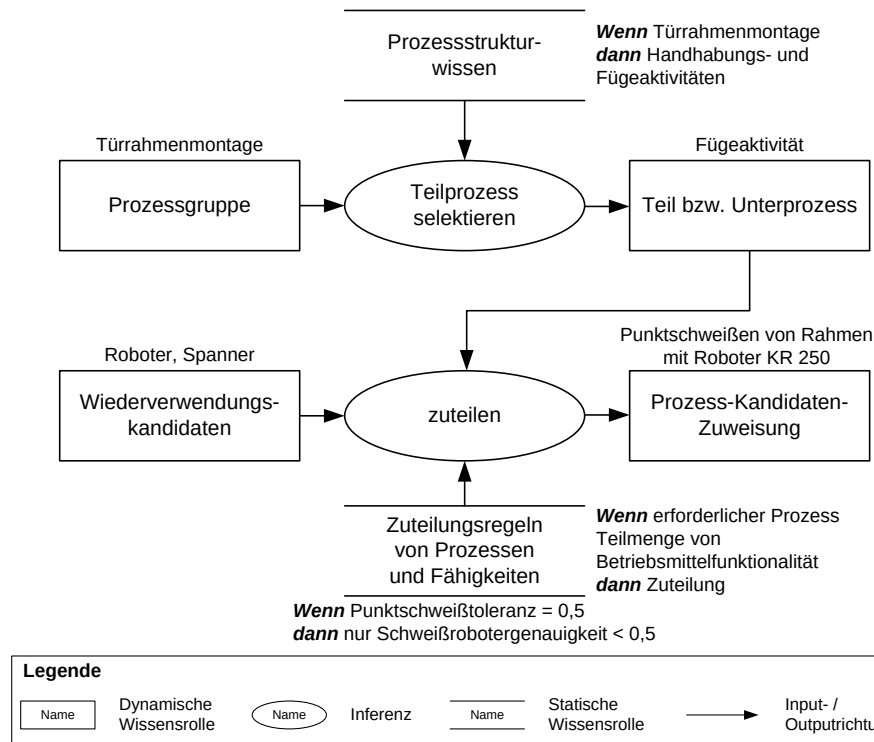


Bild 3-3: Inferenzstruktur Ermittlung prozessgeeigneter Betriebsmittel [Har10, S. 70]

Die Umsetzung der Ontologien erfolgt mit der Web Ontology Language, das Abbilden von Regeln mit der Semantic Web Rule Language. Mit dem Computer Aided Reuse Planning (CAREP) Softwareframework wird die Wiederverwendungsplanung auf Basis der semantischen Technologien unterstützt. Der Anwender definiert mit dem Protégé-Editor ein semantisches Lastenheft und übermittelt dies an den CAREP-Server. Die Serveranwendung führt auf Grundlage der Ontologien und Regeln die notwendigen Bewertungsschritte durch und liefert eine Liste der Betriebsmittel zurück.

Bewertung: HARMS zeigt mit seiner Arbeit sehr anschaulich, wie der Planungsprozess mit Hilfe semantischer Technologien unterstützt werden kann. Die webbasierte Umsetzung der Wissensbank ermöglicht den Zugriff auf Planungsdaten aus unterschiedlichen Anwendungen. Die vorgestellten Konzepte für Prozesse und Betriebsmittel entsprechen im Wesentlichen dem, wie sie auch in dieser Arbeit verstanden werden. Allerdings richten sich die Beschreibungen und der Planungsprozess eher auf die Feinplanung einer Fabrik.

¹ In seiner Arbeit präsentiert HARMS weitere Inferenzstrukturen für die unterschiedlichen Aufgaben während der Bewertung der Wiederverwertbarkeit. Dazu zählen beispielsweise „Modifikationsmaßnahmen bestimmen“, „Lebenszyklusdaten-Zuverlässigkeitsbewertung“ oder „Instandhaltungsmaßnahmenbestimmung“.

Dies wird dadurch unterstrichen, dass ein Produkt- und Produktionssystemkonzept als Eingangsinformation benötigt wird. Die Arbeit bietet jedoch Anknüpfungspunkte im Anschluss an die Produktionssystemkonzipierung.

3.1.4 Ontology Framework for the Integrated Design of Modular Assembly Systems LOHSE

LOHSE unterstützt mit seinem Framework eine schnelle, anforderungsgetriebene Entwicklung modularer Montagesysteme. Er betrachtet hierfür den kompletten Lebenszyklus eines Montagesystems, d.h. die initiale Entwicklung¹ und die späteren Anpassungen (Parameter, Prozessfolge, Aufbau) im Zuge von Produktänderungen [Loh06, S. 43]. Kernelemente seines Ansatzes sind eine umfassende Ontologie zur Beschreibung von Produkten, Prozessen und Ressourcen sowie eine Methode zur integrativen Prozessspezifikation und Montagesystemkonfiguration. Damit die Wiederverwendung von entwickelten Modulen sichergestellt wird, umfasst das Framework zusätzlich Richtlinien und Bedingungen für die Architektur von Montagesystemen. Das Framework ist unterteilt in die Domänen Systementwicklung und Systemarchitektur. Notwendiges Wissen für die einzelnen Bereiche wird in der OntoMAS²-Ontologie abgebildet.

OntoMAS-Ontologie

Die ONTOMAS-Struktur basiert auf einer zentralen Kernontologie mit den grundlegenden Konzepten. Darauf aufbauend folgen drei Domänenontologien für die Bereiche *Product*, *Assembly Process* und *Assembly Equipment*. Weitere spezifischere Konzepte ergeben sich für die drei Rollen *Customer*, *System Integrator* und *Equipment Supplier* und die Anwender der Ontologie [Loh06, S. 57].

Mit der **Product Domain Ontology** werden die montagerelevanten Anforderungen eines Produkts erfasst, d.h. die Parameter der einzelnen Bestandteile (*Assembly* oder *Component*) und deren Verbindung (*Liasion*). Parameter beziehen sich auf die Geometrie, Materialeigenschaften und den bisherigen Prozessverlauf des Produkts, jeweils beschränkt auf Angaben die einen direkten Einfluss auf die Montage haben.

Zweck der **Assembly Process Domain Ontology** ist die Bereitstellung notwendiger Konzepte zur Spezifikation und Dekomposition von Montageprozessen. Zur Abbildung unterschiedlicher Abstraktionslevel werden, ausgehend vom Kernkonzept *Activity*, die Unterklassen *Process*, *Task*, *Operation* und *Action* definiert. Zu den Standardparametern ge-

¹ Die Entwicklung eines neuen Montagesystems umfasst die folgenden vier Aktivitäten: Produkt/Projekt-Definition, Prozessspezifikation, Prinzipiellösung und Auswahl/Kombination von existierenden Modulen [Loh06, S. 48].

² **Ontology** for the design of **Modular Assembly Systems**

hören u.a. Name, Beschreibung, Fixkosten, Flexible Kosten und Dauer. Zur Klassifikation von *Actions* verwendet LOHSE beispielsweise die VDI-Richtlinie 2860, für *Montageoperationen* die DIN 8593-0.

Die **Assembly Equipment Domain Ontology** stellt notwendige Konzepte zur Beschreibung der Montageressourcen bereit. Grundkonzept der Ontologie ist die Klasse *Equipment* welche über die Aspekte Funktionen, Verhalten und Struktur näher beschrieben wird. Funktionen können von einer Ressource ausgeführt werden und ermöglichen so *Tasks*, *Operations* und *Actions*. Die Verhaltensbeschreibung erfolgt über Informations-, Energie- und Stoffänderungen und Flüssen mit denen die unterschiedliche Verhaltensaspekte (z. B. Kinematik, Dynamik, Logik) erfasst werden. Der Strukturaspekt adressiert den geometrisch-räumlichen Aufbau einer Ressource. Zur Hierarchisierung von Montageressourcen werden die fünf Ebenen *AssemblySystem*, *Workstation*, *EquipmentUnit*, *Device* und *EquipmentElement* verwendet. Bild 3-4 zeigt die Zusammenhänge der unterschiedlichen Ebenen mit den Konzepten der anderen Domänenontologien.

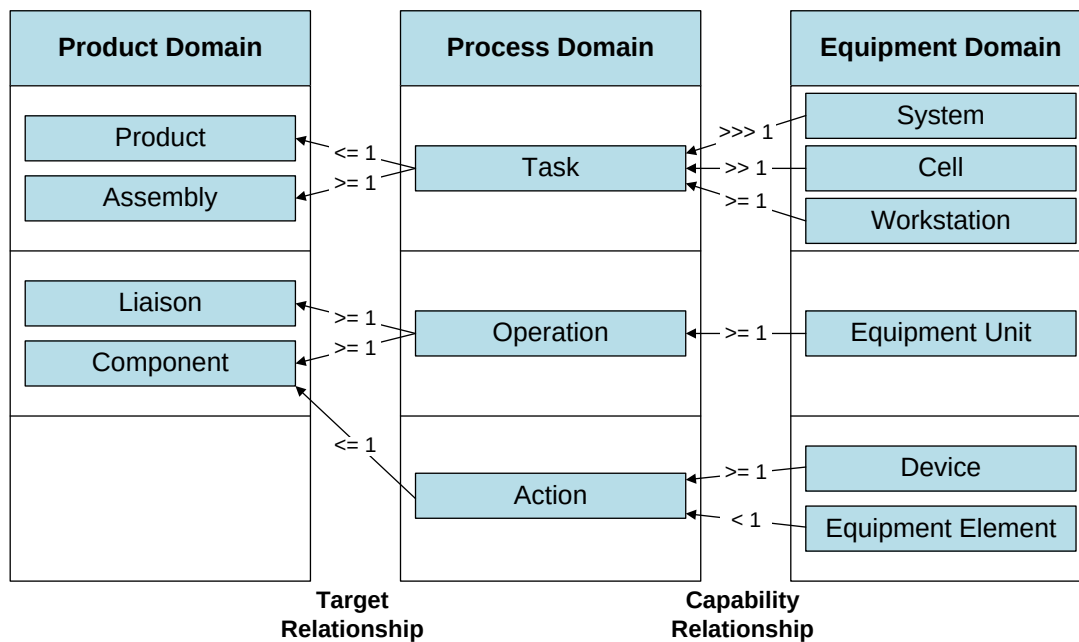


Bild 3-4: Zusammenhänge zwischen den Grundkonzepten der drei Domänenontologien nach [Loh06, S. 117]

Methode zur integrierten Spezifikation von Montageprozessen und –Ressourcen

Die von LOHSE vorgestellte Methode zur integrierten Spezifikation adressiert die Entwicklung oder Anpassungen einzelner Montagesysteme. Als Voraussetzungen wird definiert, dass sowohl Produkt als auch das weitere Produktionssystem bereits vollständig definiert wurden. Weiterhin sind die Montageprozessanforderungen für eine (abstrakte) Montagestation (*Assembly Workstation*) festgelegt. Für die weitere Spezifikation des Montageprozesses sowie die Konfiguration der Montagestation beschreibt LOHSE die de-

tailliert unterschiedlichen Teilaufgaben. Hierzu werden die sogenannten *Pattern* eingesetzt, die dem Anwender die relevanten Parameter zur Spezifikation von Prozessen, Funktionen etc. liefern. Die Konfiguration der Montagestation erfolgt mit einem hierarchischen Ansatz, in dem sukzessive Teillösungen auf den unterschiedlichen Leveln gesucht werden.

Bewertung: Die Arbeit von LOHSE zeigt den Einsatz eines umfassenden Ontologie-Frameworks für die Konfiguration einzelner Montageressourcen. In den drei Teilbereichen Produkt, Prozess und Ressource werden detailliert die montagerelevanten Konzepte erfasst. Das modellierte Wissen wird nicht nur für die Suche nach Lösungen eingesetzt, sondern liefert auch Unterstützung während der Spezifikation. Für die frühzeitige und übergreifende Planungsphase eines Produktionssystems ist die OntoMAS-Ontologie jedoch zu spezifisch auf Montagesysteme zugeschnitten.

3.1.5 Combining a SysML-based modeling approach and semantic technologies nach FELDMANN ET AL.

FELDMANN ET AL. kombinieren die graphische Modellierung eines Automatisierungssystems mit der formalen Repräsentation in einer Ontologie. Die graphische Modellierung erfolgt mittels SysML4Mechatronics¹. Die Überführung in ein formales Modell ermöglicht das Anwenden von Kompatibilitätsregeln, um Unzulänglichkeiten im graphischen Modell zu ermitteln. Der Ansatz basiert auf einer Ontologie, in der die Konstrukte von SysML4Mechatronics als OWL-Konzepte abgebildet sind. Für ein konkret modelliertes Automatisierungssystem werden Instanzen in der Ontologie erzeugt, worauf anschließend eine Reihe von Kompatibilitätsregeln angewendet werden können. Die Regeln sind als SPARQL-Anfragen umgesetzt und ermitteln z. B. inkompatible oder fehlenden Verbindungen zwischen Subsystemen [FKV14].

Bewertung: Der von FELDMANN ET AL. vorgestellte Ansatz verfolgt eine ähnliche Zielsetzung wie die vorliegende Arbeit. Die Vorteile einer graphischen Modellierung werden mit denen einer ontologiebasierten Abbildung kombiniert. Dies erlaubt eine Unterstützung während der Entwicklungsphase. FELDMANN ET AL. modellieren Automatisierungssysteme im Detail, d.h. es liegen spezifische Informationen für die verwendeten Teilsysteme einer Ressource bereits vor. Die Arbeit ist daher eher der Ausarbeitung von Produktionssystemen zuzuordnen.

¹ SysML4Mechatronics erlaubt die disziplinübergreifende Modellierung von Automatisierungssystemen. Die mechanischen, elektrischen und softwaretechnischen Schnittstellen der unterschiedlichen Subsysteme werden spezifiziert und verbunden. SysML4Mechatronics erweitert in dieser Hinsicht die Standardmodellierungsmöglichkeiten der SysML.

3.1.6 Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche GAAG

Die von GAAG entwickelte Ontologie unterstützt eine funktionsorientierte Suche nach technischen Systemen. Dabei wird zwischen der Suche nach Prinziplösungen auf Wirkmodellebene und der Suche nach Systemlösungen im Anlagen- und Maschinenbau unterschieden [Gaa10]. Der Lösungsansatz ist eine auf den Suchbereich spezialisierte Ontologie¹, deren Struktur sich in Lösungs-, Funktions- und Abstraktionsebene aufteilt. Für die Suche im Anlagen- und Maschinenbau werden branchenspezifische Funktionen verwendet, beispielsweise die Teilfunktionen des Handhabens nach der VDI-Richtlinie 2860. Bild 3-5 zeigt die Grundstruktur der Ontologie für die Suche im Anlagen- und Maschinenbau. Darin sind die Grundklassen den unterschiedlichen Ebenen zugeordnet und die Relationen zwischen den Klassen angedeutet.

Mit den Konzepten der Lösungsebene werden technische Systeme, d.h. die Lösungen für eine Suchanfrage, beschrieben. Jede Lösung wird in mindestens einer Branche verwendet, durch ein Unternehmen angeboten und über mindestens einen Funktionsträger realisiert. Ein Funktionsträger ist somit ein Teilsystem der Lösung. Auf Funktionsebenen werden Funktionen, Objekt und Operationen modelliert. Die Funktion beschreibt den Zweck eines technischen Systems, z. B. „Rohr handhaben“. Das Objekt (Rohr) ist der Gegenstand der mit einer entsprechenden Operation (handhaben) bearbeitet wird. Jede Operation lässt sich auf ein allgemeines Operationsziel (z. B. Position ändern) abstrahieren. Über Eigenschaften werden Lösungen, Funktionsträger und Objekt weiter detailliert. Angaben erfolgen sowohl für quantitative Werte (Taktzeit = 42 s) als auch für qualitative Aussagen (mittlere Wiederholgenauigkeit). Das allgemeine Operationsziel und die Eigenschaften bilden die Grundlage für die Suche nach ähnlichen Lösungen.

¹ GAAG entwickelte zunächst eine Grundontologie, deren Konzepte für die zwei Anwendungsfälle weiter detailliert wurden. Da die Suche nach Prinziplösungen auf Wirkmodellebene die frühzeitige Produktentwicklung fokussiert, wird sie im Folgenden nicht näher betrachtet.

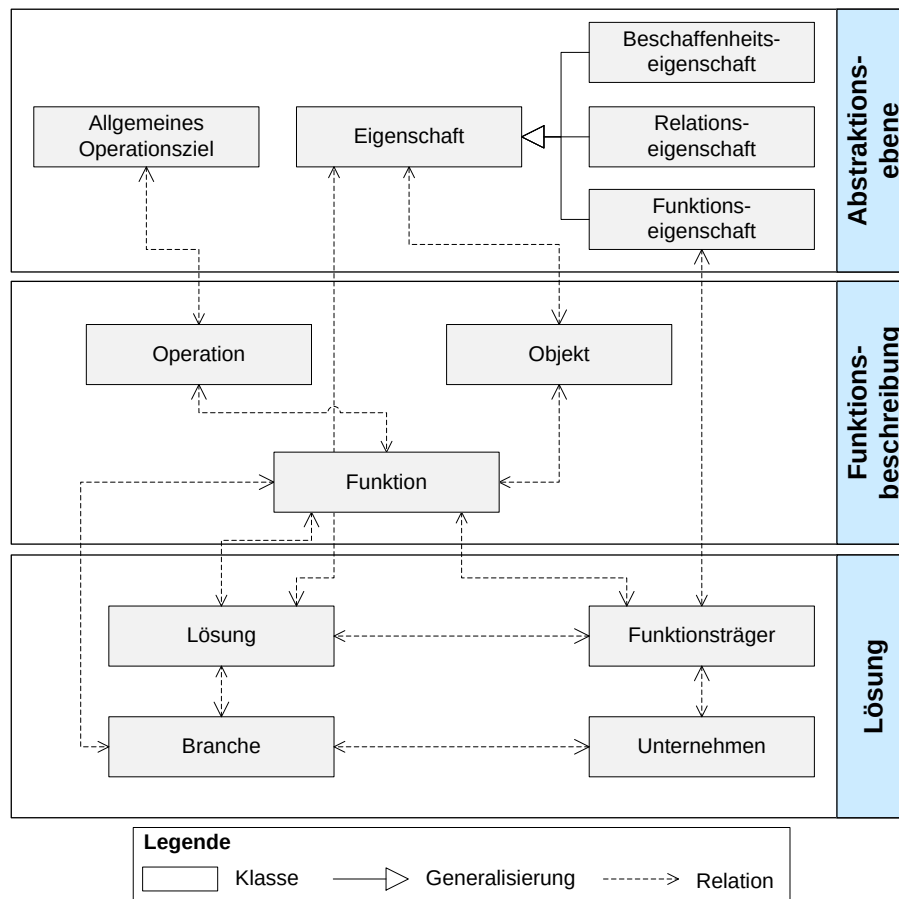


Bild 3-5: Ontologiestruktur für die Lösungssuche im Anlagen- und Maschinenbau nach [Gaa10, S. 114]

Die Ontologie wurden mit dem Ressource Description Framework umgesetzt und in einen webbasierten Prototyp zur Lösungssuche implementiert. Der Zugriff auf Lösungen kann direkt über den Namen, über eine spezifische Funktion oder über ein allgemeines Operationsziel erfolgen.

Bewertung: Die von GAAG entwickelte Ontologie eignet sich für eine Lösungssuche anhand der verschiedenen Abstraktionsebenen. Eine Bewertung der Eignung einer Lösung für eine konkrete Aufgabenstellung bleibt dabei dem Nutzer überlassen. Die vorgestellten Konzepte zur Beschreibung von Funktionen und Lösungen decken sich prinzipiell mit dem Prozess- und Ressourcenverständnis dieser Arbeit. Trotz der Betrachtung von Systemlösungen im Anlagen- und Maschinenbau wird von GAAG vornehmlich eine Unterstützung der Lösungssuche während der Produktentwicklung adressiert.

3.2 Ontologien im Kontext Produktion

Der Einsatz von Ontologien im Kontext Produktion erfreut sich in den letzten Jahren zunehmender Beliebtheit¹. So finden sich Ontologien für die unterschiedlichen Bereiche und Anwendungsfelder, angefangen von der Betrachtung des gesamten Unternehmens² bis hin zu sehr spezifischen Modellierungen von Teilsystemen einer Produktionsanlage³. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden Arbeiten betrachtet, die dem Produkt-Prozess-Ressource-Ansatz verfolgen.

3.2.1 Manufacturing Service Description Language (MSDL)

Die von AMERI ET AL. entwickelte *Manufacturing Service Description Language (MSDL)* bildet die Grundlage für eine standardisierte Abbildung von Produktionsdienstleistungen (Manufacturing Service). Darauf aufbauend wird eine agentenbasierte Konfiguration der Lieferkette zwischen anbietenden und nachfragenden Unternehmen ermöglicht [Ame07], [AM13a]. Ein Manufacturing Service wird definiert als „eine Produktionsfähigkeit, die durch mindestens einen Produktionsprozess erbracht und durch mindestens eine Produktionsressource ermöglicht wird [Ame07, S. 47]“. Betrachtet werden vorwiegend die technologischen Aspekte, wie herstellbare Toleranzen und Oberflächen oder der technologische Hintergrund des anbietenden Unternehmens. Anbieter (*Supplier*) werden über ein sogenanntes *SupplierProfil* beschrieben, welches Unternehmensdaten und Dienstleistungen enthält. Nachfragen werden über ein *Request for Quote (RFQ)* abgebildet. Diese Angebotsanfrage beinhaltet Angaben zum Unternehmen, Bauteil, Service, Lieferzeitpunkt und Stückzahl.

Das MSDL-Vokabular teilt sich auf in grundlegende Kernelemente und branchen- bzw. fertigungsspezifische Erweiterungen. Zu den Kernklassen gehören *Supplier*, *Service*, *Resource*, *Process* und *Industry*. Ressourcen umfassen sämtliche Produktionsressourcen die für einen Service erforderlich sind, z. B. Maschinen, Werkzeuge, Mitarbeiter oder Steuerungsprogramme. Unter einem Prozess werden in MSDL vorwiegend Fertigungsprozesse verstanden. Über die *Industry*-Klasse werden unterschiedliche Branchen modelliert. Bild 3-6 zeigt die Klassen zur Beschreibung eines Anbieters, einer Fertigungsdienstleistung (*MfgService*) und deren Verknüpfung über das *SupplierProfil*.

¹ Eine Übersicht bestehender Ontologien ist den Beiträgen von SCHLENOFF ET AL. [SDI+00] und KHILWANI ET AL. [KHC09] zu entnehmen.

² vgl. *TOnto Virtual Enterprise* [Fox92], [FFG94]

³ vgl. *Ontology-Based Device Descriptions and Device Repository for Building Automation Devices* [DK11]

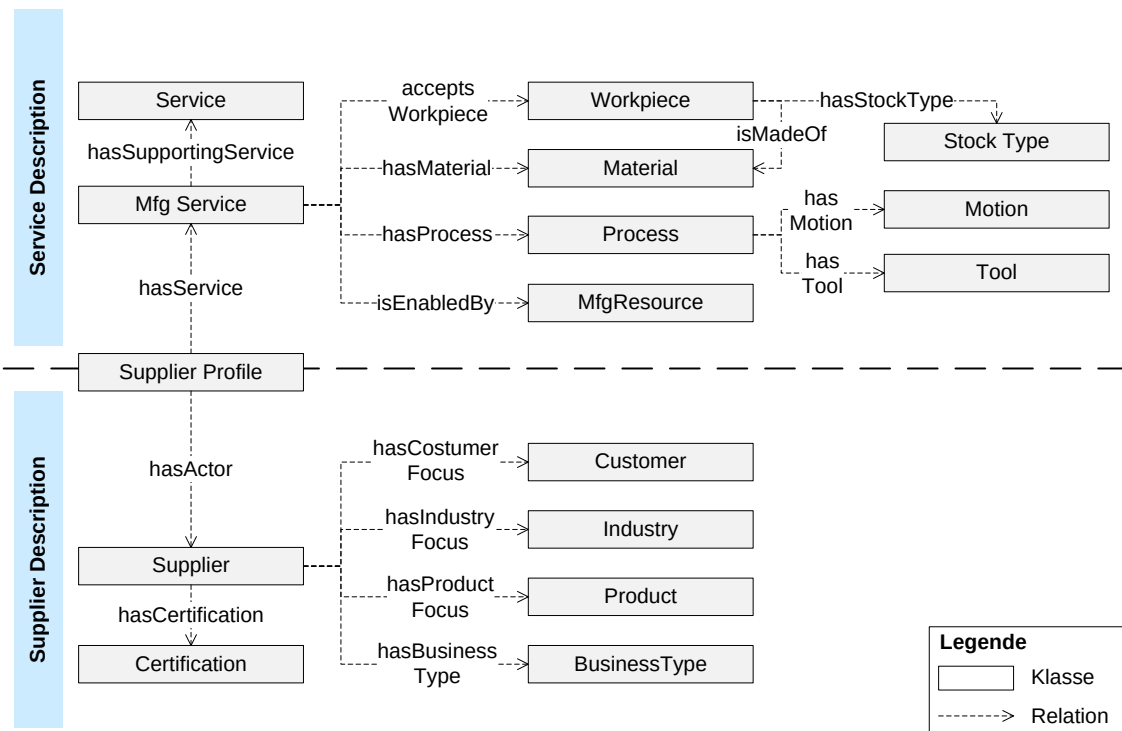


Bild 3-6: MDSL-Klassen und MSDL-Relationen zur Beschreibung von Fertigungsdienstleistung und Anbietern nach [AM11, S. 3]

Ursprünglich wurde die *Manufacturing Service Description Language* für Dienstleistungen im Bereich der mechanischen Bearbeitung entwickelt. Entsprechend ausgeprägt sind die Unterklassen für Fertigungsprozesse und Werkzeugmaschinen. Jede Prozessklasse wird u.a. über Bewegungsrichtung, Bewegungsart, Werkzeuge und Schnittkanten detailliert spezifiziert. Für Werkzeugmaschinen werden Angaben zu Achsen, Vorschubmechanik, Spindelachsen, Arbeitsbereich, Werkstücktisch und Werkzeugsystem modelliert. Die Umsetzung der MSDL-Ontologie erfolgt mit OWL.

Zur Erweiterung der OWL-Konzepte wurde von AMERI ET AL. eine Reihe von SWRL-Regeln definiert, die das automatische Ableiten von Fähigkeiten ermöglichen. Aufbauend auf diesen Regeln erfolgt die Suche, Vorauswahl und Bewertung potentieller Anbieter für eine formulierte Angebotsanfrage [AM13b].

Bewertung: Die *Manufacturing Service Description Language* liefert umfassende Konzepte zur Beschreibung von Fertigungsprozessen, Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. Das Anwendungsfeld der Ontologie ist das Zusammenbringen von Anbietern und Nachfragern von Produktionsdienstleistungen in einem *Digital Manufacturing Market*. Softwareagenten übernehmen darin die Vermittlerrolle und bilden die notwendigen Lieferketten. Die detaillierte Betrachtung von Prozessen und Ressourcen ist eher der weiteren Ausarbeitung eines Produktionssystems im Rahmen der Operationsplanung zuzuordnen. Eine Betrachtung von Fertigungsmaschinen auf höheren Abstraktionsstufen (Station, Zelle, etc.) wird von AMERI ET AL. zwar erwähnt, jedoch nicht weiter betrachtet.

3.2.2 MAnufacturing's Semantics ONtology (MASON)

Mit der Top-Level-Ontologie von LEMAIGNAN ET AL. wird ein Ansatz für ein gemeinsames semantisches Netz zur Beschreibung von Produktionssystemen verfolgt [LSD+06]. Die Grundlage der Ontologie bildet die Arbeit von MARTIN und D'ACUNTO, die Produktionssysteme als Summe aus Produkt-, Prozess- und Ressourcenkonzepten auffasst [MD03]. Daran orientieren sich die drei Grundkonzepte der MAnufacturing's Semantics ONtology: *entities*, *operations* und *resources*.

Mit den Konzepten der *Entity*-Klasse wird das Produkt über die drei Bereiche Kosten, Organisation und Technik spezifiziert. Während die beiden Erstgenannten nicht weiter unterteilt werden, bietet die Ontologie eine Reihe von Unterklassen für die technischen Aspekte des Produkts. Dazu zählen u.a. die geometrischen Eigenschaften mit Bezug zur Fertigung (Taschen, Bohrung, Gewinde, etc.) oder der Werkstoff. Für einige Werkstoffe ist hinterlegt, mit welchen Herstellprozessen sich diese verarbeiten lassen.

Prozessbeschreibungen erfolgen mit den Konzepten der *Operations*-Klasse. Es wird unterschieden in manuelle Tätigkeiten (Programmierung und Planung), vorbereitende Tätigkeiten (Einrichten), logistische Tätigkeiten (Handhabung und Wartung/Instandhaltung) und den Tätigkeiten zur Bearbeitung des Produkts. Letztere bilden den Schwerpunkt der Prozessspezifikation und werden weiter unterteilt in Montage, Kontrolle und Fertigungsprozesse mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren.

Die Ressourcen eines Produktionssystems werden mit den Elementen der *Resource*-Klasse spezifiziert. Grundlegend werden die Ressourcen aufgeteilt in geografische Ressourcen, materielle Ressourcen und Mitarbeiter. Geografische Ressourcen umfassen das Grundstück, ein Gebäude oder eine Werkstatt. Mitarbeiter werden entsprechend der durchgeführten Tätigkeit (Handhabung, Programmierung, Vorbereitung, etc.) klassifiziert. Materielle Ressourcen sind Maschinen, Werkzeuge oder Halbzeuge. Für Maschinen und Werkzeuge sind weitere Unterklassen definiert. Bild 3-7 zeigt die Grundklassen sowie deren Beziehungen untereinander. Als Anwendungsfälle der MASON-Ontologie werden Systeme zur automatischen Ermittlung der Herstellkosten aufgeführt.

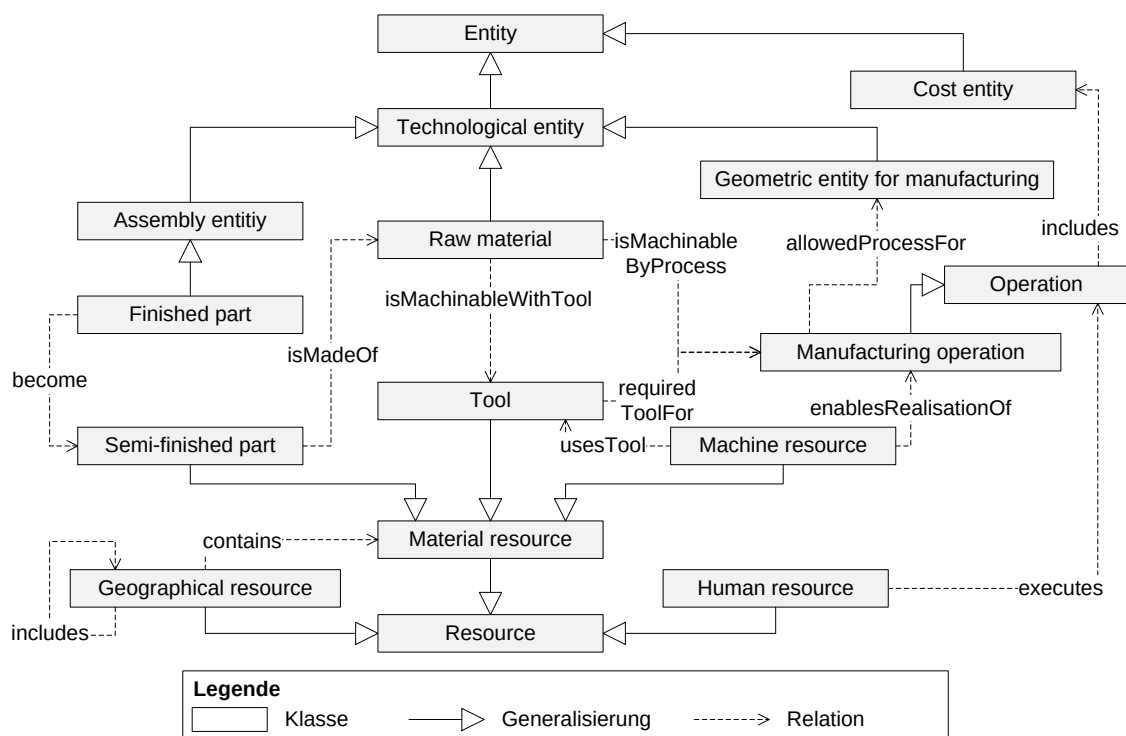


Bild 3-7: Grundklassen und Beziehungen der MASON-Ontologie [MD03, S. 198]

Bewertung: Die MASON-Ontologie bietet Möglichkeiten, die Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Ressource abzubilden. Der Fokus liegt dabei klar auf der Spezifikation von mechanischen Werkstücken sowie den notwendigen Fertigungsprozessen. Konzepte zur Beschreibung von Montageprozessen oder der Modellierung des Materialflusses sind unzureichend bzw. fehlen gänzlich.

3.2.3 Manufacturing System Engineering (MSE) Ontology Model

LINA ET AL. fokussieren mit ihrer Ontologie die Zusammenarbeit von multidisziplinären Teams kooperierender Unternehmen. Jedes Team verwendet im Rahmen eines Projekts unterschiedliche Begriffe und Beschreibung für prinzipiell gleiche Themen, Elemente oder Aktivitäten. In der Manufacturing System Engineering Ontologie sind notwendige Konzepte definiert, damit unternehmensspezifische Sichtweisen auf ein Objekt abgestimmt werden¹ und so ein einheitliches Verständnis aller Beteiligten geschaffen wird. Der Informationsaustausch wird durch einen sogenannten Moderator, ein intelligentes Com-

¹ Als Beispiel wird das unterschiedliche Verständnis für ein Produkt genannt. Für ein Unternehmen ist beispielsweise ein LCD-Display das fertige Erzeugnis und wird intern als Produkt aufgefasst. Für ein kooperierendes Unternehmen ist das Display Bestandteil eines Laptops und wird daher als Bauteil bezeichnet [LH07, S. 435].

putersystem, unterstützt. Die Top-Level-Konzepte der MSE-Ontologie sowie deren Beziehungen sind in Bild 3-8 dargestellt. Jede Klasse wird durch einen Satz von Standardparameter spezifiziert.

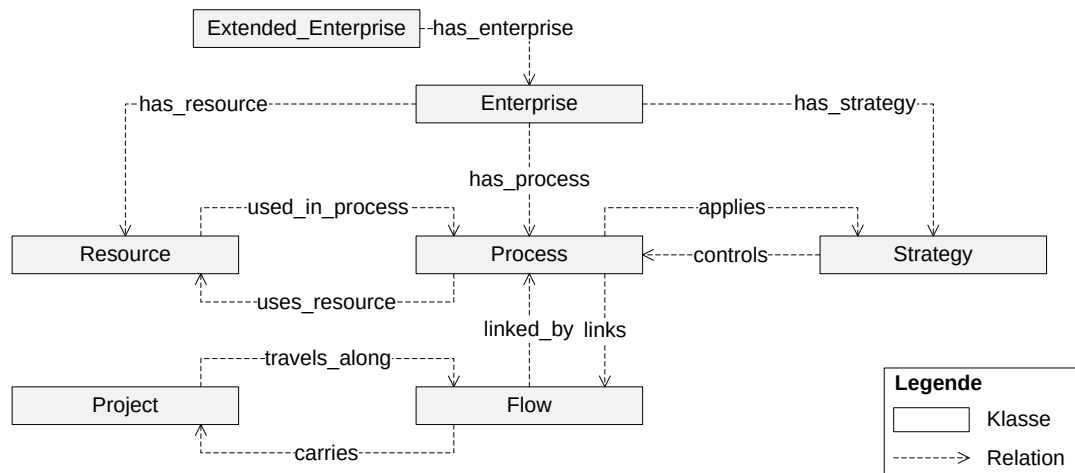


Bild 3-8: Grundkonzepte der Manufacturing System Engineering Ontologie nach [LHS04, S. 5103]

Die *Project*-Klasse wird zum Abbilden der projektrelevanten Geschäftsobjekte verwendet. Darunter fallen sowohl herzustellende Produkte als auch Dinge wie Dokumente, Aufträge oder Programme. Über die *Flow*-Klasse werden die Geschäftsobjekte mit einem oder mehreren Prozessen in Beziehung gesetzt. Die *Process*-Klasse umfasst grundlegend alle Geschäftsaktivitäten, d.h. die Herstellprozesse zur Erzeugung eines Produkts und weitere Geschäftsprozesse beispielsweise zur Planung, zur Beschaffung oder zum Vertrieb. Notwendigen Ressourcen zur Durchführung der Prozesse sind der *Resource*-Klasse zugeordnet. Darunter fallen auch die Produktionsressourcen, wie Maschinen, Mitarbeiter, Werkzeuge und Material. In der *Strategy*-Klasse werden Geschäfts- und Produktionsstrategien des Unternehmens modelliert und mit den Prozessen verknüpft.

Jedes Unternehmen (*Enterprise*-Klasse) wird über seine Prozesse, Ressourcen und Strategien detailliert. Für die Abbildung der Produktionseinrichtungen stellt die *Facility*-Klasse unterschiedliche Abstraktionsstufen zur Verfügung. Entsprechend des Datenmodells nach ZHAO ET AL. unterteilen sich Produktionseinrichtungen in Unternehmen, Fabrik, Werkstatt/Produktionsbereich, Zelle und Station¹. Das obere Ende der Abstraktionsstufen wird in der MSE-Ontologie durch die *Extended_Enterprise*-Klasse erweitert. Dieser Zusammenschluss besteht aus mindestens zwei Unternehmen.

¹ Ein Unternehmen besteht aus mindestens einer Fabrik, diese aus mindestens einem Produktionsbereich, dieser aus mindestens einer Zelle und diese schließlich aus mindestens einer Station [ZCY99, S. 152].

Die Repräsentation der Ontologie erfolgte mittels RDF und OWL. Für den eingangs erwähnten Mapping-Prozess der unternehmensspezifischen Informationen, muss jedes firmenspezifische Vokabular zunächst abgebildet werden. Über Äquivalenz-Beziehungen und Inferenzregeln wird das semantische und syntaktische Mapping auf das MSE-Vokabular durchgeführt. Der Moderator ist somit in der Lage, projektrelevante Änderungen im Informationsmodell eines beteiligten Unternehmens zu erkennen und die Auswirkungen den weiteren Unternehmen mitzuteilen.

Bewertung: Die MSE-Ontologie bietet Möglichkeiten, produktionsrelevante Informationen eines Unternehmens zu erfassen und mit den Informationsmodellen von Partnerunternehmen zu verknüpfen. Der Ablauf gemeinsamer unternehmerischer Vorhaben soll dadurch verbessert werden. Mit den MSE-Konzepten für Prozesse und Ressourcen werden sämtliche Geschäftsprozesse und eingesetzte Unternehmensressourcen modelliert. Damit unterscheidet sich die Bedeutung der Begriffe von den vorgestellten Aspekten der Produktionssystemkonzipierung.

3.2.4 Ontology-based Manufacturing Design System

SUN ET AL. präsentieren mit dem *Ontology-based Manufacturing Design System* ein Planungssystem zur Verknüpfung der Produktentwicklung mit der Fertigungsplanung. Der wesentliche Bestandteil ist das *Product Knowledge Model (PKM)*, mit dem entwicklungsrelevante Informationen über ein Produkt modelliert werden [SMG+08, S. 2f.]. Das *Product Knowledge Model* setzt sich aus vier Ontologien zusammen:

- Die Produktspezifikation wird mit den Konzepten der *Product Semantic Ontology (PSO)*¹ abgebildet. Zentrale Klasse ist das Produktkonzept, welches u.a. über Angaben zu Funktionen, Struktur, Fertigung und Montage detailliert wird.
- Die *Management Activity Ontology (MAO)* beschreibt Planungsaufgaben, Mitarbeiter und deren Rollen im Projekt.
- Spezifische Fähigkeiten, Kompetenzen und Fachwissen der Mitarbeiter werden mit der *Organization Competence Ontology (OCO)* abgebildet.
- Mit der *Information Resource Ontology (IRO)* werden Produktentwicklungs- und Fertigungsplanungsdokumente, die sogenannten Ressourcen, beschrieben. Über eine Ressource werden Produkte, Aufgaben und Mitarbeiter verbunden.

¹ Die *Product Semantic Ontology* basiert auf dem *Core Product Model (CPM)* des National Institute of Standards and Technology [FFB+08].

Aufbauend auf diesen vier Ontologien wird in Verbindung mit SWRL-Regeln ein Anwendungssystem¹ umgesetzt, das den Zugriff und die Verarbeitung von Produktinformationen im Zuge der Fertigungsplanung unterstützt. Anforderungen werden mit PKM-Konzepten annotiert und mit den Inhalten einer Wissensbasis abgeglichen [SMG09, S. 649].

Bewertung: Die Arbeiten von SUN ET AL. bieten mit dem *Product Knowledge Model* einen Ansatz Produktmerkmale, Planungsdokumente und mitarbeiterspezifische Fähigkeiten zu verbinden. Im Vordergrund steht jedoch die Informationsbereitstellung in der Produktentwicklung. Es fehlt eine nähere Betrachtung, wie und in welcher Form Fertigungsinformationen abgelegt und wiederverwendet werden. Weiterhin sind keine Konzepte zur detaillierten Beschreibung von Maschinen, Werkzeugen etc. in der Ontologie enthalten.

3.2.5 A Modular Production System Description Ontology (OntoMoPS)

Die Beschreibung modularer Produktionssysteme steht im Fokus der Arbeit von TSINARAKIS und TSINARAKI. Jedes Produktionssystem lässt sich demnach in seine fundamentalen Subsysteme, die Module, zerlegen. Die vorgestellte OntoMoPS-Ontologie² erlaubt die Strukturierung eines Gesamtsystems in aktiven Module (Maschinen) und passive Module (Puffer zwischen Maschinen). Als Einsatzzweck der Ontologie wird die Repräsentation von modularen Produktionssystemen im Semantik-Web-Umfeld angegeben, z. B. für digitale Bibliotheken.

Das OntoMoPS-Kernkonzept ist die Klasse *ProductionSystem*. Eingangselemente des Produktionssystems werden als *RawMaterial* spezifiziert, die Ausgangselemente als *Product* und Zwischenzustände als *PartiallyProcessedPart*. Bestandteile des Produktionssystems sind die erwähnten Puffer (*Buffer*) und weitere Ressourcen (*ProductionSystemResource*). Ressourcen teilen sich auf in Maschinen (*Machines*) und Hilfseinrichtungen. Unter Hilfseinrichtungen werden z. B. Trocknungsanlagen und Öfen sowie die Luft-, Wasser-, Öl- und Stromversorgung aufgeführt. Die durchgeführten Prozesse (z. B. Drehen, Fräsen, Bohren) werden über das *Process*-Konzept erfasst und dem Produktionssystem zugeordnet. Das *Process*-Konzept ist eine Spezialisierung des *Service*-Konzepts, dem ebenfalls das *Transportation*-Konzept zugeordnet ist. Weiterer Bestandteil der Beschreibung ist die verwendete Produktionsstrategie (*ProductionSystemStrategy*). Diese setzt sich aus einzelnen Strategiemodulen (z. B. flexible Fertigung, Losgrößen-Fertigung)

¹ Neben den Ontologien werden SWRL-Regeln verwendet, um ein Produktkonfigurationssystem umzusetzen. Nähere Informationen zur Systemarchitektur und zum Aufbau des Konfigurators finden sich in den genannten Quellen.

² TSINARAKIS und TSINARAKI verweisen darauf, dass die MSE-Ontologie (siehe Kapitel 3.2.3) für die detaillierte Beschreibung modularer Produktionssysteme nicht ausreicht.

zusammen. Die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems wird über Attribute beschrieben, z. B. Durchsatz, Stillstandszeiten oder Wartezeiten.

Bewertung: TSINARAKIS und TSINARAKI präsentieren mit OntoMoPS eine Ontologie die sich vorwiegend auf den Einsatz im Semantic Web konzentriert, um erweiterte Suchmöglichkeiten bereitzustellen. Die semantische Beschreibung von Produktionssystemen bezieht sich allerdings nur auf Maschinen und Puffer. Die Planung von Mitarbeitern, Vorrichtungen oder Werkzeugen werden nicht explizit betrachtet. Auf Prozessebene wird der Zusammenhang zwischen Materialelementen und Prozessen nicht berücksichtigt.

3.3 Bewertung und Handlungsbedarf

Die betrachteten wissensbasierten Planungswerkzeuge und Ontologien werden nachfolgend hinsichtlich der gestellten Anforderungen aus Kapitel 2.8 bewertet. In Tabelle 3-3 sind die Ergebnisse nochmals zusammenfassend dargestellt.

A1) Einordnung in die bestehende Entwicklungsmethodik: Keines der betrachteten Planungswerkzeuge fokussiert die ganzheitliche Konzipierung von Produktionssystemen. Die Arbeiten von SCHADY, LOHSE und GAAG adressieren nur Teilaspekte, wie die frühzeitige Konzipierung von Montagesystemen oder die Suche nach geeigneten Lösungen.

A2) Eindeutige graphische Modellierung: Eine graphische Modellierung zur Abbildung des Produktionssystems wird von KÖSTERS und FELDMANN ET AL. unterstützt. Im Fokus stehen dabei die Produktionsplanung bzw. die detaillierte Modellierung von Automatisierungssystemen.

A3) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitsablaufplanung: Mit fast allen untersuchten Arbeiten lässt sich Fachwissen für die frühzeitige Arbeitsablaufplanung abbilden. Meist wird nur ein bestimmter Bereich, d.h. Fertigung oder Montage, im Detail betrachtet und der jeweils andere Bereich nur unzureichend erfasst. Möglichkeiten zur Modellierung von Prozessfolgen werden ebenfalls kaum behandelt.

A4) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitssystemplanung: Die Abbildung von Fachwissen für die Arbeitssystemplanung wird ebenfalls in Teilen von allen untersuchten Arbeiten unterstützt. Der Ressourcen-Begriff wird jedoch sehr unterschiedlich ausgelegt. Er reicht von Bearbeitungssystemen über Werkzeuge bis zu Planungsdokumenten.

A5) Flexible Wissensrepräsentation für die Konzipierungsphase: Fast alle vorgestellten Ontologien bieten die Möglichkeit für den Aufbau individueller Wissensbasen. Aus dem Anwendungsfall der Ontologie (z. B. Agentensystemen bei MSDL) ergeben sich Restriktionen für die Daten- und Informationsmodellierung. Die CONSENS-Elemente Materialelement, Prozess und Ressource lassen sich lediglich den Konzepten von SCHADY und HARMS eindeutig zuordnen.

A6) Intuitive Anwendung und Modellierungsunterstützung: Die vorgestellten Planungswerkzeuge beinhalten durchgängig ein angepasstes Planungs- bzw. Modellierungswerkzeug, mit dem auf das Wissen zugegriffen werden kann. KÖSTERS bietet einen Editor mit dem der Anwender das Produktionssystem graphisch Modellieren kann. LOHSE liefert zudem eine gezielte Modellierungsunterstützung.

A7) Anwenderorientierte Wissensnutzung: Eine anwenderorientierte Wissensnutzung wird von den Planungswerkzeugen teilweise unterstützt. Der Editor von KÖSTERS ermöglicht die direkte Verwendung während der Modellierung. Bei den Ontologien steht die semantische Wissensrepräsentation im Vordergrund, weniger die Verwendung des Wissens während der Planung neuer Produktionssysteme. Eine Ausnahme bildet die MSDL mit dem Agentensystem zur Konfiguration einer Lieferkette.

A8) Unterstützung der frühzeitige Bewertung: Die Bewertung und Absicherung von Produktionssystemen wird von einigen Arbeiten adressiert, wobei unterschiedliche Ansätze und Bewertungsmethoden zum Einsatz kommen. KÖSTERS und FELDMANN ET. AL. nutzen ein Ontologiemodell zur Analyse des Systems, während HARMS die Planungsinformationen in externes Simulationswerkzeug übernimmt und dort weiterverwendet.

Tabelle 3-3: Bewertung des untersuchten Standes der Technik

Bewertung: Der Ansatz hat die Anforderung...		Anforderungen							
 voll erfüllt  teilweise erfüllt  nicht erfüllt		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Planungswerkzeuge	Wissensorientierten Fabrikmodellierung (SCHADY)								
	Ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem (KÖSTERS)								
	Semantic-Web-Wissensbank für die Wiederverwendung (HARMS)								
	Integrated Design of Modular Assembly Systems (LOHSE)								
	SysML-based modeling approach and semantic technologies (FELDMANN ET AL.)								
	Funktionsorientierten Lösungssuche (GAAG)								
Ontologien	Manufacturing Service Description Language (MSDL)								
	MANufacturing's Semantics ONtology (MASON)								
	Manufacturing System Engineering (MSE) Ontology Model								
	Ontology-based Manufacturing Design System								
	A Modular Production System Description Ontology (OntoMoPS)								

Die gestellten Anforderungen werden von keinem der präsentierten Ansätze vollständig erfüllt. Insbesondere die frühzeitige Konzipierung von Produktionssystemen wird kaum adressiert. Teilweise wird ein Produktionssystemkonzept als Eingangsinformation vorausgesetzt. Die Wissensdarstellung mittels Ontologien ist ebenfalls auf die spätere Ausarbeitung ausgelegt und betrachtet meist einzelne Bearbeitungsoperationen und Werkzeugmaschinen im Detail. Für die Anwendung des Planungswissens kommen individuelle Softwarelösungen oder browser-basierte Systeme zum Einsatz. Eine graphische Modellierung des Produktionssystems wird nur selten unterstützt. Es fehlt ein *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung*, welches gezielt die graphische Modellierung des Systems mit einer semantischen Wissensdarstellung der unterschiedlichen Bestandteile kombiniert. Mit der graphischen Darstellung der einzelnen Aspekte, muss den beteiligten Entwicklern weiterhin ein Kommunikations- und Koordinationsmedium in der frühen Planungsphase zur Verfügung stehen. Durch eine rechnerinterne Abbildung sind Suchanfragen an eine Wissensbasis abzuleiten und das Fachwissen direkt in der Modellierungsprozess einzubinden.

4 Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung* unterstützt den Anwender bei der Erarbeitung neuer Produktionssystemkonzepte. Es bietet die durchgängige graphische Modellierung der einzelnen Aspekte und den Zugriff auf Lösungswissen mit Hilfe semantischer Technologien. Das vorliegende Kapitel beschreibt die einzelnen Bestandteile, die für eine wissensbasierte Produktionssystemkonzipierung erforderlich sind. In Kapitel 4.1 werden zunächst die relevanten Elemente der Spezifikationstechnik CONSENS vorgestellt und Modellierungsrichtlinien für die Erstellung der unterschiedlichen Partialmodelle definiert. Damit wird ein einheitliches Verständnis über die modellierten Informationen erreicht. Gleichzeitig werden damit die grundlegenden Konzepte für eine Ontologie zur Beschreibung von Lösungswissen (Kapitel 4.2) definiert. Zur Verarbeitung des Wissens wird eine Problemlösungskomponente verwendet, die in Kapitel 4.3 vorgestellt wird. Eine kurze Beschreibung der prototypischen Umsetzung des Planungswerkzeugs erfolgt in Kapitel 4.4. Der letzte Bestandteil, ein Vorgehensmodell, beschreibt das Vorgehen während der Konzipierung eines Produktionssystems im Hinblick auf den Einsatz der semantischen Technologien. Die einzelnen Arbeitsschritte werden in Kapitel 5 anhand einer beispielhaften Produktionssystemkonzipierung erläutert.

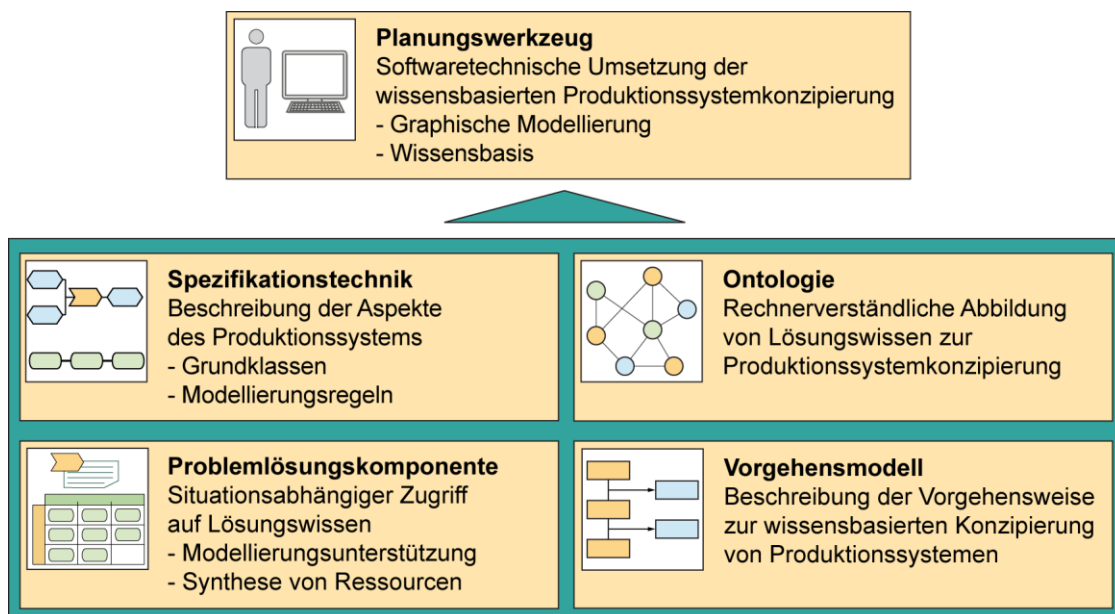


Bild 4-1: Bestandteile der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung

4.1 Spezifikationstechnik zur graphischen Modellierung

In Kapitel 2.3.2 wurde die graphische Notation der Spezifikationstechnik CONSENS zur Produktionssystemkonzipierung bereits kurz vorgestellt. Im folgenden Unterkapitel erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Produktionssystemaspekte Prozesse und Ressourcen. Die grundlegenden Elemente, deren Beziehungen sowie die beschreibenden Piktogramme wurden von REYES PÉREZ definiert [Rey11, S. 74ff.]. NORDSIEK und BRANDIS verwenden diese in denen von ihnen entwickelten Systematiken und erweiterten sie um fertigungs- und montagerelevante Aspekte [Nor12], [Bra14]. Bild 4-2 zeigt die Konstrukte zur Beschreibung von Prozess- und Ressourcenmodell.

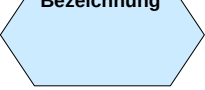
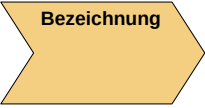
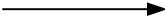
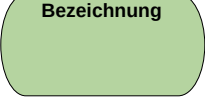
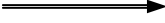
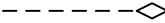
	Elemente	Beziehungen	Piktogramme
Partialmodell Prozesse	Materialelement  Prozess 	Reihenfolge 	Materialelementunterscheidung  Kaufteil (Make-or-Buy)
			Elementbezogene Informationen  Parameter  Gestalt Systembezogene Informationen  Verweis auf Gestalt  Verweis auf Anforderungen  Verweis auf Prozess  Verweis auf Ressource  Verweis auf Materialelement
Partialmodell Ressourcen	Ressource 	Materialfluss  Zuordnung  Transportzuordnung 	Ressourcenunterscheidung  Maschine  Werker  Lager  Werkzeug  Transport  Hilfsmittel

Bild 4-2: Graphische Notation der Basiskonstrukte, Beziehungen und Piktogramme

Im Partialmodell **Prozesse** werden die Basiselemente *Materialelement* und *Prozess* verwendet, welche über *Parameter* näher beschrieben werden. Jedes Element bildet somit eine abgeschlossene Informationseinheit. Die zeitlichen Abläufe werden über die *Reihenfolge*-Beziehungen zwischen Materialelementen und Prozessen erfasst. Daraus ergibt sich, welche Materialelemente in welchen Prozessen verarbeitet werden sowie die Prozessfolge. Eine Unterscheidung zwischen Zukaufteil und Eigenfertigung wird über das *Kaufteil*-Piktogramm gekennzeichnet. Die Verknüpfungen der Basiselemente zu den anderen Aspekten des Produktionssystemkonzepts werden über Piktogramme *Verweis auf Anforderungen* und *Verweis auf Ressource* visualisiert. Mit dem Piktogramm *Verweis auf Gestalt* wird auf die Produktgestalt verwiesen, beispielsweise auf das CAD-Modell eines Werkstücks, eines Zwischenzustands oder des fertigen Produkts.

Das Partialmodell **Ressourcen** besteht nur aus Elementen vom Typ *Ressource*, die ebenfalls über *Parameter* näher beschrieben werden. Zur Unterscheidung der unterschiedlichen Ressourcen gibt es entsprechende Piktogramme für *Maschine*, *Lager*, *Transport*,

Werker, Werkzeug und Hilfsmittel. Die Struktur der Ressourcen wird über die Beziehungen *Materialfluss*, *Zuordnung* und *Transportzuordnung* festgelegt. Der Materialfluss ergibt sich direkt aus dem Verweis zwischen einem Prozess und einer Ressource. Über die Zuordnung-Beziehung werden einer Ressource weitere Ressourcen zugeordnet, wenn diese zur Durchführung eines Prozesses benötigt werden. Die Transportzuordnung wird verwendet, um eine Transportressource einem Materialfluss zuzuordnen. Mit dem *Verweis auf Materialelement* wird eine Materialfluss-Beziehung mit dem zu transportierende Materialelement verknüpft. Über die Piktogramme *Verweis auf Anforderungen* und *Verweis auf Prozesse* werden die Beziehungen zu den anderen Aspekten dargestellt. Gestaltinformationen (*Verweis auf Gestalt*) umfassen das Layout des Produktionssystems oder 3D-Modelle der Maschinen, Werkzeuge, etc.

4.1.1 Grundlegende Richtlinien und Bedingungen der Modellierung

Für ein einheitliches Verständnis über die abgebildeten Inhalte und eine plausible Modellstruktur, müssen die Kriterien Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Richtigkeit bei der Modellerstellung berücksichtigt werden. In Anlehnung an die Arbeit von KAISER¹, werden hierzu die Grundklassen der Elemente vorgestellt und Regeln für die Modellierung der Partialmodelle definiert. Sie dienen bei der Erstellung eines Partialmodells als Anleitung, welche Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Modellierung bestehen. Weiterhin helfen sie dem Betrachter des Modells bei der Interpretation der Inhalte. So wird sichergestellt, dass die modellierten Informationen von unterschiedlichen Personen gleich verstanden werden. Unabhängig vom Partialmodell lassen sich grundlegende Regeln für die Modellierung festlegen.

- Regel:** *Jedes Element ist einer Klasse zugeordnet.*
- Regel:** *Jedem Element und jede Beziehung wird ein eindeutiger Identifikator zugewiesen.*
- Regel:** *Jedes Element ist mit einem Bezeichner benannt.*
- Regel:** *Für ein Element, das in unterschiedlichen Aspekten enthalten ist, wird in allen Partialmodellen der gleiche Bezeichner verwendet.*

Mit den genannten Regeln ist gewährleistet, dass Elemente und Beziehungen eindeutig identifizierbar sind und auf eine Klasse zugeführt werden können. Weiterhin gilt für alle Elemente, dass sie über Parametern näher beschrieben und mit Anforderungen verknüpft werden.

¹ KAISER präsentiert ein *Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme*. Über Modellierungsregeln und Bedingungen wird sichergestellt, dass Entwickler eine vergleichbare, vollständige und richtige Systemstruktur erstellen. Die Systemstruktur beinhaltet alle Element des mechatronischen Systems sowie deren Beziehungen untereinander [Kai13].

- Regel:** *Parameterangaben zu einem Element, werden über das Piktogramm „Parameter“ gekennzeichnet.*
- Regel:** *Verknüpfte Anforderungen werden über das Piktogramm „Verweis auf Anforderungen“ gekennzeichnet.*

4.1.2 Parametermodellierung

Die Beschreibung von Prozessen und Ressourcen in der Konzipierungsphase erfolgt über die Angabe von Parametern. Jeder Parameter wird als eine Informationseinheit angesehen und beschreibt ein Merkmal¹ eines Elements oder einer Beziehung im Detail.

- Regel:** *Je Parameter wird ein Merkmal des betrachteten Elements oder der betrachteten Beziehung spezifiziert.*

In Anlehnung an die Attribute von Fabrikelementen und Fabrikprozessen nach SCHADY (vgl. Kapitel 3.1.1) werden zwei Arten von Merkmalsausprägungen unterschieden, quantitative² und qualitative³. Quantitative Parameter werden für messbare Größen eingesetzt und bestehen aus einer Kombination aus Zahlenwerten und einer Einheit [DIN55350-12]. Neben der Angabe eines einzelnen Wertes sind Intervallangaben für den minimalen und maximalen Wert zulässig.

- Regel:** *Quantitative Parameter beschreiben ein Merkmal über einen Zahlenwert oder einem Intervall (Minimal- und Maximalwert) sowie einer Einheit.*

In frühen Planungsphasen liegen mitunter noch keine konkreten Zahlenwerte für ein Merkmal vor oder diese werden erst im Zuge der Konkretisierung ermittelt. Über qualitative Parameter werden die Merkmalswerte zunächst mit Hilfe einer Skala⁴ (gut-mittel-schlecht, günstig-durchschnittlich-ungünstig etc.) definiert.

- Regel:** *Qualitative Parameter beschreiben ein Merkmal über einen Merkmalswert einer gegebenen Skala.*

¹ Nach DIN 55350 ist ein Merkmal *eine Eigenschaft zum Erkennen oder zum Unterscheiden von Einheiten* [DIN55350-12, S. 2]. Unter einer Einheit wird zum Beispiel ein Produkt, ein Prozess, eine Person oder ein System verstanden [DIN55350-11].

² „Ein Merkmal, das eine messbare Dimension besitzt oder in Mengeneinheiten ausgedrückt werden kann, wird als quantitativ bezeichnet“ [Bou12, S. 11].

³ „Ein qualitatives Merkmal liegt vor, wenn den möglichen Merkmalswerten lediglich Namen oder Klassenbezeichnungen zugeordnet werden können“ [Bou12, S. 10].

⁴ Als Skala wird ein zweckmäßig geordneter Wertebereich eines Merkmals bezeichnet. Der Wertebereich umfasst die Menge aller Werte, die das betrachtete Merkmal annehmen kann [DIN55350-12, S. 2].

4.1.3 Partialmodell Prozesse

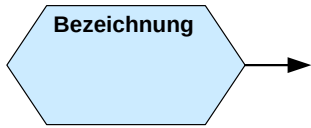
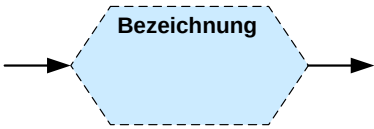
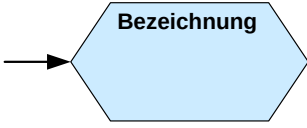
Für die Prozessmodellierung gelten unabhängig von den Grundklassen und deren Unterklassen folgende Regeln:

Regel: *Ein Prozess besitzt mindestens eine Reihenfolgebeziehung zu einem Eingangsmaterialelement und mindestens eine Reihenfolgebeziehung zu einem Ausgangsmaterialelement.*

Regel: *Das letzte Materialelement der Prozessfolge ist das fertige Produkt, bezogen auf die gesetzte Systemgrenze.*

Die Basiselemente zur Prozessmodellierung lassen sich in Grundklassen unterteilen. Für das Materialelement sind dies die Klassen *Rohteil*, *Zwischenzustand* und *Fertigteil*. In Tabelle 4-1 sind die Bedingungen aufgeführt, anhand derer sich Materialelemente den Grundklassen zuordnen lassen. Zusätzliche ist die graphische Notation dargestellt.

Tabelle 4-1: *Materialelement-Grundklassen*

Klasse	Bedingung	Graphische Notation
Rohteil	<i>Rohteile besitzen nur eine Reihenfolge-Beziehung zu einem nachgelagerten Prozess.</i>	
Zwischenzustand	<i>Zwischenzustände besitzen Reihenfolge-Beziehungen zu einem vorgelagerten und zu einem nachgelagerten Prozess.</i>	
Fertigteil	<i>Fertigteile besitzen nur eine Reihenfolge-Beziehung zu einem vorgelagerten Prozess.</i>	

Zusätzlich können Materialelemente als *Zukaufteil*¹ klassifiziert werden. Zukaufteile werden von Lieferanten bezogen, wodurch der Produktionsprozess dieser Elemente nicht weiter betrachtet werden muss.

Regel: *Nur Rohteile könnten als Zukaufteil deklariert werden.*

Regel: *Zukaufteile werden über das Piktogramm „Kaufteil“ gekennzeichnet.*

¹ vgl. [Nor12, S. 114ff.]

Die Klassifizierung der Prozesse erfolgt vor dem Hintergrund, dass das Partialmodell Prozesse die Schnittstelle zur Produktentwicklung bildet und zunächst keine konkreten Ressourcen zur Umsetzung der Prozesse berücksichtigt werden. Im Fokus stehen die Fertigungs- und Montageprozesse, die zur Herstellung des Produkts notwendig sind. Diese Prozessklassen (siehe Tabelle 4-2) haben einen direkten Einfluss auf die Materialelemente und somit auf die Wechselwirkungen mit der Produktentwicklung. Demzufolge werden sämtliche Logistikprozesse wie Transport, Handhaben oder Lagern im Prozessmodell nicht weiter betrachtet. Sie haben keinen direkten Einfluss auf Eigenschaften der Materialelemente und ergeben sich erst im weiteren Verlauf der Konzipierung durch die Zuordnung von Ressourcen zu den Fertigungs- und Montageprozessen. Eine Ausnahme bilden Lagerungsprozesse, die für den Herstellprozess erforderlich sind, z. B. prozessbedingte Ruhezeiten vor der Weiterverarbeitung. Solche Prozesse werden als Fertigungsprozesse erfasst und modelliert.

Tabelle 4-2: Prozess-Grundklassen

Klasse	Bedingung
Fertigungsprozess	<i>Ein Fertigungsprozess besitzt genau eine Reihenfolgebeziehung zu einem Eingangsmaterialelement und genau eine Reihenfolge-Beziehung zu einem Ausgangsmaterialelement.</i>
Montageprozess	<i>Ein Montageprozess besitzt mindestens zwei Reihenfolge-Beziehungen zu Eingangsmaterialelementen und eine Reihenfolge-Beziehung zu einem Ausgangsmaterialelement.</i>

Aus den aufgeführten Bedingungen ergibt sich, dass keine unterschiedliche graphische Notation der Prozessklassen erforderlich ist. Dies ist direkt anhand der Anzahl der Eingangsmaterialelemente ersichtlich. Die Zuordnung einer ausführenden Ressource wird über ein Piktogramm kenntlich gemacht.

Regel: *Die Zuweisung einer Ressource zu einem Prozess wird über das Piktogramm „Verweis auf Ressource“ gekennzeichnet.*

Regel: *Jeder Prozess wird durch eine Ressource umgesetzt.*

Bild 4-3 zeigt eine beispielhafte Prozessfolge mit den vorab beschriebenen Grundklassen für Prozesse und Materialelemente. Anhand der Piktogramme wird ersichtlich, für welche Elemente weitere Parameter definiert sind und welche Verweise zu anderen Partialmodellen bestehen.

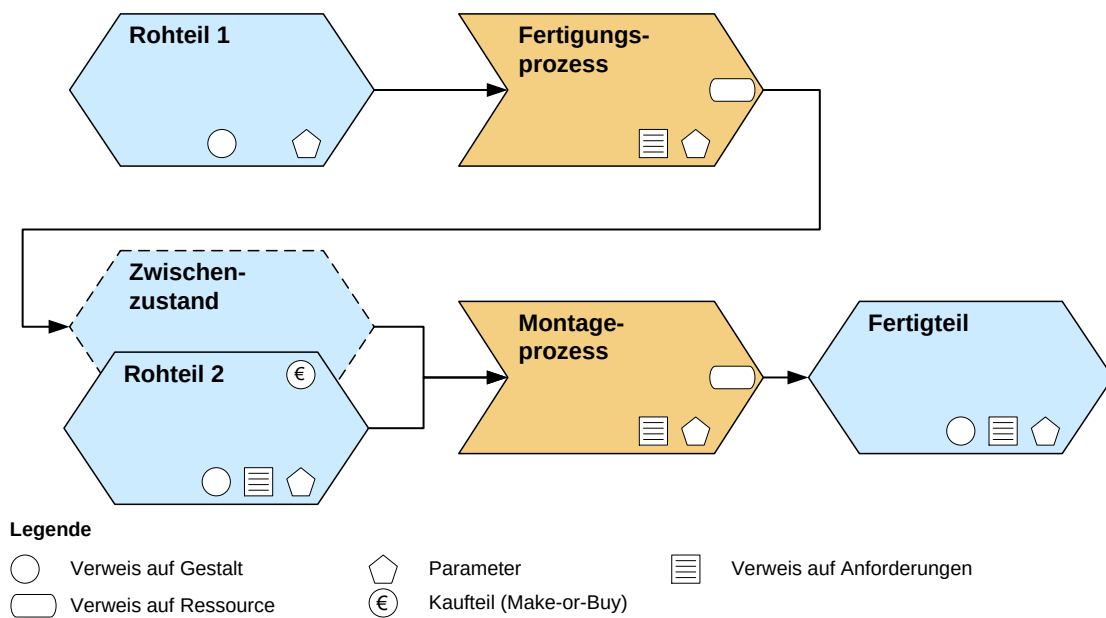


Bild 4-3: Schema zur Modellierung von Materialelementen und Prozessen

4.1.4 Partialmodell Ressourcen

Im Partialmodell Ressourcen werden die unterschiedlichen Betriebsmittel strukturiert, die zur Umsetzung der Prozessfolge notwendig sind. Zur Klassifikation von Ressourcen werden die fünf Grundklassen¹ nach REYES-PÉREZ aufgegriffen und um die Klasse Hilfsmittel ergänzt. Die Klassen Maschine, Transport und Lager werden als **Hauptressourcen** bezeichnet. Sie werden direkt für einen Fertigungs-, Montage- oder Logistikprozess benötigt. Hauptressourcen sind meist standortgebunden und müssen für die Gestaltmodellierung des Produktionssystems berücksichtigt werden. Die weiteren Ressourcenklassen Werker, Werkzeug und Hilfsmittel werden als **Nebenressourcen** bezeichnet. Nebenressourcen werden einer Hauptressource zugeordnet, wenn sie zur Durchführung des Prozesses erforderlich sind. Im Gegensatz zu Hauptressourcen sind Nebenressourcen meist standortunabhängige Betriebsmittel die während der Gestaltmodellierung nicht relevant sind. Sie dienen der Detaillierung einer Hauptressource und werden für weitere Planungsaufgaben wie der Werkzeug-, Vorrichtungs- oder Personalplanung benötigt.

Regel: Nur Hauptressourcen führen Produktionsprozesse aus und können einem Prozess im Partialmodell Prozesse zugewiesen werden.

Regel: Die Zuweisung von Nebenressourcen zu einer Hauptressource wird über die Zuordnung-Beziehung dargestellt.

¹ Maschine, Transport, Lager, Werker und Werkzeug vgl. [Rey11, S. 80]

Regel: Nebenressourcen können nicht direkt mit einem Prozess im Partialmodell Prozesse verknüpft werden.

Ressourcenbeziehungen

Die Beziehung *Zuordnung* wird verwendet, um Nebenressourcen einer Hauptressource zuzuordnen. Über die Beziehung wird ausgedrückt, dass die Nebenressource ein Teil der Hauptressource ist und für die Durchführung des Produktionsprozesses benötigt wird. Beispielsweise ist eine Werkzeugmaschine (Hauptressource) nur in der Lage eine Fertigungsprozess durchzuführen, wenn ein geeignetes Werkzeug (Nebenressource) verwendet wird. Das Werkzeug selbst ist jedoch nicht in der Lage den Fertigungsprozess umzusetzen. Durch die Zuordnung wird die Beschreibung der Hauptressource dahingehend detailliert, dass die Nebenressource als eigene Informationseinheit mit spezifischen Parametern abgebildet wird. Zur Darstellung der Beziehung wird eine durchgezogene Linie mit einer unausgefüllten Raute verwendet [Rey11, S. 83]. In Bild 4-4 ist a) die Zuordnung der Nebenressourcen *Werkzeug* und *Vorrichtung* zur Hauptressource *Fertigungssystem* sowie b) die Zuordnung der Nebenressource *Fahrer* zur Hauptressource *Transportsystem* dargestellt. Eine nähere Beschreibung der Zuordnung-Beziehung beispielsweise über Parameter erfolgt nicht.

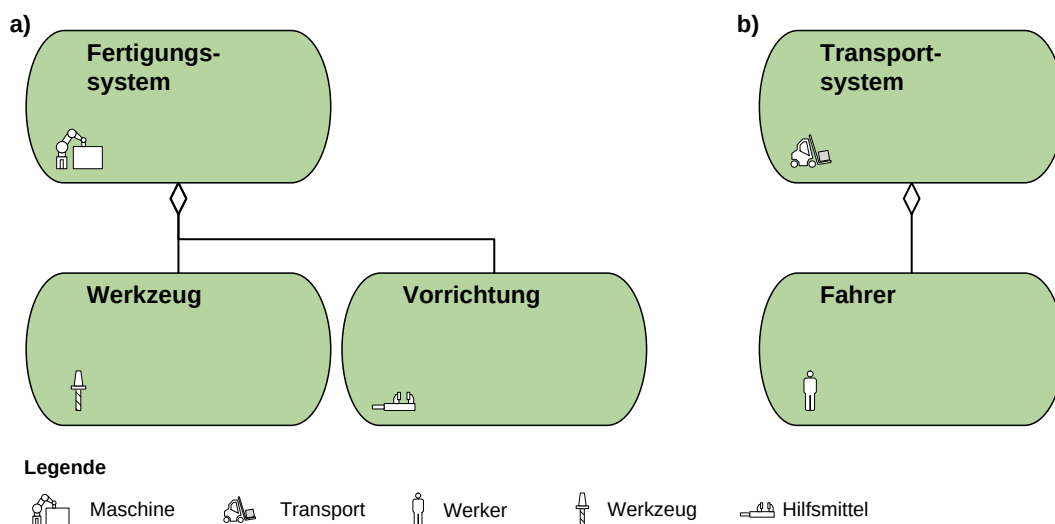


Bild 4-4: Zuordnung von Nebenressourcen zu Hauptressourcen

Anders verhält es sich mit der Beziehung *Materialfluss*. Wie bereits beschrieben, ergibt sich der Materialfluss zwischen den Fertigungs- und Montagesystemen aus den Reihenfolge-Beziehungen im Partialmodell Prozesse. Eine Materialfluss-Beziehung steht demnach für den Transport- bzw. Förderprozess eines Materialelements zwischen zwei Ressourcen. Damit ist jeder Materialfluss mit einem Materialelement verknüpft (siehe Bild 4-5). Für die Zuweisung geeigneter Transportsysteme ist die detaillierte Betrachtung der Materialfluss-Beziehungen erforderlich. Sie werden wie Fertigungs- und Montageprozesse über Parameter spezifiziert und ggf. mit Anforderungen verknüpft.

- Regel:** Je Reihenfolge-Beziehung im Partialmodell Prozesse ergibt sich eine Materialfluss-Beziehung im Partialmodell Ressourcen.
- Regel:** Eine Materialfluss-Beziehung ist mit einem Materialelement verknüpft und wird über Parameter beschrieben.
- Regel:** Der Zusammenhang zwischen einer Materialfluss-Beziehung und dem transportierten Element, wird über das Piktogramm „Verweis auf Materialelement“ dargestellt.
- Regel:** Parameterangaben werden über das Piktogramm „Parameter“, verknüpfte Anforderungen über das Piktogramm „Verweis auf Anforderungen“ gekennzeichnet.

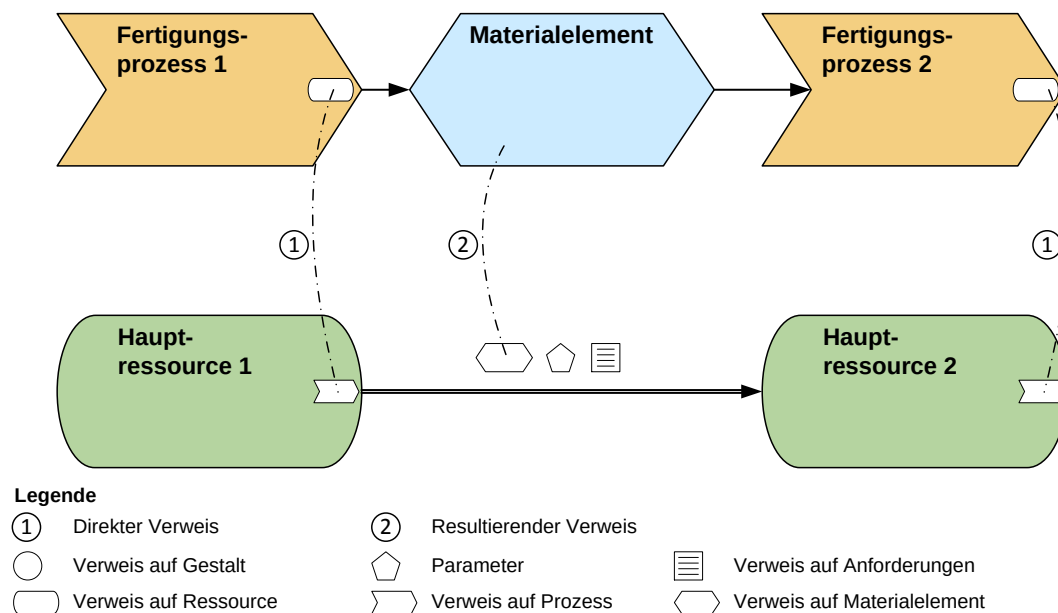


Bild 4-5: Modellierung der Materialfluss-Beziehung und Verweise zum Prozessmodell

Hauptressource Maschine

Mit der Hauptressource *Maschine* werden in erster Linie Fertigungs- und Montagesysteme modelliert. Sie setzen die im Partialmodell Prozesse spezifizierten Fertigungs- und Montageprozesse um. Eine direkte Verknüpfung zwischen dem Ressourcenmodell und dem Partialmodell Prozesse erfolgt somit nur über Ressourcen der Klasse Maschine. Direkt bedeutet in diesem Fall, dass die Zuweisung einer Maschine zu einem Prozess explizit vom Planer gesetzt werden muss. Alle weiteren Verknüpfungen zwischen den Partialmodellen resultieren aus den Prozess-Maschine-Verweisen, den Reihenfolge-Beziehungen im Prozessmodell sowie den zugeordneten Nebenressourcen. Analog zur Prozessmodellierung wird die Verbindung zwischen Prozess und Ressource durch ein Piktogramm dargestellt.

- Regel:** Ressourcen der Klasse Maschine dienen zur Umsetzung der Fertigungs- und Montageprozessen.
- Regel:** Die Zuweisung von Prozessen zu einer Ressource wird über das Piktogramm „Verweis auf Prozess“ gekennzeichnet.

Weiterhin wird die Hauptressource Maschine zur Darstellung von komplexen bzw. mehrstufigen Ressourcen verwendet, die sich aus mehreren Fertigungs- und Montagesystemen zusammensetzen. Dabei handelt es sich z. B. um Produktionszellen oder Produktionslinien. Je nach betrachteter Planungsebene ist es jedoch nicht erforderlich, eine komplexe Ressource im Detail darzustellen. In diesem Fall wird die Ressourcenstruktur abstrahiert und als Maschine dargestellt. In Bild 4-6 ist Modellierung von Maschinen-Ressourcen beispielhaft dargestellt.

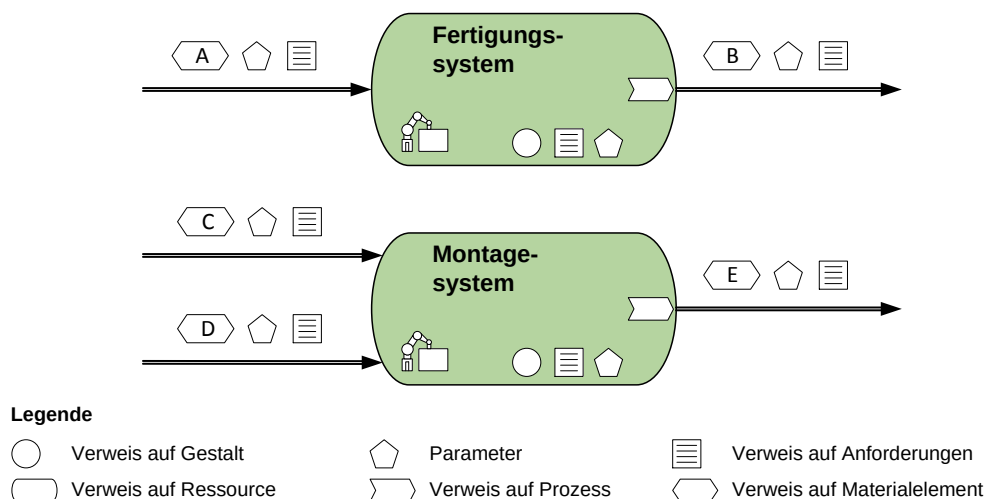


Bild 4-6: Schema zur Modellierung von Fertigungs- und Montagesystemen

Hauptressource Transport

Ressourcen der Klasse *Transport* spezifizieren Transportsysteme zur Umsetzung des außerbetrieblichen und innerbetrieblichen Materialflusses. Die Einteilung ergibt sich anhand der in Kapitel 2.4.2.3 vorgestellten Materialflusstufen. Verkehrsträger für den außerbetrieblichen Transport sind beispielsweise Straßen-, Schienen- oder Luftverkehr. Deren Planung ist Aufgabe einer übergeordneten Logistikplanung und erfolgt losgelöst vom spezifischen Produktionsprozess eines einzelnen Produkts. Die Modellierung von Transportressourcen im Zusammenhang mit der hier betrachteten Produktionssystemkonzipierung beschränkt sich daher vorwiegend auf den innerbetrieblichen Materialfluss zwischen Fertigungs- und Montagesystemen. Diese Art von Transportsystemen werden auch als Fördermittel bezeichnet¹.

¹ vgl. [GK06, Kap.5.3.4 - S.1]

- Regel:** Ressourcen vom Typ Transport setzen den Materialfluss zwischen Ressourcen vom Typ Maschine um.
- Regel:** Ressourcen vom Typ Transport besitzen keine eingehenden oder ausgehenden Materialfluss-Beziehungen zu anderen Ressourcen.

Die Zuweisung einer Transportressource zu einem Materialfluss wird über eine angepasste Zuordnung-Beziehung dargestellt. Anstelle der durchgezogenen Linie wird die Zuordnung-Beziehung mit einer gestrichelten Linie abgebildet (siehe Bild 4-7). Die zugrundeliegende Bedeutung der Beziehung ist gleichzusetzen mit dem Verweis einer Maschinen-Ressource auf einen Fertigungs- oder Montageprozess. Das Piktogramm „Verweis auf Prozess“ kann daher für Transportressourcen entfallen.

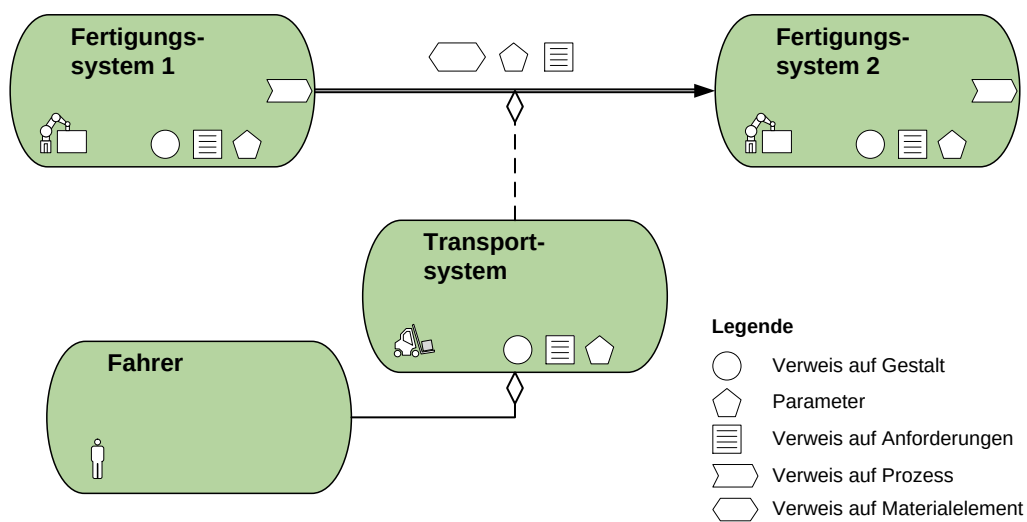


Bild 4-7: Schema zur Modellierung von einem Transportsystem zur Umsetzung eines Materialflusses

Hauptressource Lager

Die Modellierung von Lagerressourcen dient der weiteren Detaillierung des innerbetrieblichen Materialflusses hinsichtlich der Projektierung von Lagersystemen. Lagerressourcen werden für zwei Anwendungsfälle vorgesehen, der Abbildung der Systemgrenzen und als Puffer zwischen Maschinen. Die Systemgrenzen des betrachteten Produktionssystems werden über Eingangs- und Ausgangslager modelliert. Für jedes Materialelement vom Typ Rohteil im Prozessmodell, ist im Ressourcenmodell ein Eingangslager vorzusehen. Das Eingangslager dient als Quelle für neue Materialelemente und definiert die zeitlichen und mengenmäßigen Randbedingungen, mit denen diese ins System eintreten. Dementsprechend wird für das fertige Produkt ein Ausgangslager im Ressourcenmodell vorgesehen.

Regel: Ein Eingangslager besitzt keinen eingehenden Materialfluss und mindestens einen ausgehenden Materialfluss, der mit einem Materialelement vom Typ Rohteil im Prozessmodell verknüpft ist.

Regel: Ein Ausgangslager besitzt keinen ausgehenden Materialfluss und mindestens einen eingehenden Materialfluss, der mit dem Fertigteil im Prozessmodell verknüpft ist.

Zwischenlager bzw. Puffer im Produktionssystem entkoppeln den Materialfluss und sorgen für eine zeitliche Überbrückung zwischen Warenverfügbarkeit und Bedarf. Je Zwischenlager wird jeweils nur ein Materialelement betrachtet.

Regel: Ein Zwischenlager besitzt mindestens einen eingehenden Materialfluss und mindestens einen ausgehenden Materialfluss.

Regel: Die eingehenden und ausgehenden Materialflüsse eines Zwischenlagers sind mit dem gleichen Materialelement verknüpft.

In Bild 4-8 ist eine beispielhafte Ressourcenstruktur mit Fertigungssystemen und den unterschiedlichen Lagertypen. Die Ressourcen *Eingangslager* und *Ausgangslager* bilden, wie beschrieben, die Systemgrenzen.

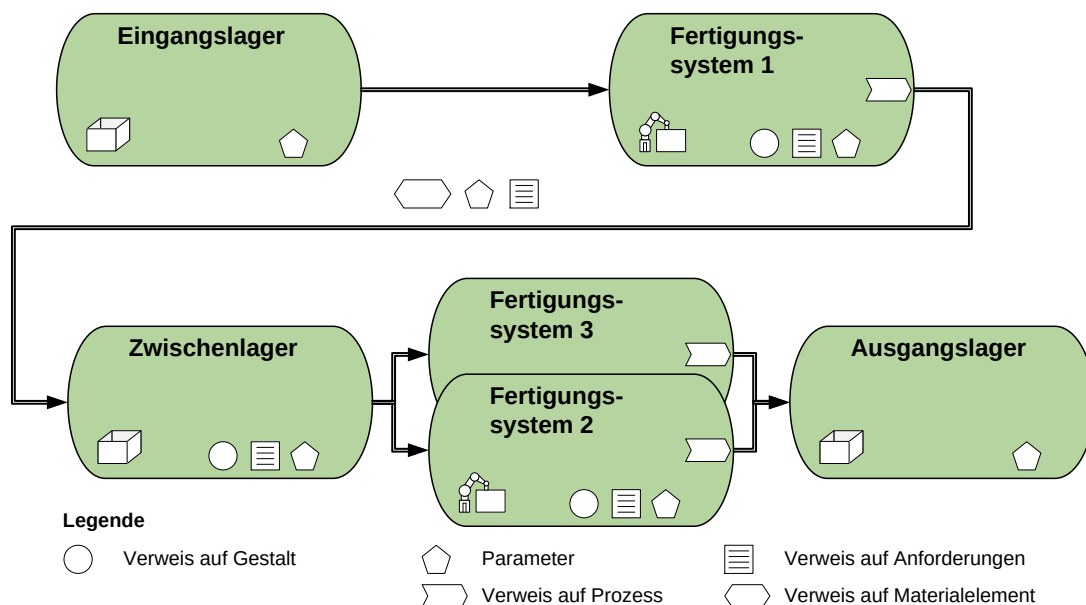


Bild 4-8: Schema zur Modellierung von Eingangs-, Zwischen- und Ausgangslagern

Nebenressource Werkzeug

Mit Ressourcen der Klasse Werkzeuge werden sämtliche Betriebsmittel modelliert, die eine Hauptressource zur Realisierung eines Produktionsprozesses unmittelbar benötigt.

Werkzeugressourcen sind aktiv an stoff-, eigenschafts- oder positionsverändernden Prozessen beteiligt. Sie werden dazu verwendet, das Materialelement vom Eingangszustand in den gewünschten Ausgangszustand zu überführen.

Eine Werkzeugressource beschränkt sich daher nicht nur auf die klassischen Werkzeuge im Bereich der Fertigung, sondern umfasst auch notwendige Betriebsmittel zur Montage, Logistik oder für manuelle Tätigkeiten. Beispiele sind etwa Greifersysteme für Industrieroboter, selbstfahrende Shuttle für schienengebundene Transportsysteme oder Schraubendreher für die manuellen Montage von Bauteilen.

Nebenressource Hilfsmittel

Alle weiteren Fertigungshilfsmittel, Montagehilfsmittel, Förderhilfsmittel und Lagerhilfsmittel werden über Ressourcen der Klasse Hilfsmittel modelliert und spezifiziert. Im Gegensatz zu Ressourcen der Klasse Werkzeuge sind Hilfsmittel während des Produktionsprozesses nicht aktiv an der Überführung des Materialelements in den Ausgangszustand beteiligt. Sie dienen beispielsweise dem Fixieren von Werkstücken (Vorrichtungen), dem Prüfen der Bearbeitungsqualität (Prüf- und Messmittel) oder dem Bilden von Lagereinheiten (Paletten, Gitterboxen).

Nebenressource Werker

Ein Werker nimmt in dieser Ressourcenbetrachtung eine besondere Rolle ein. Während Werkzeuge und Hilfsmittel von Maschinen verwendet werden und als passive Betriebsmittel aufgefasst werden können, ist der Werker aktiv in der Lage, eine Tätigkeit durchzuführen. Bei manuellen Tätigkeiten wäre der Werker somit als Hauptressource zu sehen, die direkt einen Fertigungs- oder Montageprozess durchführt. Weiterhin verwendet der Werker zusätzliche Werkzeuge oder Hilfsmittel. Andererseits erfolgt jede manuelle Tätigkeit durch einen Werker an einem Arbeitsplatz, z. B. einer Werkbank oder einem Montagetisch, innerhalb des Produktionsbereichs. Obwohl der Arbeitsplatz den Prozess nicht durchführt, wird er als Maschinenressource modelliert (Bild 4-9). Der Werker sowie alle notwendigen Werkzeuge und Hilfsmittel werden der Arbeitsplatz-Ressource zugeordnet.

Regel: *Für alle manuellen Tätigkeiten wird ein Arbeitsplatz der Ressourcenklasse Maschine modelliert.*

Regel: *Der durchführende Werker wird der Arbeitsplatz-Ressource über eine Zuordnung-Beziehung zugewiesen.*

Für alle weiteren Tätigkeiten eines Werker, wie die Maschinenbedienung, Wartungs- oder Reparaturarbeiten, wird die Werker-Ressource der jeweiligen Hauptressource zugewiesen. Der genaue Ablauf dieser Tätigkeiten wird nicht näher spezifiziert. Die Zuweisung eines Werkers zu einer Maschine-, Transport- oder Lagerressource unterstützt die spätere Mitarbeiterplanung.

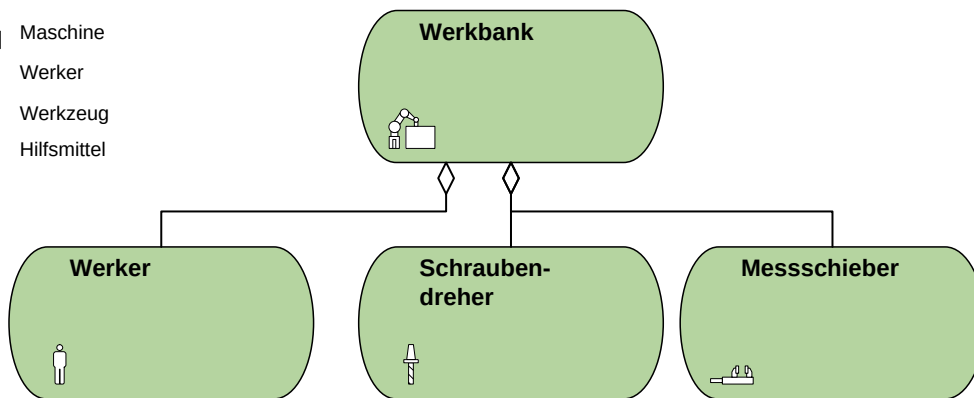
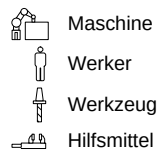
Legende

Bild 4-9: Schema zur Ressourcenmodellierung für manuelle Tätigkeiten

4.1.5 Partialmodell Gestalt

Die Modellierung der Produktionssystemgestalt fokussiert in erster Linie das Ideallayout. Darin werden die Positionen der Fertigungs- und Montagesysteme, der Lager und der Transportsysteme im betrachteten Produktionsbereich festgelegt. Im Ideallayout werden die unterschiedlichen Bereiche über ein Rechteck dargestellt.

Regel: Jede Ressource vom Typ Maschine oder Lager ist über ein idealisiertes Layout im Gestaltmodell abzubilden.

Regel: Eingangs- und Ausgangslager werden nur erfasst, wenn sich diese im betrachteten Bereich des Produktionssystems befinden.

In Bild 4-10 ist beispielhaft ein initiales Layout für das vorab gezeigte Ressourcenmodell zu sehen. Entsprechend der Modellierungsregeln werden die Hauptressourcen und die Flächen im Layout gleich genannt. Eingangs- und Ausgangslager befinden sich nicht im betrachteten Bereich und werden folglich nicht modelliert.

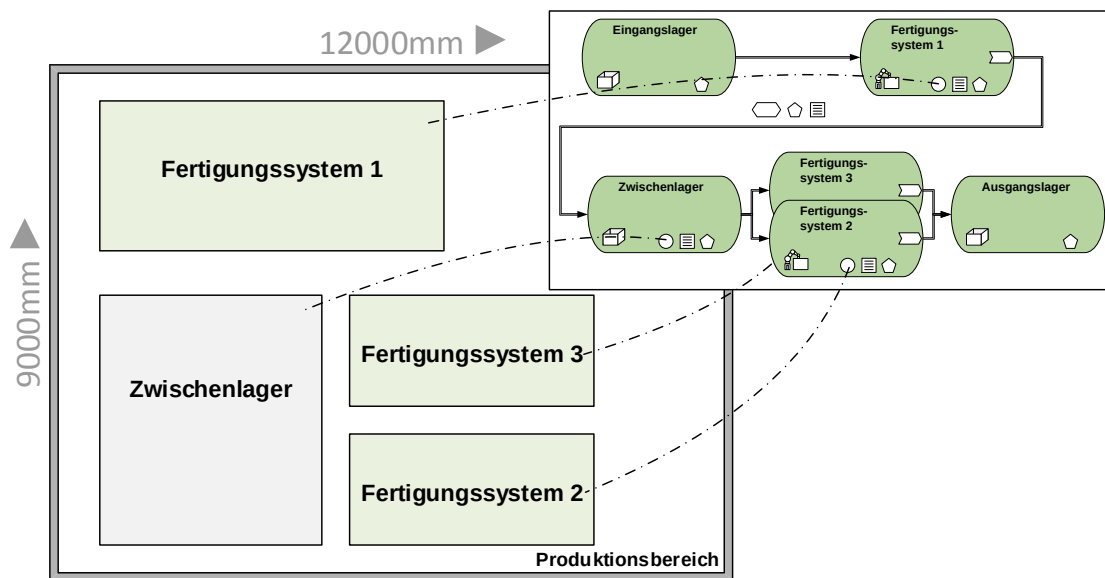


Bild 4-10: Schema zur Modellierung des initialen Produktionssystemlayouts

4.2 Ontologie zur Wissensaufbereitung für die Produktionssystemkonzipierung

Die nachfolgend vorgestellte Ontologie dient als Grundlage für den Aufbau eines wissensbasierten Systems zur Produktionssystemkonzipierung. Das System soll dem Anwender während der graphischen Modellierung des Produktionssystems den Zugriff auf benötigtes Fach- und Lösungswissen ermöglichen. Dies erfordert geeignete Konzepte zur semantischen Beschreibung von Materialelementen, Prozessen und Ressourcen. In Kapitel 4.2.1 wird zunächst die Grundstruktur der ProSyCo-Ontologie (Ontology for Production System Concept) vorgestellt. Die darin enthaltenen Grundkonzepte bilden die Verknüpfung zu den graphischen Elementen der Spezifikationstechnik CONSENS. In den weiteren Unterkapiteln werden die erweiterten Konzepte für die Prozess- und Ressourcenmodellierung sowie die Abbildung unterschiedlicher Parameterarten erläutert. Die Umsetzung der ProSyCo-Ontologie basiert auf den vom W3C standardisierten Meta-Ontologien OWL und RDF/RDFS (vgl. Kapitel 2.7.2).

4.2.1 Grundstruktur der Ontologie

Der grundlegende Aufbau der ProSyCo-Ontologie orientiert sich an den abzubildenden Aspekten des Produktionssystems. Zielsetzung der Ontologie ist die Beschreibung notwendiger Wissens- und Informationseinheiten, auf die der Anwender im Zuge der Konzipierung zugreifen kann. Art und Umfang der Wissensnutzung richten sich nach der Komplexität der Planungsaufgabe sowie der jeweiligen Planungsphase (siehe Kapitel 2.4.2.1).

Neben der Synthese¹ geeigneter Ressourcen für gegebene Produktionsprozesse soll der Anwender bei der Modellierung der unterschiedlichen Produktionssystemaspekte unterstützt werden. Dies umfasst die Bereitstellung von Informationen über bekannte Materialelemente, Prozesse und Ressourcen sowie das Abfragen von Standardparametern oder zusätzlich erforderlichen Elementen (notwendige Prozesse oder Nebenressourcen).

Die relevanten Elemente für den Aufbau der Ontologie sowie deren Zusammenhänge wurden somit in Kapitel 4.1 beschrieben. Die dort vorgestellten Hauptelemente für die Prozess- und Ressourcenmodellierung finden sich als Oberklassen (*MaterialElement*, *Process*, *Resource* und *Parameter*) in der Grundstruktur der Ontologie (siehe Bild 4-11) wieder. Die Oberklasse *MaterialElement* wird weiter aufgeteilt in die drei Materialelement-Grundklassen Produkt (*Product*), Zwischenzustand (*IntermediateState*) und Rohteil (*RawPart*). Entsprechend erfolgt die Unterteilung der *Process*-Klasse in die Grundklassen Fertigungsprozess (*ManufacturingProcess*), Montageprozess (*AssemblyProcess*) sowie die weiteren Logistikprozesse (*LogistikProcess*). Die Reihenfolge-Beziehung zwischen Materialelementen und Prozessen wird über die *hasInput*- und *hasOutput*-Relationen abgebildet.

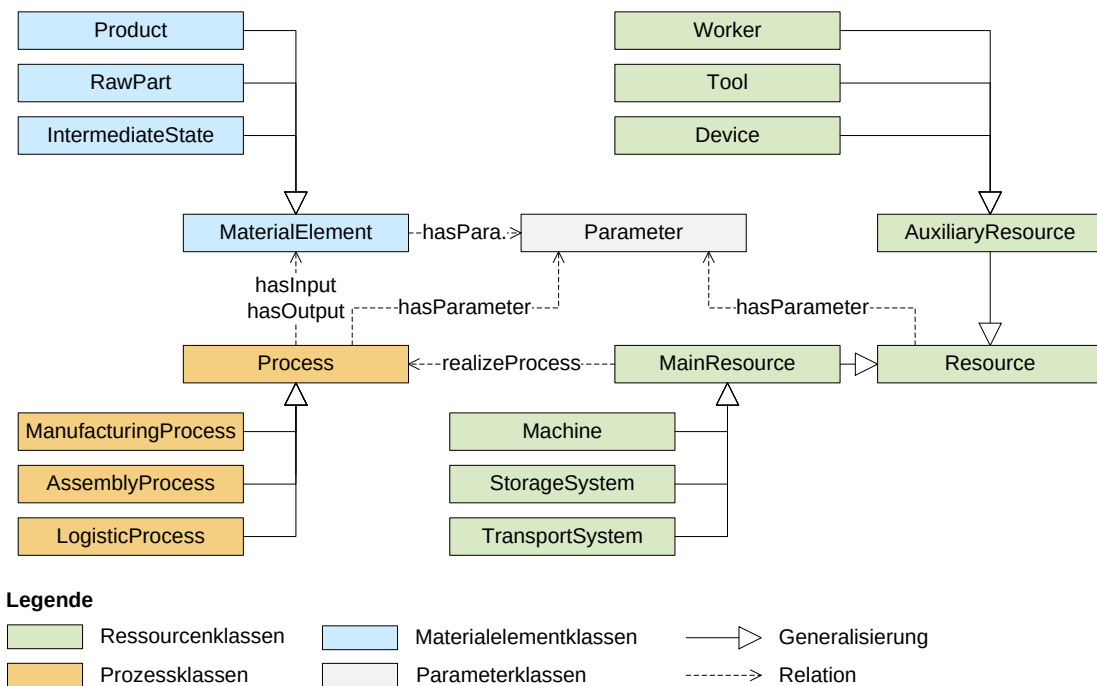


Bild 4-11: Übersicht der ProSysCo-Ontologie (vereinfacht)

Auf Seiten der Ressourcenklassen erfolgt zunächst die Unterteilung in Haupt- und Nebenressourcen (*MainResource* und *AuxiliaryResource*). Über die *realizeProcess*-Relation

¹ Bei der Synthese handelt es sich um einen Vorgang des Suchens und Findens sowie des Zusammensetzens und Kombinierens. Durch das Zusammenfügen einzelner Teillösungen wird ein funktionsfähiges Gesamtsystem erzeugt [PBF+07, S. 75].

wird festgelegt, dass nur Instanzen der *MainResource*-Klasse direkt mit einer *Process*-Instanz verknüpft werden können. Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Haupt- und Nebenressourcen sind als Unterklassen von *MainResource* und *AuxiliaryResource* abgebildet. Die *hasParameter*-Relation verdeutlicht, dass Instanzen der jeweiligen Klassen über Instanzen der Klasse *Parameter* näher beschrieben werden. Diese Beziehung entspricht somit dem Parameter-Piktogramm der Grundelemente.

4.2.2 Klassen und Relationen zur Parametermodellierung

Zielsetzung der **Parameter-Ontologie** ist die Bereitstellung notwendiger Klassen und Relationen zur semantischen Repräsentation von Parameterangaben über Materialelemente, Prozesse und Ressourcen. In Kapitel 4.1.2 wurden die Regeln zur Beschreibung von Parametern erläutert. So bezieht sich jeder Parameter auf ein bestimmtes Merkmal und im Falle der quantitativen Parameter auf ein oder zwei Kombinationen aus Zahlenwert und Einheit. Solche Kombinationen lassen sich mit der Web Ontology Language nicht ohne weiteres abbilden¹. Weiterhin liefern die Parameter die Eingangsdaten für die Durchführung von Bewertungsmethoden oder Simulationsstudien (siehe Kapitel 2.5.1). Im Zuge der Konzipierung müssen alle simulationsrelevanten Parameter erfasst werden. Für die zielgerichtete Spezifikation der unterschiedlichen Elemente müssen Informationen, welche Parameter für welche Analysemethode erforderlich sind, zusätzlich abgebildet werden.

Ein Parameter ist demnach mehr als ein reiner Zahlenwert, der ein Element beschreibt. Er kann als Informationseinheit angesehen werden, die dem Anwender eine Reihe von Informationen für die Konzipierung liefert. Vor diesem Hintergrund wird in der ProSyCo-Ontologie die *Parameter*-Klasse für eine detailliertere Modellierung von Parameterangaben genutzt. Je Parameter wird eine Instanz dieser Klasse erzeugt, die sämtliche Informationen des Parameters beinhaltet. Das zu beschreibende Element wird über die *hasParameter*-Relation mit der *Parameter*-Instanz verbunden. Bild 4-12 zeigt die Übersicht der Klassen und Relationen zur Modellierung von Parametern. Die Unterklassen der *Parameter*-Klasse sind die elementspezifischen *Parameter*, *MaterialElementParameter*, *ProcessParameter* und *ResourceParameter* sowie die zwei Parameterarten *QuantityParameter* und *QualityParameter*.

¹ Nähere Erläuterungen sind Abschnitt A3.1 aufgeführt.

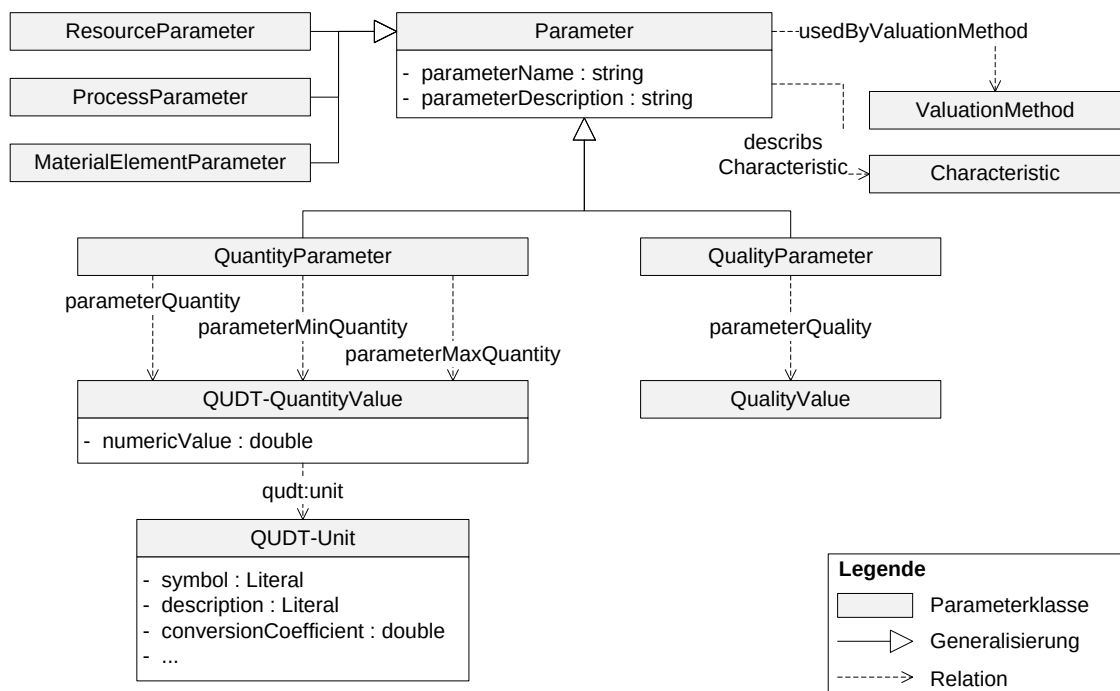


Bild 4-12: Klassen und Relationen zur Parametermodellierung

Modellierung allgemeiner Parameterinformationen

Jeder Parameter beschreibt ein spezifisches Merkmal, welches als Instanz der *Characteristic*-Klasse abgebildet wird. Dies bietet die Möglichkeit, die Merkmale weiter zu beschreiben und mit zusätzlichen Informationen zu versehen. Die Verbindung zwischen einer *Parameter*-Instanz und der *Merkmal*-Instanz wird über die *describesCharacteristic*-Relation hergestellt. Ähnlich verhält es sich mit dem Verweis auf Bewertungsmethoden (*ValuationMethod*). Über die *usedByValidationMethod*-Relation wird ausgedrückt, dass ein Parameter für eine Bewertungsmethode relevant ist und folglich im Produktionssystemkonzept angegeben werden muss.

Modellierung von quantitativen Merkmalsausprägungen

Für die Angaben einer Zahlenwert-Einheit-Kombination bei quantitativen Parametern wird auf die *QuantityValue*-Klasse der QUDT-Ontologie¹ zurückgegriffen. *QuantityValue*-Instanzen werden über das DatatypeProperty *numericValue* und die ObjectProperty *qudt:unit* beschrieben. Mit dem *numericValue* wird der Zahlenwert im Double-Format angegeben. Die Angabe der Einheit erfolgt über den Verweis auf eine Instanz der QUDT-Klasse *Unit*. Für jede Einheit stehen weitere Angaben zur Verfügung. Sie umfassen z. B.

¹ Die QUDT-Ontologie stellt Konzepte zur Modellierung von Mengen (Quantities), Einheiten (Units), Dimensionen (Dimensions) und Datentypen (Data Types) zu Verfügung. Neben den Vokabularen zur Beschreibung der einzelnen Bereiche, sind umfangreiche Instanzdaten verfügbar. Bspw. sämtliche Einheiten des internationalen Einheitensystems (SI-Einheiten). Die Ontologien sind abrufbar unter <http://www.linkedmodel.org/catalog/qudt/1.1/index.html>

das Symbol („mm“) oder Umrechnungsfaktoren auf die SI-Basiseinheiten (0,001). Die Angaben eines einzelnen Merkmalwerts erfolgt über die *parameterQuantity*-Relation. Wird ein Intervall angegeben, werden die Relationen *parameterMinQuantity* und *parameterMaxQuantity* eingesetzt.

Modellierung von qualitativen Merkmalsausprägungen

Die Angabe qualitativer Merkmalsausprägungen erfolgt über die *parameterQuality*-Relation. Sie verbindet die Parameter-Instanz mit einer Instanz der Klasse *QualityValue*. Darin werden die möglichen Ausprägungen des Merkmals als Instanzen abgebildet und in einer *Collection* gruppiert. Die Collection definiert die Skala (vgl. Kapitel 4.1.2) innerhalb derer sich der Merkmalswert befindet.

4.2.3 Klassen und Relationen zur Prozessmodellierung

Die **Prozess-Ontologie** stellt notwendige Klassen und Relationen zur Modellierung von Materialelementen, Prozessen und Prozessfolgen zur Verfügung. In Kapitel 4.2.1 wurden die grundlegenden Klassen bereits vorgestellt. Bild 4-13 zeigt eine detaillierte Sicht auf die Process-Ontologie.

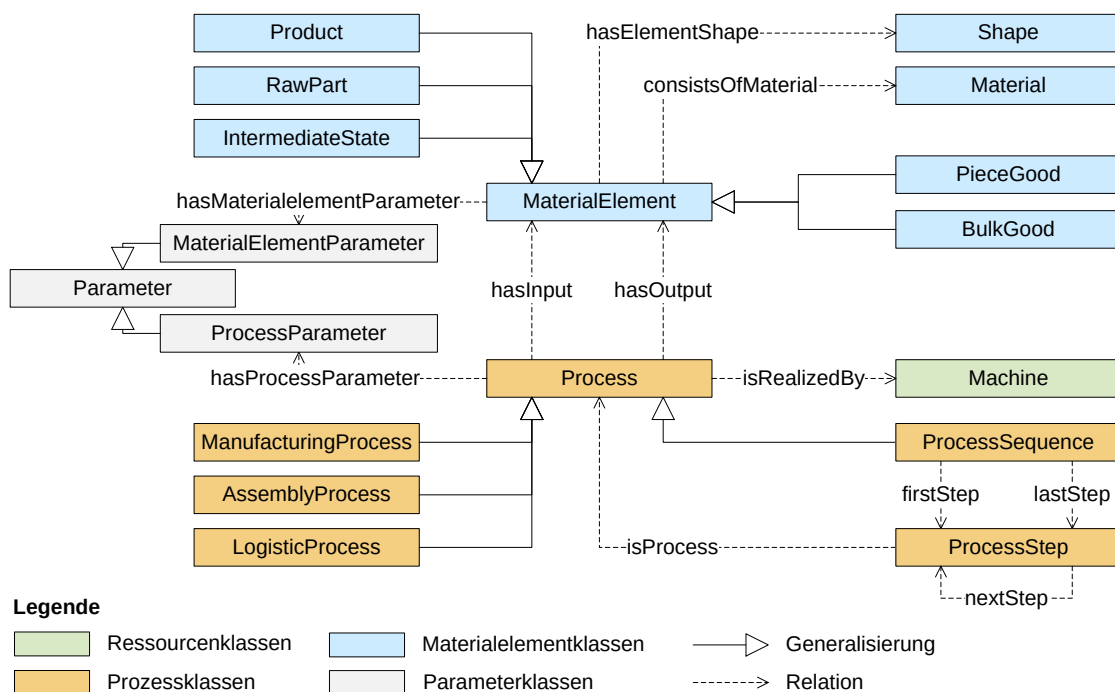


Bild 4-13: Klassen und Relationen zur Prozessmodellierung

Modellierung von Materialelementen

Zusätzlich zu den Parametern (*MaterialElementParameter*) wird ein Materialelement über seine Gestalt (*Shape*) und das Material (*Material*) beschrieben. Beide Angaben

könnten als Teilbereich der Parameter aufgefasst werden, sie werden jedoch als eigenständige Konzepte abgebildet. Damit sind weitere Modellierungsmöglichkeiten gegeben, um Gestalt und Material zu beschreiben. Im Hinblick auf die frühe Planungsphase werden die Gestaltinformationen auf geometrische Grundkörper (Rechteck, Zylinder, Ringe, etc.) sowie deren charakteristischen Merkmale (Länge, Breite, Durchmesser, etc.) reduziert. Die planungsrelevanten Informationen werden semantisch aufbereitet und können für die Auswahl geeigneter Prozesse und Ressourcen berücksichtigt werden. Eine vollständige Abbildung der Gestalt mit allen Details ist meist nicht erforderlich und würde einen erheblichen Modellierungsaufwand verursachen. Ebenso werden die Materialeigenschaften auf Merkmale reduziert, die zur Planung des Produktionssystems relevant sind. Alternativ kann auf bestehende Material-Ontologien oder Gestalt-Ontologien zurückgegriffen werden¹.

Modellierung von Prozessen und Prozessfolgen

Prozess-Instanzen werden über *ProcessParameter* beschrieben und über die *hasInput*- und *hasOutput*-Relation mit Materialelement-Instanzen in Beziehung gebracht (siehe Bild 4-14). Die Kombination aus Zahlenwert und Einheit des dargestellten Prozessparameters wird als Blank Node² modelliert. Über die *isRealizedBy*-Relation wird ein Prozess mit Instanzen der *Machine*-Klasse verknüpft, die in der Lage sind den Prozess auszuführen. Die *isRealizedBy*-Relation ist invers mit der bereits vorgestellten *realizeProzess*-Relation zwischen der *Resource*- und *Process*-Klasse.

¹ Beispielsweise bietet die MDSL-Ontologie eine eigenständige Material-Ontologie. Abrufbar unter: <http://infoneer.txstate.edu/ontology/downloads/Material.owl>

² Ein Blank Node (leerer Knoten) bezeichnet eine RDF-Ressource, die nicht mittels einer globalen URI adressiert wird. Blank Nodes werden häufig zur Strukturierung von Daten eingesetzt und dienen als Hilfsknoten.

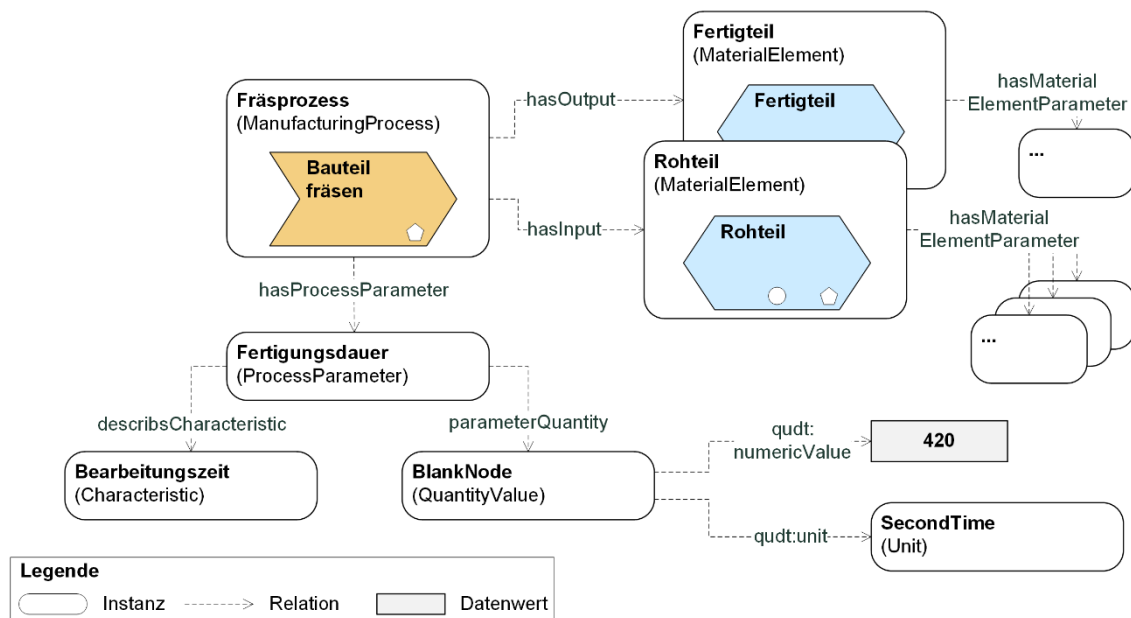


Bild 4-14: Modellierung einer Prozess-Instanz mit verknüpften Materialelementen und Parametern

Für die Modellierung von Prozessfolgen wird die Klasse *ProcessSequence* verwendet. Sie ist eine Unterklasse von *Process*, wodurch jede Prozessfolge ebenfalls als Prozess aufgefasst wird. Die Prozessfolge setzt sich aus einzelnen Prozessschritten (*ProcessStep*) zusammen, die über die *isProcess*-Relation auf eine Prozess-Instanz verweisen. Prozessschritte dienen zur Abbildung der Reihenfolge der Prozesse innerhalb der Prozessfolge. Das *ProcessStep*-Konzept ist erforderlich, da ein Prozess prinzipiell in mehreren Prozessfolgen verwendet werden kann. Die Informationen über die Reihenfolge können somit nicht an einer Prozess-Instanz annotiert werden, da der Bezug zur Prozessfolge fehlen würde. Je Prozess-Instanz einer Prozessfolge wird eine Prozessschritt-Instanz erzeugt. Über die *firstStep*- und *lastStep*-Relationen werden der erste und letzte Prozessschritt festgelegt. Dazwischenliegende Prozessschritte werden jeweils über die *nextStep*-Relation in Beziehung gesetzt. Die explizite Angabe des letzten Prozessschrittes wird benötigt, um die Materialelemente der Prozessfolge mittels SWRL-Regeln¹ zu bestimmen.

- Ableiten der Eingangselemente einer Prozessfolge

```
ProcessSequence(?ProSeq), firstStep(?ProSeq, ?Step),
ProcessStep(?Step), isProcess(?Step, ?Pro), Process(?Pro),
hasInput(?Pro, ?El), MaterialElement(?El)
-> hasInput(?ProSeq, ?El)
```

¹ Erläuterungen zu SWRL-Regeln siehe Kapitel 2.7.2.3.

- Ableiten der Ausgangselemente einer Prozessfolge

```

ProcessSequence(?ProSeq), lastStep(?ProSeq, ?Step),
ProcessStep(?Step), isProcess(?Step, ?Pro), Process(?Pro),
hasOutput(?Pro, ?El), MaterialElement(?El)
-> OutInput(?ProSeq, ?El)

```

Bild 4-15 veranschaulicht die Modellierung einer Prozessfolge mittels Instanzen der Klasse *ProcessStep*. Die Relationen zwischen den Instanzen *Bauteilfertigung*, *Rohteil* und *Fertigteil* können wie beschrieben mit Hilfe eines Reasoners inferriert werden.

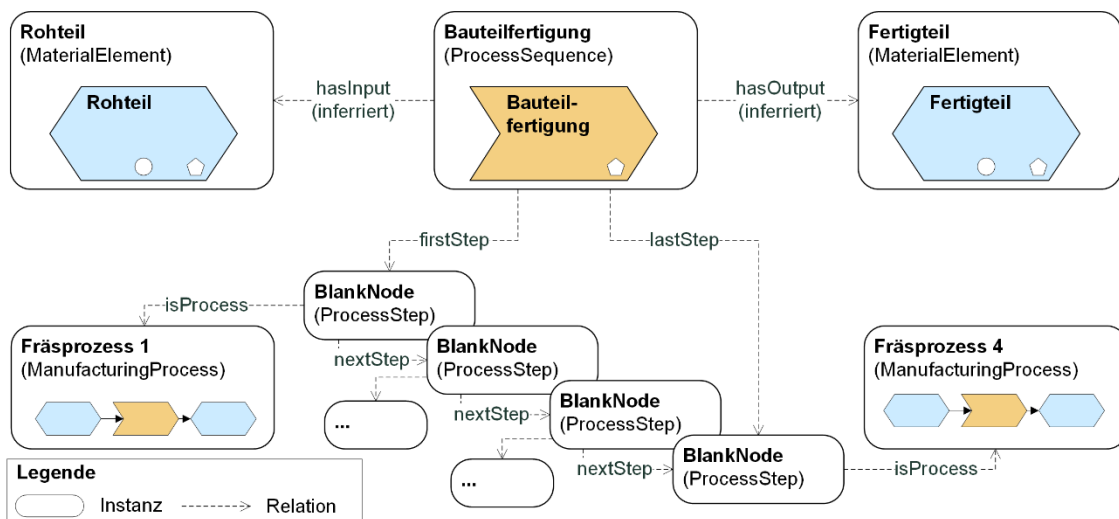


Bild 4-15: Modellierung einer Prozessfolge

4.2.4 Klassen und Relationen zur Ressourcenmodellierung

Die **Ressourcen-Ontologie** beinhaltet alle notwendigen Klassen und Relationen zur Beschreibung von Haupt- und Nebenressourcen, deren Zuordnung sowie von komplexen Ressourcen. Komplexe Ressourcen setzen sich aus mehreren Haupt- und Nebenressourcen zusammen. Im Vergleich zur Beschreibung der Prozesse sind hierzu umfangreichere Konzepte erforderlich, um die unterschiedlichen Sachverhalte abzubilden. Ausgehend von der vorgestellten Grundstruktur der ProSyCo-Ontologie zeigt Bild 4-16 die relevanten Konzepte für die Ressourcenmodellierung. Die Oberklasse *Resource* wird über die *hasResourceParameter*-Relation mit den Ressourcenparametern (*ResourceParameter*) verknüpft. Von den Klassen *MainResource* und *AuxiliaryResource* leiten sich die drei Hauptressourcen und drei Nebenressourcen ab. Jede weitere Unterklasse einer Ressource lässt sich auf eine der sechs Klassen zurückführen. Sie bilden die Schnittstelle zu den Elementen der graphischen Modellierung mit CONSENS.

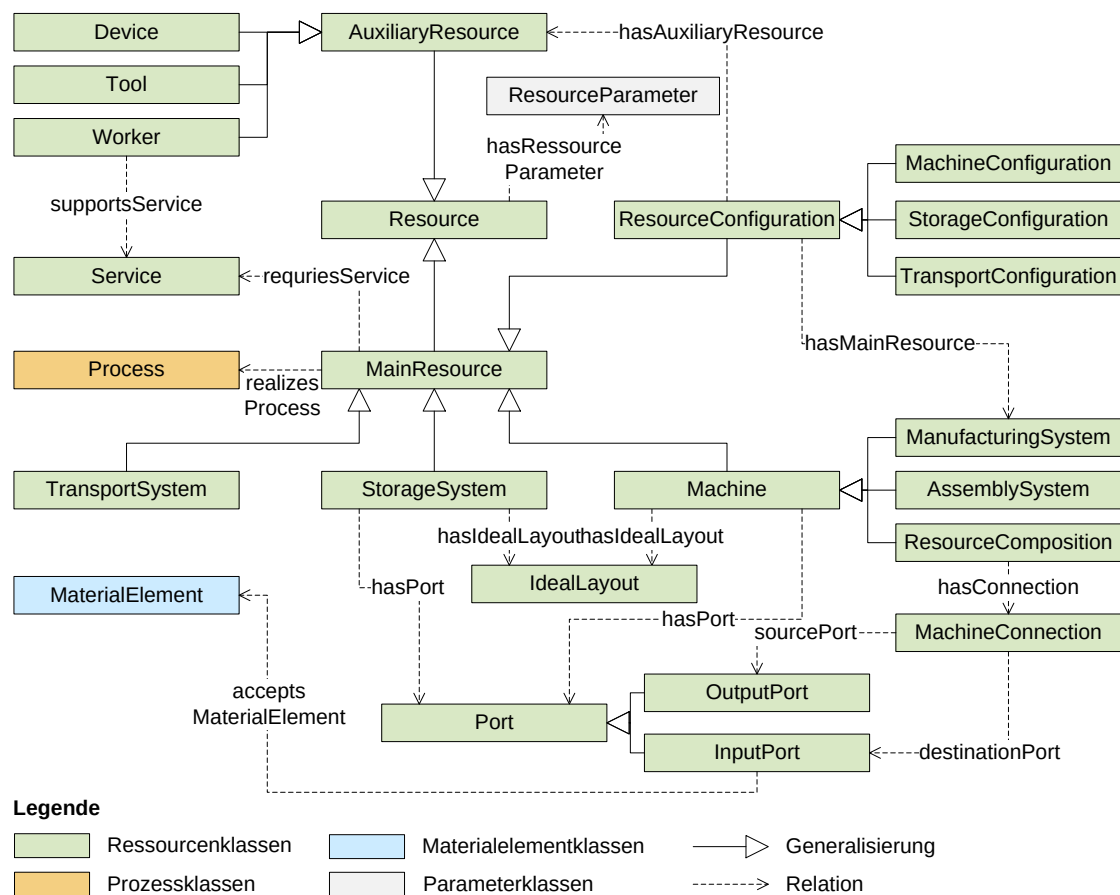


Bild 4-16: Klassen und Relationen zur Modellierung von Ressourcen (vereinfacht)

Instanzen der Klassen *StorageSystem* und *Machine* werden über ihr Layout (*IdealLayout*) und ihre Materialfluss-Schnittstellen (*Port*) weiter beschrieben. Angaben zum Layout umfassen Länge und Breite der rechteckigen Grundfläche des Systems. Die explizite Modellierung der Materialfluss-Schnittstellen dient zur Abbildung von komplexen Ressourcen, den Ressourcenkompositionen (*ResourceComposition*).

Modellierung von Ressourcenkonfigurationen

Die Zuordnung von Nebenressourcen zu einer Hauptressource erfolgt über die Klasse *ResourceConfiguration* sowie die *hasAuxiliaryResource*- und *hasMainResource*¹-Relationen. Eine Ressourcenkonfiguration besteht aus genau einer Hauptressource sowie mindestens einer Nebenressource. Entsprechend der drei Hauptressourcen ergeben sich die drei Unterklassen *Machine*-, *Storage*- und *TransportConfiguration*. Als Unterklasse von *MainResource* können *ResourceConfiguration*-Instanzen ebenfalls mit Prozessen ver-

¹ Die Range der *hasMainResource*-Relation ist auf die Klassen *TransportSystem*, *StorageSystem*, *ManufacturingSystem* und *AssemblySystem* begrenzt. Damit kann eine Ressourcenkonfiguration keine Hauptressource einer anderen Ressourcenkonfiguration sein.

knüpft werden. Die Ressourcenkonfiguration wird benötigt, um Prozess-Instanzen eindeutig einer Kombination von unterschiedlichen Nebenressourcen zuzuordnen, beispielsweise zur Modellierung einer CNC-Fräsmaschine (siehe Bild 4-17). Die Fräsmaschine wird zunächst als Instanz der Klasse *ManufacturingMachine* modelliert und mit prozessunabhängigen Parametern (z. B. Werkzeugwechselzeit, Magazinplätze und Layoutangaben) beschrieben. Im gezeigten Beispiel setzt sich jede Ressourcenkonfiguration aus einer Werkzeug/Vorrichtung-Kombination zusammen, die zur Umsetzung des jeweiligen Fräsprozesses benötigt werden. Die Konfigurationen können mit prozessspezifischen Parametern detailliert werden.

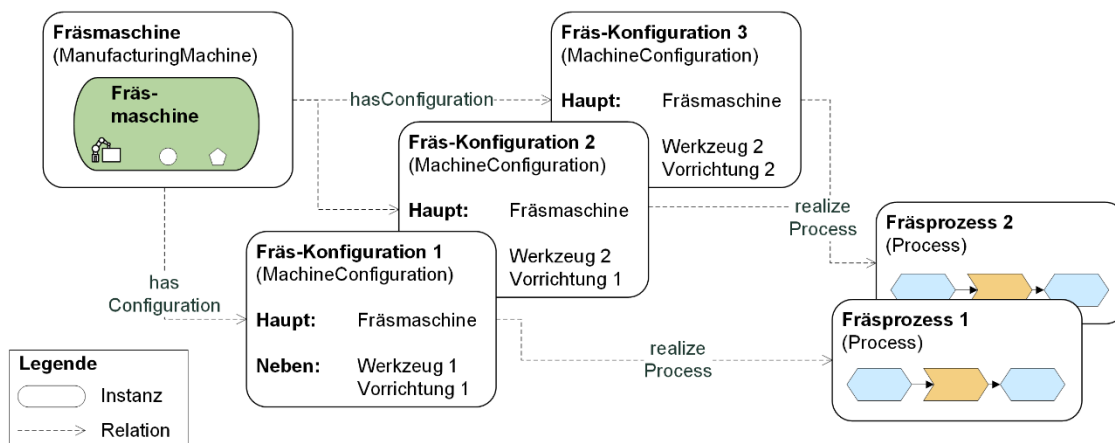


Bild 4-17: Modellierung von Maschinenkonfigurationen

Ressourcenkonfigurationen sind detaillierte Betrachtungen eines Fertigungs-, Montage-, Transport- oder Lagersystems im Hinblick auf die notwendigen Nebenressourcen. Die Hauptressource einer Konfiguration ist somit prinzipiell dafür geeignet, über die Konfiguration verknüpfte Prozesse durchzuführen. Gleichzeitig verfügt jede Konfiguration über die Parameter der Hauptressource. Diese Informationen werden jedoch nicht explizit modelliert. Sie werden über drei generelle SWRL-Regeln hergeleitet:

- Parameter der Hauptressource auf die Konfiguration übertragen

```
ResourceConfiguration(?ResConf), MainResource(?MainRes),
hasMainResource(?ResConf, ?MainRes), Parameter(?MainResPara),
hasParameter(?MainRes, ?MainResPara)
-> hasParameter(?ResConf, ?MainResPara)
```

- Layoutdaten der Hauptressource auf die Konfiguration übertragen

```
ResourceConfiguration(?ResConf), MainResource(?MainRes),
hasMainResource(?ResConf, ?MainRes), IdealLayout(?MainResLayout),
hasIdealLayout(?MainRes, ?MainResLayout)
-> hasIdealLayout(?ResConf, ?MainResLayout)
```


- Durchführbare Prozesse der Konfiguration auf die Hauptressource übertragen

```
ResourceConfiguration(?ResConf), MainResource(?MainRes),  
hasMainResource(?ResConf, ?MainRes), Process(?Pro),  
realizeProcess(?ResConf, ?Pro)  
-> realizeProcess(?MainRes, ?Pro)
```

Modellierung von Ressourcenkompositionen

Komplexe Ressourcenstrukturen werden über die Klasse *ResourceComposition* modelliert. Als Unterklasse von *Machine*, wird jede Ressourcenkomposition ebenfalls als Einzelmaschine erfasst. Die Verbindungen zwischen den unterschiedlichen Hauptressourcen innerhalb einer Ressourcenkomposition werden über die Klasse *ResourceConnection* abgebildet. Eine *ResourceConnection* beinhaltet Angaben über die Start- und Zielressource und wird über die *hasConnection*-Relation mit der Ressourcenkomposition verbunden. Die Startressource einer Ressourcenverbindung wird über die Relationen *sourceResource* und *sourcePort* abgebildet, die Zielressource entsprechend über *destinationResource* und *destinationPort*. Weiterhin wird der resultierende Transportprozess über die *induceMaterialtransport*-Relation angegeben. Die *ResourceConnection*-Instanz dient nur als Informationscontainer und kann als Blank Node modelliert werden. Die Angabe der Hauptressource ist zwingend erforderlich, damit eine Verbindung und damit der Materialfluss zwischen zwei Ressourcen abgebildet werden kann. Informationen zu den Materialfluss-Schnittstellen (Ports) dienen der weiteren Detaillierung der Verbindung, z. B. durch Angabe von Materialelementen oder Förderhilfsmitteln, die über die Schnittstelle aufgenommen werden können. Bild 4-18 zeigt ausschnittsweise die Modellierung einer Produktionslinie mit vier Hauptressourcen. Der Materialfluss zwischen der Fräs-Konfiguration 2 und dem Zwischenlager wird durch einen Förderband umgesetzt. Auf die Darstellung sämtlicher Relationen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

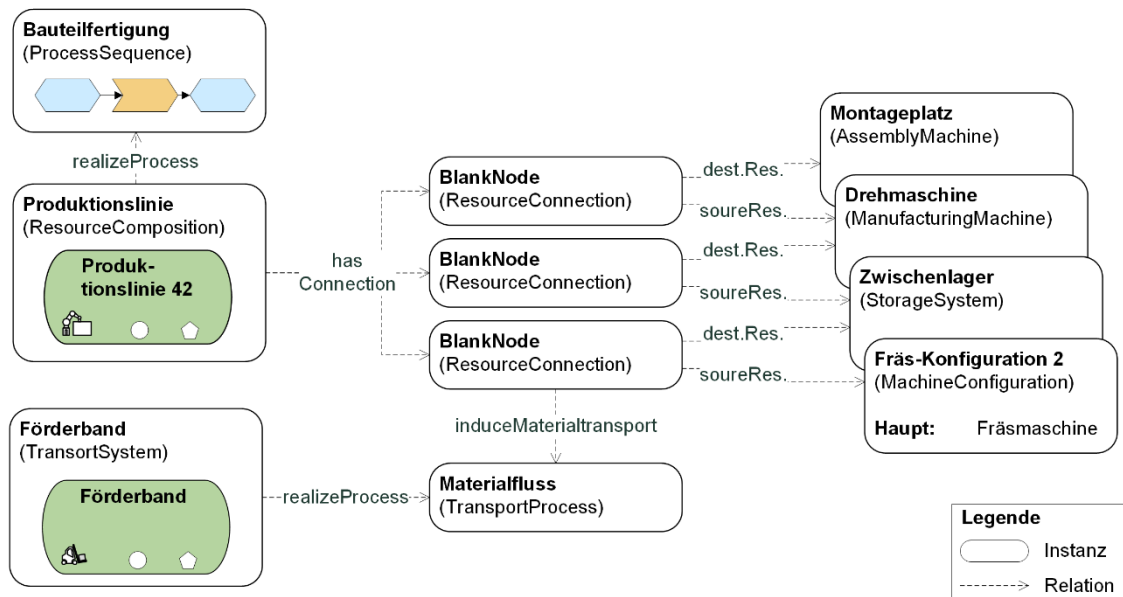


Bild 4-18: Modellierung einer Maschinenkomposition und Einbindung von Transportressourcen (vereinfacht)

4.3 Problemlösungskomponente zur Modellierungsunterstützung

Während der Konzipierung eines neuen Produktionssystems benötigt der Anwender situationsgerechten Zugriff auf das vorhandene Fachwissen. Dies umfasst sowohl die Modellierung einzelner Materialelemente und Prozesse, als auch die Suche nach passenden Lösungen im Zuge der Synthese von Ressourcen. Mögliche Fragestellungen, mit denen sich der Anwender konfrontiert sieht, sind z. B.

- Welche Materialelemente liegen in der Wissensbasis vor und anhand welcher Merkmale werden sie beschrieben?
- Welche Produktionsprozesse und Prozessparameter sind zur Herstellung des spezifizierten Materialelements notwendig?
- Mit welchen Fertigungs- und Montagesystemen lassen sich die Prozesse umsetzen?

Die Problemlösungskomponente unterstützt den Anwender beim Aufbau der notwendigen Suchanfragen an die Wissensbasis, der Aufbereitung der Informationen und die Überführung in die graphische Modellierung mit CONSENS. Eine automatische Planung, Entwicklung bzw. Konfiguration des gesamten Produktionssystems soll hingegen nicht erreicht werden. In Kapitel 4.3.1 werden zunächst Suchanfragen zur Modellierungsunterstützung auf Prozessebene vorgestellt. Im anschließenden Kapitel 4.3.2 steht die Synthese passender Ressourcen und die Konzipierung des Layouts im Fokus. Kapitel 4.3.3 beschreibt einen Ansatz zur Prüfung des Systementwurfs und zur Ermittlung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen.

4.3.1 Wissensbasierte Modellierung auf Prozessebene

Die Unterstützung während der Modellierung auf Prozessebene umfasst vier Suchanfragen, die sich aus der (unvollständig) spezifizierten Prozessfolge ergeben. Voraussetzung für den Aufbau der SPARQL-Anfrage ist die Annotation der vorgestellten Konzepte der ProSyCo-Ontologie an den einzelnen CONSENS-Elementen. Bild 4-19 zeigt die vier Suchanfragen anhand einer beispielhaften Prozessfolge. Die zu ermittelnden Informationen innerhalb der Prozessfolge sind mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.

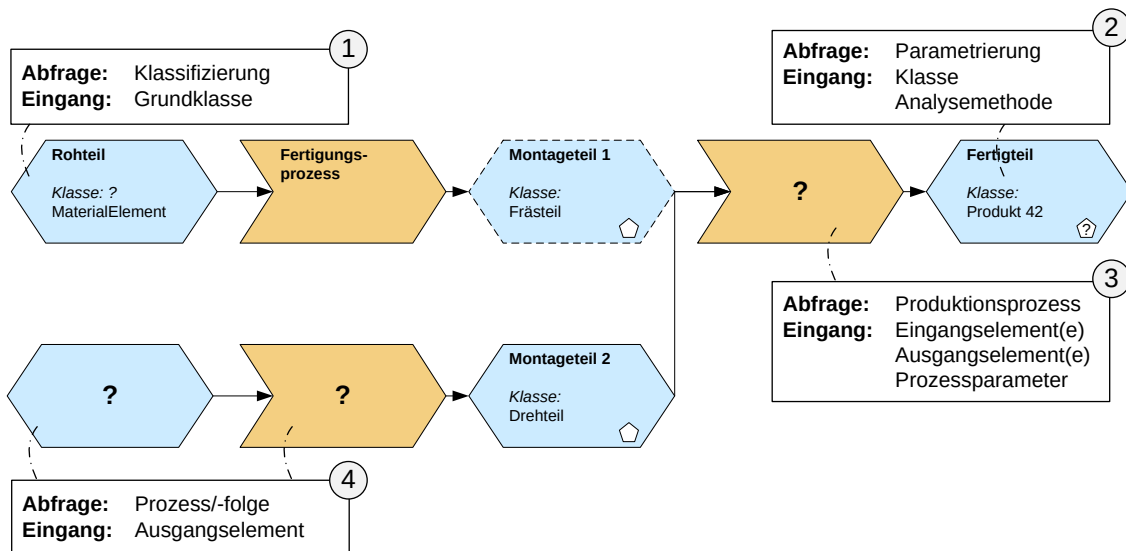


Bild 4-19: Suchanfragen für die Konzipierung auf Prozessebene

Nachfolgend werden die vier Abfragen kurz¹ beschrieben. Die Verarbeitung und Aufbereitung der Ergebnisse für den Anwender erfolgt durch das Planungswerkzeug.

1) Klassifizierung von Materialelementen und Prozessen

Gemäß der in Kapitel 4.1.1 präsentierten Modellierungsregeln, muss jedes Element einer Klasse zugeordnet werden. Initial ist dies eine der Grundklassen, die im Laufe der Konzipierung soweit wie möglich konkretisiert werden. Die erste Suchanfrage liefert dem Anwender die möglichen Unterklassen für eine gegebene Grundklasse. Bild 4-20 zeigt den Aufbau der Abfrage für die Unterklasse von *MaterialElement*. Die Variable *?sub_class* liefert die URI der Klasse, *?name* den Namen und *?comment* einen ergänzenden Kommentar. Name und Kommentar werden optional angefragt, d.h. wenn entsprechende Angaben für eine Unterklasse fehlen, wird nur die URI zurückgegeben.

¹ Der SPARQL-Code für die Abfrage der Parameter (Nr. 2) ist in Anhang A3.2 beispielhaft gezeigt. Die Abfragen 3 und 4 werden dynamisch erstellt und an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt.

```
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX psc: <https://www.hni.uni-paderborn.de/pe/ProSyCo/ontology#>

SELECT ?sub_class ?name ?comment
WHERE {
    ?sub_class rdfs:subClassOf+ psc:MaterialElement .
    OPTIONAL { ?sub_class rdfs:label ?name }
    OPTIONAL { ?sub_class rdfs:comment ?comment }
}
```

Bild 4-20: SPARQL-Abfrage zur Klassifikation von Elementen

Analog zur Abfrage der Unterklassen, werden vorhandene Instanzen einer Klasse abgerufen. Instanzen liefern dem Anwender spezifischere Beschreibungen für Materialelemente oder Prozesse, beispielsweise standardisierte Bauteile für die Montage oder vor-konfigurierte Fertigungsprozesse. Die vorhandenen Daten können direkt für die Modellierung verwendet werden und reduzieren so den Modellierungsaufwand.

2) Parametrierung von Materialelementen und Prozessen

Ausgehend von der festgelegten Klasse oder Instanz, werden die Materialelement- bzw. Prozessparameter ermittelt. Unabhängig von der Parameterart werden der Name des Parameters, die URI des Merkmals und ggf. ein ergänzender Kommentar abgerufen. Für quantitative Parameter werden die einzelnen Zahlenwert-Einheiten-Kombinationen abgefragt, bei qualitativen Parametern die gewählte Merkmalsausprägung sowie die möglichen Ausprägungen der Skala.

3) Abfragen von (Teil-)Prozessfolgen zur Herstellung eines Materialelements

Die dritte Abfrage dient der Ermittlung eines Produktionsprozesses zur Herstellung eines Materialelements. Als Eingangsinformationen liegen die Klasse des Materialelements sowie dessen Parameter vor. Es werden Prozesse gesucht, deren Ausgangselement die gleiche Klasse besitzt und die gleichen Parameterausprägungen aufweist. Zusätzlich werden die Eingangselemente der möglichen Prozesse bestimmt. Handelt es sich beim ausgewählten Prozess um eine Prozessfolge, sind über eine zweite Anfrage die einzelnen Prozessschritte sowie deren Reihenfolge zu ermitteln. Je Materialelement und Prozess erfolgt abschließend die Parametrierung (siehe 2).

4) Abfragen von möglichen Produktionsprozessen

Diese Abfrage adressiert die Suche nach möglichen Produktionsprozessen für eine gegebene Kombination von Eingangs- und Ausgangsmaterialelementen sowie definierten Prozessparametern. Weiterhin wird die standardmäßige Grundklasse des Prozesses berücksichtigt. Die Suche unterliegt somit stärkeren Einschränkungen als in der vorabgestellten Abfrage.

4.3.2 Synthese von Ressourcen

Der Syntheseprozess auf Ressourcenebene teilt sich auf in die Suche nach Fertigungs- und Montagesystemen die einen spezifizierten Prozess umsetzen, und die Suche nach Lösungen für den innerbetrieblichen Materialtransport. Weitere Schritte sind die Abfrage von Layoutdaten und die Ermittlung notwendiger Nebenressourcen für ausgewählte Hauptressourcen. In Bild 4-21 sind die vier Synthese-Anfragen aufgeführt. Zusätzlich sind die vorab vorgestellten Anfragen zur Klassifizierung und Parametrierung auch für die Ressourcenmodellierung verwendbar.

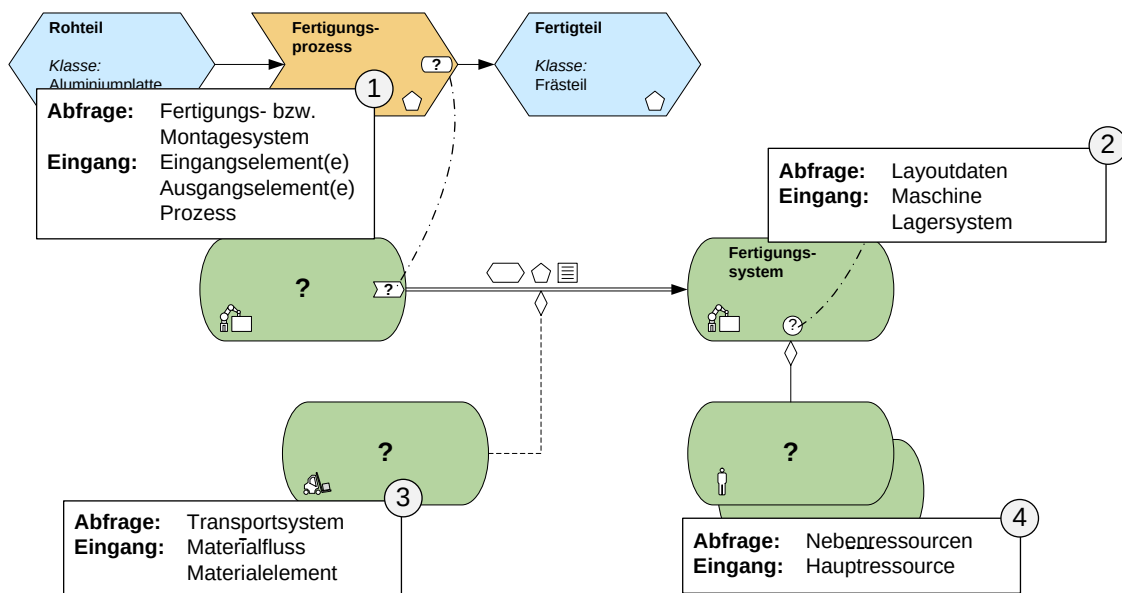


Bild 4-21: Suchanfragen für die Konzipierung des Produktionssystems auf Ressourcenebene

1) Suche geeigneter Fertigungs- und Montagesysteme

Eingangsinformationen für die Suche nach geeigneten Fertigungs- und Montagesystemen sind der spezifizierte Produktionsprozess sowie dessen Materialelemente. Anhand der festgelegten Klassen, Parameter, Merkmale und Gestaltangaben ergeben sich Einschränkungen für die Auswahl. Als Ergebnis ergibt sich je Prozess eine Liste aller Ressourcen, welche die gestellten Restriktionen erfüllen. Der Lösungsraum für geeignete Systeme lässt sich so mit zunehmendem Informationsgehalt nach und nach eingrenzen.

2) Abfrage relevanter Daten für die Layout-Modellierung

Für Ressourcen der Klasse *Machine* oder *StorageSystem* werden die Daten des idealisierten Layouts abgerufen. Notwendige Eingangsinformationen sind die jeweilige Klasse des Systems oder die URI einer ausgewählten Instanz.

3) Suche geeigneter Transportsysteme

Die Suche nach Transportsystemen ist prinzipiell ähnlich der Suche nach Fertigungs- und Montagesystemen. Die Eingangsinformationen sind der spezifizierte Materialfluss, d.h. der notwendige Transportprozess, und das zu transportierende Materialelement.

4) Ermittlung der Nebenressourcen

Die vierte Suchanfrage dient der Ergänzung einer gegebenen Hauptressource, um notwendige Werkzeuge, Hilfsmittel und Werker. Hierzu werden die Nebenressourcen einer Maschinenkonfiguration abgerufen und parametrisiert.

4.3.3 Prüfen des Systementwurfs / Ermitteln von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen

Wie bereits mehrfach erwähnt, stehen die unterschiedlichen Aspekte eines Produktionssystems zueinander in Verbindung. Diese Verbindungen werden durch die Verweise zwischen Anforderungen, Prozessen, Ressourcen und Gestalt/Layout abgebildet. Die Verweise zwischen Anforderungen und den weiteren Aspekten definieren die generellen Restriktionen, die das Produktionssystemkonzept erfüllen muss. Überschreiten beispielsweise Prozess- oder Ressourcenparameter die in den Anforderungen festgelegten Grenzen für ein Merkmal, sind die Restriktionen folglich nicht erfüllt und müssen korrigiert werden. Fehlende Verweise zwischen Prozessen und Ressourcen bzw. zwischen Ressourcen und dem Layout führen zu einer unvollständigen Prinzipiellösung. Die notwendigen Regeln für die Modellierung des Produktionssystemkonzepts wurden in Kapitel 4.1 vorgestellt.

Prüfen des Systementwurfs

Durch den Einsatz semantischer Technologien, lässt sich der Systementwurf hinsichtlich Vollständigkeit und Konsistenz überprüfen. Die hierzu verwendete Vorgehensweise entspricht dem von FELDMANN ET AL. präsentierten Ansatz¹. Im ersten Schritt erfolgt die semantische Abbildung der graphischen CONSENS-Modelle. Auf Basis des Grundvokabulars der ProSyCo-Ontologie werden Instanzen für die einzelnen Elemente, deren Parameter und bestehende Beziehungen erzeugt. Es entsteht eine temporäre Wissensbasis mit dem projektspezifischen Fachwissen über das Produktionssystem. Die graphische Modellierung des Produktionssystems wird für die Dauer der Überprüfung in ein maschinenverständliches Abbild überführt. Im zweiten Schritt werden Anfragen an die Wissensbasis gestellt und Unzulänglichkeiten im Systementwurf ermittelt. Bild 4-22 zeigt die SPARQL-Anfrage zur Identifikation aller Prozesse, denen noch keine Ressource zugewiesen wurde. Ergebnis ist eine Liste aller Prozess-Instanzen für die die entsprechende Relation *psc:isRealizedBy* nicht vorhanden ist.

¹ vgl. [FKV14]

```
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX psc: <https://www.hni.uni-paderborn.de/pe/ProSyCo/ontology#>

SELECT ?process
WHERE {
    ?process rdfs:type psc:Process .
    FILTER NOT EXISTS {?process psc:isRealizedBy ?resource.}
}
```

Bild 4-22: Anfrage zur Prüfung fehlender Prozess-Ressourcen-Zuordnungen

Neben solchen generellen Fragenstellungen zur Systemüberprüfung, können spezifische Anfragen für die unterschiedlichen Planungsaufgaben eingesetzt werden. In Bild 4-23 ist der SPARQL-Code zur Prüfung fehlender Werkzeugangaben für Ressourcen abgebildet. Die Anfrage bezieht sich auf alle Ressourcen, für die als Klassenrestriktion festgelegt wurde, dass mindestens zu einer Instanz der Klasse *psc:Tool* die Relation *psc:hasTool*¹ bestehen muss. Anhand der Ergebnisliste wird der Planer auf die fehlenden Informationen im Produktionssystemkonzept hingewiesen. Nach ähnlichem Muster sind die Anfragen für fehlende Werker und Hilfsmittel aufgebaut.

```
## Namensräume
SELECT ?resource
WHERE {
    ?resource rdfs:type ?resource_class.

    ?resource_class rdfs:subClassOf
    [
        rdfs:type owl:Restriction ;
        owl:onProperty psc:hasTool ;
        owl:onClass psc:Tool ;
        owl:minQualifiedCardinality "1"^^xsd:nonNegativeInteger
    ] .

    FILTER NOT EXISTS {?resource psc:hasTool ?tool.}
}
```

Bild 4-23: Anfrage zur Prüfung fehlender Werkzeugangaben

Die vorgestellten Überprüfungen beziehen sich auf die bestehenden bzw. fehlenden Relationen zwischen den einzelnen Elementen eines Produktionssystems. Daraus ergeben sich grundlegende Folgen für die weitere Konzipierung. Bei der Auswahl fehlender Haupt- und Nebenressourcen muss auf die Anforderungen seitens bestehender Prozesse

¹ Die *hasTool*-Relation ist eine Detaillierung (Subproperty) der *hasPart*-Relation.

und des Produktkonzepts geachtet werden. Dies wird durch den beschriebenen Aufbau der SPARQL-Anfragen zur Synthese von Ressourcen unterstützt. Finden sich keine geeigneten Lösungen sind Änderungen am Produktkonzept zu prüfen oder neue Fertigungs- bzw. Montagesysteme zu entwickeln.

Ermittlung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen

Aus der Kombination der unterschiedlichen Elemente und deren Parameter ergeben sich Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, die der Planer während der Konzipierung berücksichtigen muss. In diesem Abschnitt wird ein Ansatz präsentiert, wie Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in einem erstellten Produktionssystemkonzept ermittelt werden können. Dies dient dem Planer als Unterstützung, die Zusammenhänge zu erkennen und potentielle Auswirkungen von Parameteränderungen abzuschätzen. Die beiden Begriffe Abhängigkeiten und Wechselwirkungen werden im Rahmen der hier betrachteten Produktionssystemkonzipierung wie folgt definiert:

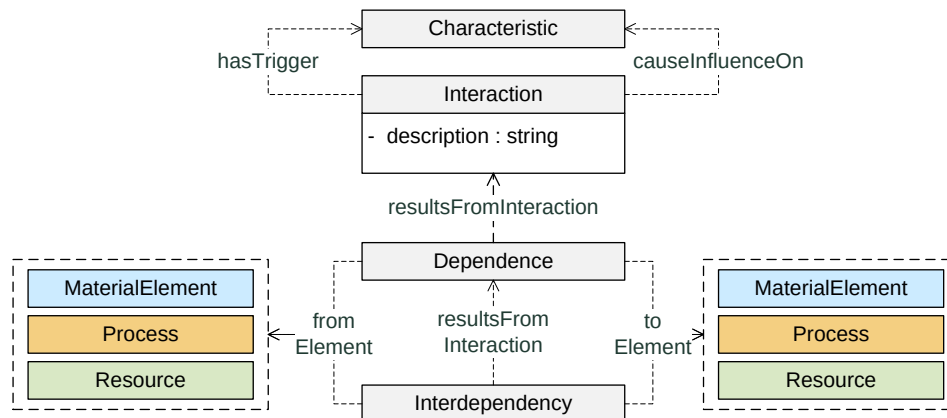
Abhängigkeit: Zwischen zwei Elementen besteht eine Abhängigkeit, wenn die Änderung an einem Parameter von *Element 1* eine Auswirkung / Beeinflussung auf einen Parameter von *Element 2* zur Folge hat. Es lässt sich zwischen generellen Abhängigkeiten und konkreten Abhängigkeiten unterscheiden. Generelle Abhängigkeiten sagen aus, dass sich die Parameter der Elemente beeinflussen. Konkrete Abhängigkeiten definieren, wie sich die Änderung des Parameterwerts von *Element 1* auf den Parameterwert von *Element 2* auswirkt. Abhängigkeiten können sowohl innerhalb eines Aspektes, zwischen Aspekten und zwischen Produkt- und Produktionssystemkonzept bestehen.

Wechselwirkung: Als Wechselwirkung definiert der DUDEN einen *Zusammenhang durch wechselseitige Beeinflussung [Dud14b-ol]*. Wechselwirkungen bestehen demnach aus entgegen gerichteten Abhängigkeiten. Eine Parameteränderung an *Element 1* hat Auswirkungen auf einen Parameter von *Element 2*. Eine Parameteränderung an *Element 2* beeinflusst wiederum einen Parameter an *Element 1*. Wie Abhängigkeiten, können Wechselwirkungen folglich innerhalb eines Aspektes, zwischen Aspekten und zwischen Produkt- und Produktionssystemkonzept bestehen.

Die Ermittlung erfolgt ebenfalls auf Grundlage der temporären Wissensbasis. Die generellen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen innerhalb des Produktionssystemkonzepts werden mit Hilfe der spezifizierten Merkmale hergeleitet. Unabhängig von den konkreten Parameterausprägungen der einzelnen Elemente, werden die Zusammenhänge zwischen Merkmalen modelliert und als Fachwissen in der Wissensbasis abgelegt. Ein Zusammenhang zwischen Merkmalen wird über eine unidirektionale Verbindung hergestellt, die als Instanz der Klasse *Interaction* abgebildet wird (siehe Bild 4-24 a). Das auslösende Merkmal wird über die *hasTrigger*-Relation annotiert. Entsprechend wird das Merkmal das durch die Änderung beeinflusst wird, über die *causeInfluenceOn*-Relation erfasst. Die Auswirkungen werden textuell über *rdfs:comment* beschrieben und dem Anwender angezeigt. Abhängigkeiten werden über die Klasse *Dependence* modelliert und verbinden die

abhängigen Elemente über die *fromElement*- und *toElement*-Relationen. Über die *resultsFromInteraction*-Relation wird annotiert, aufgrund welches Merkmalszusammenhangs sich die Abhängigkeit ergibt. Die Modellierung von Wechselwirkungen erfolgt nach dem gleichen Schema, mit dem Unterschied, dass mit der *resultsFromDependence*-Relation die vorliegenden Abhängigkeiten annotiert werden. In Bild 4-24 b) ist der Zusammenhang zwischen den Merkmalen *Vorschubgeschwindigkeit* und *Mittenrauwert* modelliert.

a) Klassendiagramm



b) Modellierung von Beeinflussungen

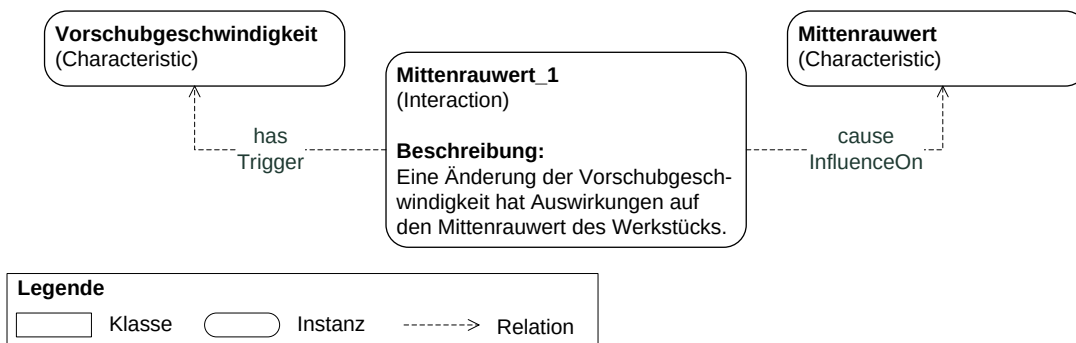


Bild 4-24: a) Zusammenhänge zwischen Merkmal, Beeinflussung, Abhängigkeit und Wechselwirkung b) Modellierung der Beeinflussung der Merkmale Vorschubgeschwindigkeit und Mittenrauwert

Das Vorgehen zur Ermittlung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen besteht aus vier Schritten (siehe Bild 4-25). Im ersten Schritt erfolgt die semantische Beschreibung des Produktionssystemkonzepts. In der Wissensbasis befinden sich nun die Instanzen der einzelnen Elemente. Zusätzlich wird die Merkmal-Ontologie mit den modellierten Zusammenhängen verwendet. Basierend auf dem projektspezifischen und den allgemeingültigen Fachwissen werden im zweiten Schritt zunächst die Abhängigkeiten hergeleitet und als Instanzen sowie Relationen in der Wissensbasis erzeugt. Es wird geprüft, ob zwei Elemente über Merkmale beschrieben werden, die sich gegenseitig beeinflussen. Ist dies der Fall, besteht zwischen den Elementen eine Abhängigkeit. Im dritten Schritt werden

die Wechselwirkungen anhand der vorliegenden Abhängigkeiten zwischen den Elementen bestimmt. Hierzu wird geprüft, ob zwischen zwei Merkmalen entgegengerichtet Abhängigkeiten bestehen. Für die Schritte 2 und 3 werden jeweils SPARQL-Update-Anfragen¹ erzeugt und an die Wissensbasis gestellt. Die neu erzeugten Informationen in der Wissensbasis werden im vierten Schritt abgerufen und das Ergebnis im Planungswerkzeug aufbereitet.

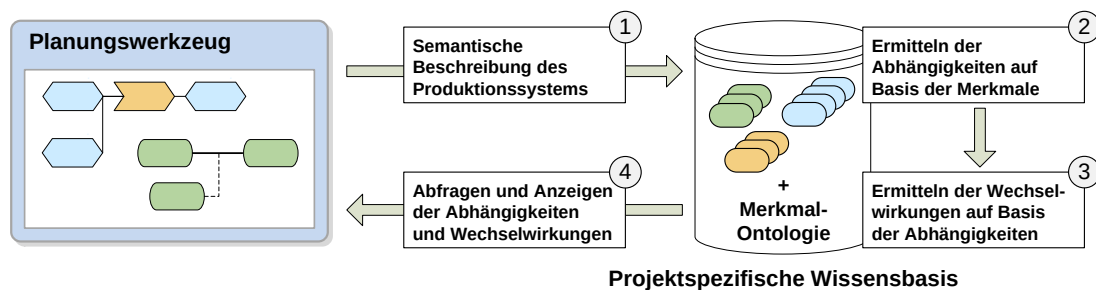


Bild 4-25: Vorgehen zur Ermittlung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen

Neben den Beziehungen zwischen den Merkmalen sind die Zuordnungs- und Reihenfolgebeziehungen der unterschiedlichen Elemente von Bedeutung. So hat beispielsweise ein Prozessparameter einen Einfluss auf die nachfolgenden Materialelemente, jedoch nicht auf die Eingangsmaterialelemente. Ebenso beeinflusst eine Ressource nicht zwangsläufig alle Prozesse, nur weil sich über die Merkmale eine Abhängigkeit ermitteln lässt. Diese Restriktionen sind in den SPARQL-Anfragen entsprechend zu berücksichtigen.

4.4 Prototypische Implementierung

Im Rahmen der Arbeit wurde das Planungswerkzeug prototypisch implementiert. Damit wird die prinzipielle Umsetzbarkeit der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung nachgewiesen. Die Implementierung dient der Überprüfung der vorgestellten Konzepte zur Abbildung von Fachwissen sowie dem Zugriff während der einzelnen Planungsschritte. Nachfolgend wird die Grundstruktur des Planungswerkzeugs vorgestellt und die Umsetzung der Benutzungsschnittstelle zur graphischen Modellierung, der Problemlösungskomponente und der Wissensbasis präsentiert. Auf ausführliche Erläuterung der einzelnen Klassen und Funktionen im Quellcode wird dabei verzichtet. Gemäß dem Aufbau eines wissensbasierten Systems (Kapitel 2.7.1) besteht das Planungswerkzeug aus einem Steuerungssystem und einer separaten Wissensbasis.

Das Steuerungssystem wurde auf Basis von Microsoft Visio realisiert. Visio ist als Visualisierungsprogramm von Haus aus auf die Erstellung graphischer Darstellungen und Di-

¹ SPARQL-Update-Anfragen ermöglichen das Hinzufügen, Löschen oder Modifizieren von RDF-Daten in einer Wissensbasis.

agramme spezialisiert. Die Modellierung erfolgt nach dem *Drag and Drop* Prinzip anhand von vordefinierten graphischen Elementen. Diese Vorlagen (eng. Shapes) werden über Schablonen bereitgestellt. Neben den Standard-Schablonen können eigene Schablonen erstellt, eingebunden und zur Modellierung verwendet werden. Die Shapes dienen nicht nur der reinen Visualisierung sondern bieten die Möglichkeit, Daten und Informationen zu annotieren. Als gebräuchliches COTS¹-Modellierungswerkzeug liefert Microsoft Visio eine Reihe von Funktionalitäten, die für die graphische Modellierung des Produktionssystems erforderlich sind. Zusätzlich bietet Visio Schablonen für die 2D-Layoutplanung.

Als erweiterter Teil der Microsoft Office Suite ist Visio zudem bei vielen Unternehmen im Einsatz. Das Microsoft Office Paket ist de facto eine Standardsoftware, welche für unterschiedliche Aufgabenstellung zum Einsatz kommt [NHK+09, S. 136]. Die Einstiegshürde für den Anwender ist entsprechend niedrig. Im Gegensatz zu einer individuellen Softwareentwicklung für die Produktionssystemkonzipierung steigert dies die Akzeptanz. Über ein Add-In² wurden notwendige Erweiterungen des Funktionsumfangs realisiert:

- Definition von Arbeitsblättern für die Partialmodelle
- Anlegen/Erstellen, Bearbeiten und Verknüpfen von Shapes
- Anbindung der Wissensbasis
- Problemlösungskomponente zum Erzeugung von Anfragen
- Export der Planungsinformationen

Visio Add-In *ProductionSystemModeler (PSM)*

Die Funktionalität des Visio-Add-In teilt sich auf, in die Unterstützung der graphischen Modellierung des Produktionssystemkonzepts und den Zugriff auf Fach- und Lösungswissen. Grundlage für die graphische Modellierung sind vordefinierte Shapes für die einzelnen Aspekte. Sie werden beim Anlegen eines neuen PSM-Projekts geladen. Gleichzeitig werden vier vordefinierte Arbeitsblätter für die einzelnen Aspekte des Produktionssystems erstellt, Anforderungen, Prozesse, Ressourcen und Layout. Sie dienen dazu, die Sichten auf das System zu trennen. Das Add-In überwacht die Modellierung hinsichtlich

¹ COTS (Commercial of the Shelf) = Standardprodukt oder Standardsoftware ohne kunden- oder anwendungsspezifische Anpassungen

² Mit Microsoft Visual Studio können individuelle Erweiterungen für Microsoft Visio erstellt werden. Diese werden als Add-In bezeichnet und sind über die Visio-Optionen aktivierbar. Das Microsoft Visio 2013 Software Development Kit (SDK) beinhaltet die notwendigen Bibliotheken und Werkzeuge für die Erweiterung. Die Umsetzung des Add-Ins erfolgt mit der Programmiersprache C#.

der korrekten Verwendung der Shapes auf den Arbeitsblättern. So ist es z. B. nicht möglich, Prozesse und Ressourcen auf einem Arbeitsblatt abzulegen oder zu verknüpfen. Bild 4-26 zeigt die Benutzungsoberfläche des ProductionSystemModeler mit den unterschiedlichen Bereichen.

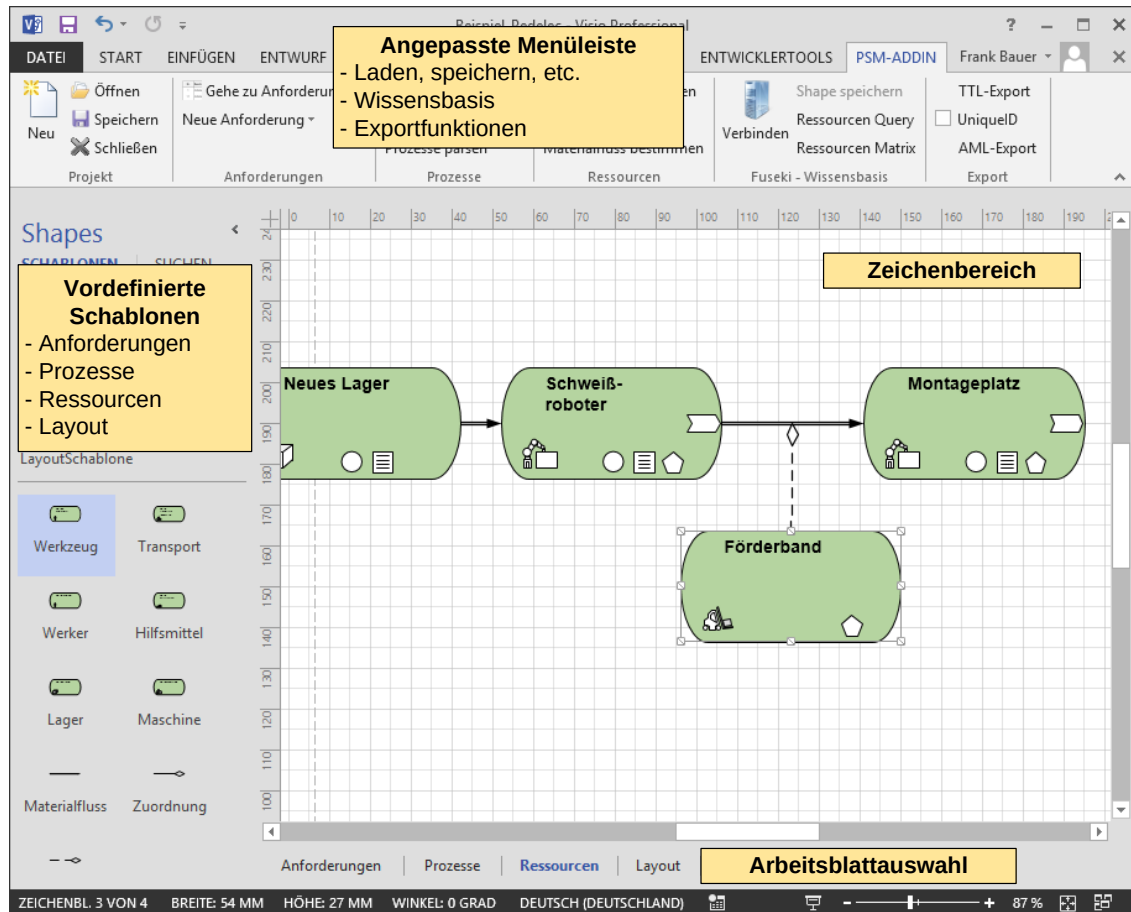


Bild 4-26: Benutzungsoberfläche des ProductionSystemModeler (Screenshot)

Die vier Schablonen beinhalten die spezifischen Shapes zur Modellierung der Elemente und Beziehungen des jeweiligen Aspekts (vgl. Kapitel 4.1). Neben den Shapes für die vorgestellten Grundklassen von Materialelementen, Prozessen und Ressourcen sind Shapes für die Modellierung von Anforderungen und des Ideallayouts vorhanden. Jedes Shape verfügt über ein sogenanntes ShapeSheet, über das sich das individuelle Verhalten festlegen lässt. Weiterhin dient das ShapeSheet zum Speichern zusätzlicher Daten, die dem Shape zugewiesen werden. Das Verhalten und der Datenzugriff werden über die programmierten Add-In-Funktionen definiert. Beispielsweise wurden mittels der Visio-SDK unterstützende Funktionen umgesetzt, die ein automatisches Anlegen von Prozessnachfolgern oder das Zuweisen von Nebenressourcen ermöglichen.

Für die Dateneingabe, d.h. das Festlegen von Parametern oder das Setzen von Verweisen zwischen Elementen, werden shape-spezifische Eingabemasken erzeugt und die Daten anschließend in das ShapeSheet geschrieben. Mit CONSENS werden Verweise und Parameter über die Piktogramme visualisiert. Piktogramme sind als eigenständige Shapes

innerhalb des jeweiligen Haupt-Shapes abgebildet und verfügen über ein separates ShapeSheet. Für die leichtere Datenverwaltung werden die Planungsinformationen auf die einzelnen ShapeSheets verteilt. In Bild 4-27 ist die Speicherung der Informationen am Beispiel eines Ressourcen-Shapes dargestellt. Im Haupt-Shape werden die generellen Angaben gespeichert. Dazu zählt die URI der Klasse, im gezeigten Beispiel wäre dies *psc:ManufacturingSystem*. Die Verweise zwischen den einzelnen Aspekten werden über die Identifikationsnummern (ID) der verknüpften Shapes erfasst und in den Piktogrammen abgelegt¹. Je Parameter wird ein Datensatz erstellt, der die einzelnen Angaben beinhaltet. Für Merkmale und Einheiten werden ebenfalls die URI gespeichert.

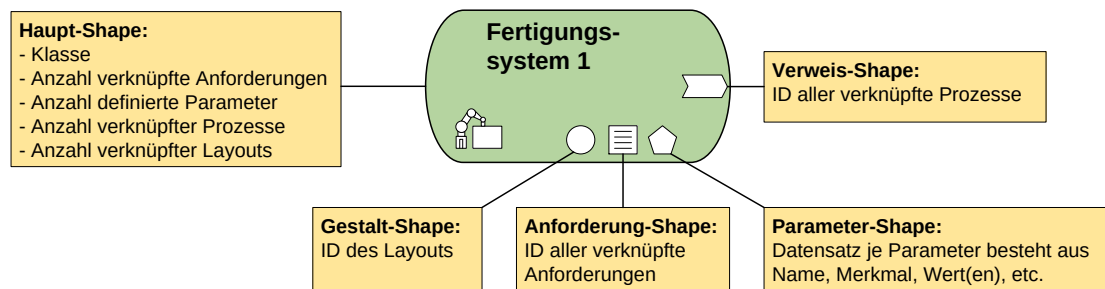


Bild 4-27: Erfassung der Planungsinformationen am Beispiel eines Ressourcen-Shapes

Die Umsetzung der vorgestellten Problemlösungskomponente wurde unter Verwendung des dotNetRDF-Frameworks² realisiert. Hierbei handelt es sich um eine frei verfügbare Bibliothek zur Verarbeitung von RDF-Daten. Neben dem Schreiben und Lesen von RDF-Dateien, unterstützt das Framework die Anbindung externer Triple Stores. Damit lässt sich das Visio-Add-In problemlos mit unterschiedlichen Wissensbasen verbinden. Für den Zugriff auf eine Wissensbasis, d.h. das Stellen von SPARQL-Anfragen, bietet das dotNetRDF-Framework die erforderlichen Schnittstellen. In Kapitel 4.3 wurden die notwendigen Anfragen für die Modellierung, Synthese und Prüfung erläutert. Das Add-In erzeugt diese Anfrage dynamisch in Abhängigkeit der modellierten Planungsinformationen. Anhand der Beziehungen zwischen den Elementen, den definierten Parametern und den Klasseninformationen über die Elemente, Merkmale und Einheiten, werden die SPARQL-Anfragen erstellt und die Ergebnisse aufbereitet. So kommt der Planer nicht mit dem SPARQL-Code in Berührung.

Zur Übernahme der Planungsinformationen wurde ein Export in das Datenaustauschformat AutomationML integriert. AutomationML wird von einem Konsortium aus Industrie- und Forschungspartnern mit dem Ziel entwickelt, einen XML-basierten Standard für

¹ Jedes Shape erhält beim Anlegen eine eindeutige Identifikationsnummer, über die es im Quellcode angesprochen werden kann. Für die Zuordnung einer Ressource zu einem Prozess, wird die ID des Ressourcen-Shapes im Prozess-Shape hinterlegt und umgekehrt.

² <http://www.dotnetrdf.org/>

den Austausch von Planungsdaten in einer heterogenen Softwarelandschaft zu schaffen¹. Es soll eine Durchgängigkeit der Daten über den kompletten Lebenszyklus einer Anlage erreicht werden, von der Grobplanung einer Anlage bis zur Inbetriebnahme. Vor diesem Hintergrund bietet AutomationML einen interessanten Ansatz für die hier betrachtete Produktionssystemkonzipierung.

Umsetzung der Wissensbasis

Zum Test der Wissensbasis wurde auf einen Fuseki-Server² und den Pellet-Reasoner³ zurückgegriffen. Fuseki bietet einen Triple Store, auf den mittels einer HTTP-Schnittstelle zugegriffen werden kann. Er unterstützt *SPARQL Query* sowie *SPARQL Update* und lässt sich ohne viel Aufwand als lokaler Server oder Webserver einrichten. Über eine Konfigurationsdatei werden die Server-Funktionalitäten festgelegt. Dazu zählen z. B. der verwendete Reasoner, das Laden von Ontologien beim Serverstart oder die Form der Datenspeicherung. Der Zugriff erfolgt über eine vordefinierte Benutzungsschnittstelle via Browser oder aus einer beliebigen Anwendung heraus. Fuseki unterstützt standardmäßig eine Reihe von Reasonern für RDF und OWL. Diese sind jedoch nicht für die Verarbeitung der verwendeten SWRL-Regeln geeignet. Über die Konfigurationsdatei lassen sich externe Reasoner einbinden. Im Rahmen der Arbeit wurde der Pellet-Reasoner eingesetzt.

Einsatz des Planungswerkzeugs im Unternehmen

Die vorgestellte Umsetzung des Planungswerkzeugs mit dem ProductionSystemModeler und der separaten Wissensbasis, ermöglicht einen pragmatischen Einsatz der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung in einem Unternehmen. Erweiterungen und Anpassungen am Visio-Add-In können zentral von der IT-Abteilung umgesetzt und einfach als Update auf den Arbeitsrechner der Produktionssystemplaner installiert werden. Aus Sicht des Anwenders erfolgt die graphische Modellierung in einem etablierten Softwarewerkzeug, das regelmäßig aktualisiert wird.

Zur Bereitstellung des notwendigen Fachwissens lassen sich projekt-, abteilungs- oder unternehmensspezifische Wissensbases erstellen. Einzelne Elemente oder vollständige Produktionssystemkonzepte werden manuell (durch den Knowledge Engineer) oder durch eine automatische Datenübernahme in die Wissensbasis aufgenommen (Bild 4-28). Die Daten müssen nur an einer zentralen Stelle gepflegt werden und stehen automatisch allen Planern zur Verfügung.

¹ Für detaillierte Informationen zu AutomationML sei an dieser Stelle auf [Dra10] verwiesen.

² http://jena.apache.org/documentation/serving_data/#development-system

³ <http://clarkparsia.com/pellet>

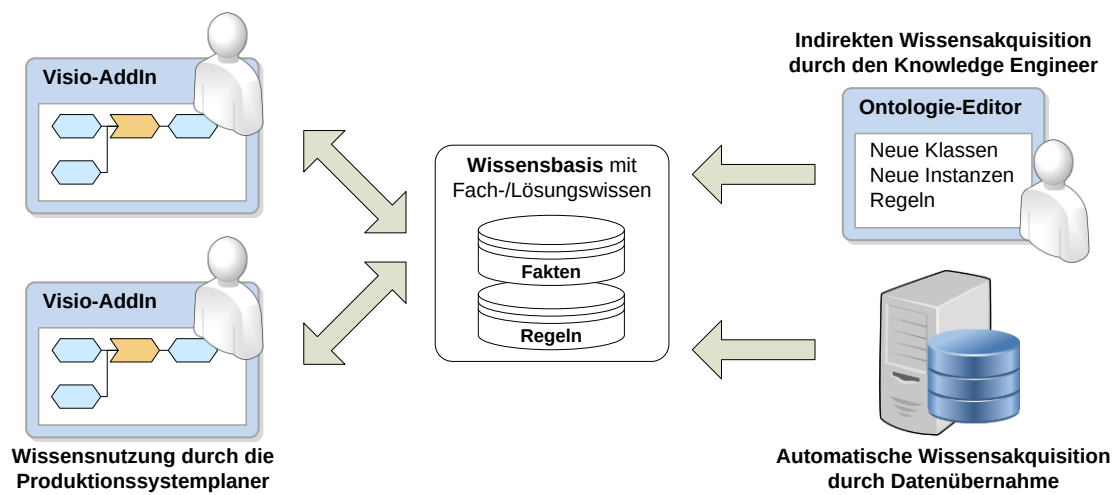


Bild 4-28: Struktur zum Einsatz des Planungswerkzeugs im Unternehmen

5 Anwendung des Planungswerkzeugs zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung

In diesem Kapitel wird die Anwendung des entwickelten Planungswerkzeugs aus Sicht des Produktionssystemplaners vorgestellt. Die wissensbasierte Konzipierung wird anhand eines Praxisbeispiels aus der industriellen Bäckereitechnik erläutert. Die betrachtete Produktionsanlage dient der Herstellung von Teig, der in nachgelagerten Produktionslinien zu Broten und Brötchen weiterverarbeitet wird. Aus Platzgründen werden nur Ausschnitte der CONSENS Partialmodelle und der Informationseinheiten der Wissensbasis gezeigt. Im Vordergrund steht die Verknüpfung zwischen der graphischen Modellierung, der semantischen Annotation relevanter Informationen und dem Zugriff auf Fach- und Lösungswissen. Dies setzt einen gewissen Informations- und Datenbestand über Materialelemente, Prozesse, Ressourcen sowie Merkmale und deren Zusammenhänge in der Wissensbasis voraus. Der geschilderte Ablauf zur Erarbeitung der Partialmodelle ist jedoch auch ohne den Einsatz einer Wissensbasis gültig. In Kapitel 5.1 wird das erarbeitete Vorgehensmodell in die bestehende Entwicklungsmethodik eingeordnet. In den nachfolgenden Unterkapiteln 5.2 bis 5.5 werden die Hauptphasen näher beschrieben. Abschließend erfolgt in Kapitel 5.6 eine Bewertung des entwickelten Planungswerkzeugs gegen die gestellten Anforderungen.

5.1 Einordnung in die bestehende Entwicklungsmethodik

Das Vorgehen besteht aus vier Hauptphasen, die sich in das generelle Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem (siehe Kapitel 2.3.1) eingliedern. Die Einordnung ist in Bild 5-1 dargestellt. Die Arbeiten von NORDSIEK und BRANDIS liefern für die Phasen *Planen und Klären der Aufgabe* und *Konzipieren auf Prozessebene* detaillierte Vorgehensmodelle¹. Die wesentlichen Schritte werden in der Phase *Konzipierung des Produktionsprozesses* zusammengefasst (Kapitel 5.2). Die Konzipierung auf Ressourcenebene wird in die zwei Hauptphasen *Modellierung der Grundstruktur* und *Detaillierung der Grundstruktur* aufgeteilt. Im ersten Schritt werden Fertigungs- und Montageressourcen betrachtet, die einen direkten Einfluss auf das Produktkonzept haben (Kapitel 5.3). Aus den getroffenen Entscheidungen für die Umsetzung der Produktionsprozesse ergibt sich im zweiten Schritt der innerbetriebliche Materialfluss. Mit den dafür notwendigen Lager- und Transportressourcen wird die Grundstruktur detailliert und das vollständige Produktionssystemkonzept erstellt (Kapitel 5.4). Die Hauptphase *Analyse des Produktionssystems* ist parallel zu den drei anderen Phasen angeordnet. Damit

¹ Die Vorgehensmodelle sind in Anhang A2.1 und Anhang A2.2 dargestellt. Die darin aufgeführten Phasen und Meilensteine fokussieren die integrative Entwicklung eines mechatronischen Produkts und des zugehörigen Produktionssystems. Auf eine ausführliche Wiedergabe der einzelnen Aufgaben und Methoden wird an dieser Stelle verzichtet und auf [Nor12] sowie [Bra14] verwiesen.

wird verdeutlicht, dass der Einsatz von Simulations- und Bewertungswerkzeugen kontinuierlich erfolgt. Bereits für eine erste Prozessfolge lassen sich Analysen durchführen und die Ergebnisse in das Produktionssystemkonzept zurückführen (Kapitel 5.5).

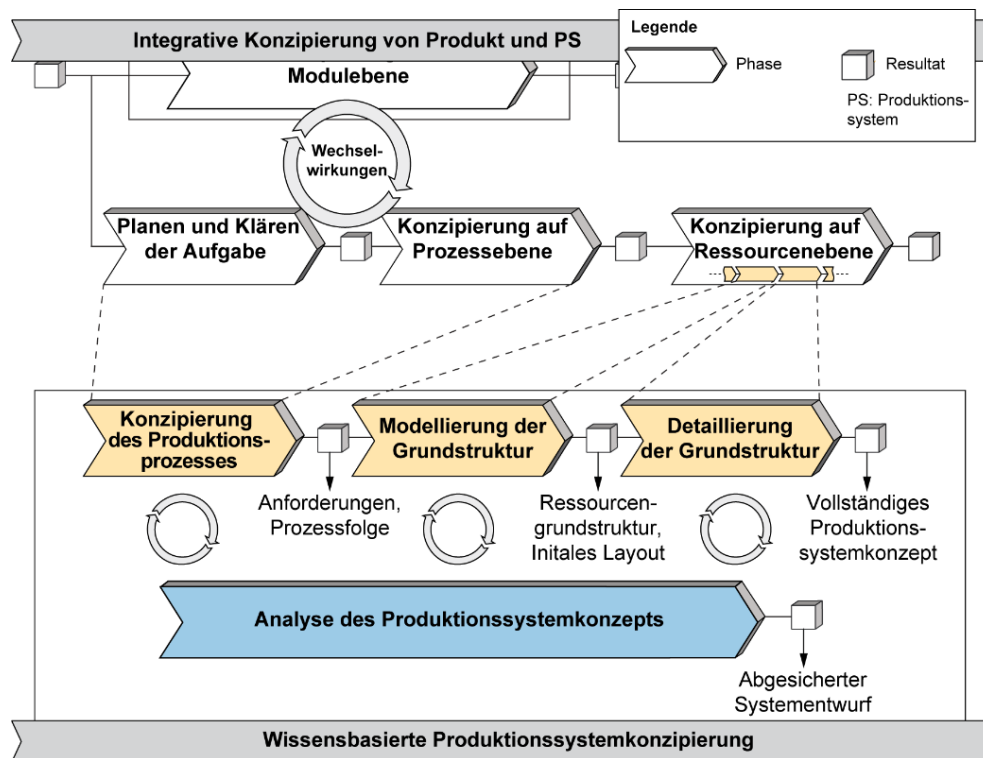


Bild 5-1: Einordnung der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung in das generelle Vorgehen zur integrativen Konzipierung

Jede Hauptphase wird nachfolgend über ein Phasen-Meilenstein-Diagramm detailliert, in dem die zu durchlaufenden Arbeitsschritte aufgeführt sind. Es dient dem Anwender als roter Faden für die Produktionssystemkonzipierung. Die Tätigkeiten der einzelnen Arbeitsschritte werden erläutert und Methoden zur Lösung zugewiesen. Der sequentielle Aufbau zeigt den idealtypischen Ablauf der Produktionssystemkonzipierung, wobei ausdrücklich auf Iterationen und Rücksprünge hingewiesen sei. Je nach Umfang des Produktionssystems, gewählter Analysemethode und benötigten Planungsinformationen für die weitere Ausarbeitung ist es zudem u.U. nicht erforderlich, jeden Planungsschritt zu durchlaufen und jedes Element im Detail zu spezifizieren. Daher lässt sich nicht strikt festlegen, wann die Produktionssystemkonzipierung im Einzelfall abgeschlossen ist. Die richtet sich immer nach den projekt- oder unternehmensspezifischen Vorgaben.

5.2 Konzipierung des Produktionsprozesses

Das Ziel dieses Planungsabschnittes sind die produktionsrelevanten Anforderungen und die Prozessfolge. Hierzu wird das vorliegende Produktkonzept analysiert und die relevanten Anforderungen für die Prozess- und Ressourcenmodellierung abgeleitet. Anschlie-

ßend wird die erste Prozessfolge festgelegt und die zu fertigenden Materialelemente ermittelt. Im letzten Schritt werden geeignete Fertigungs- und Montagethoden festgelegt und die einzelnen Elemente parametriert (Bild 5-2).

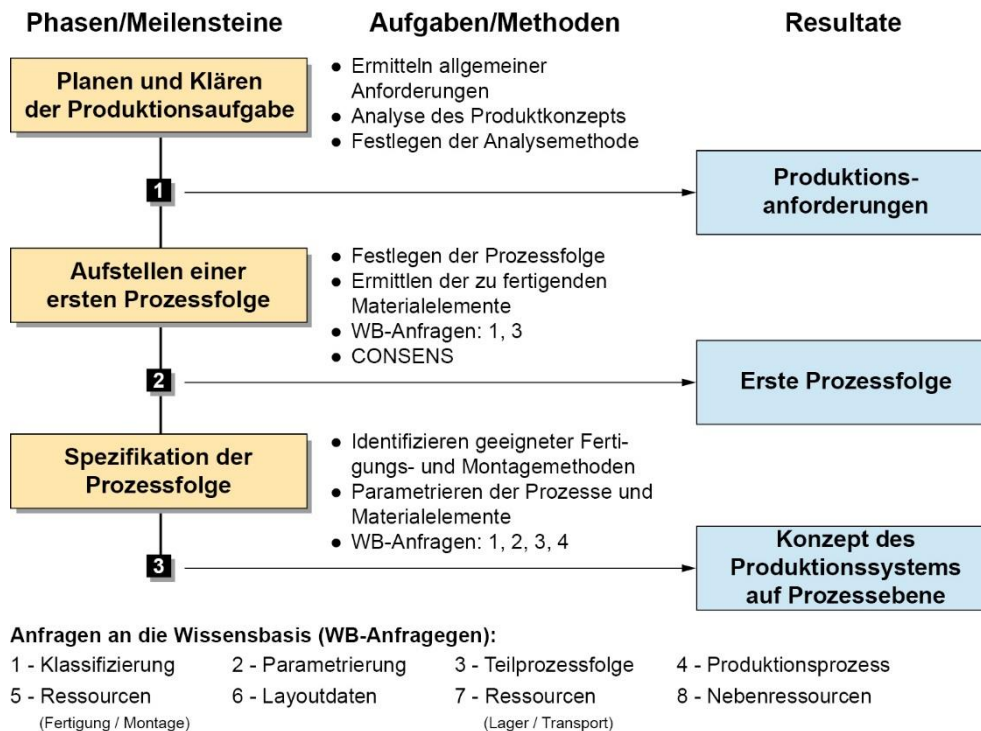


Bild 5-2: Vorgehen bei der Konzipierung des Produktionsprozesses

Planen und Klären der Produktionsaufgabe

In der ersten Phase gilt es ein einheitliches Verständnis zwischen den beteiligten Entwicklern und Planern für die vorliegende Produktionsaufgabe zu erlangen. Es wird geklärt, in welchem Detaillierungsgrad das Produktionssystemkonzept für die aktuelle Planungsphase modelliert werden muss. Welche Produktinformationen sind verfügbar? Gibt es Restriktionen für die Auswahl der Betriebsmittel? Sind räumliche Einschränkungen für die Gestalt des Layouts vorhanden? So ist es nicht erforderlich alle Aspekte des Systems zu modellieren, wenn nur erste Grobkonzepte erarbeitet werden sollen. Weiterhin werden die produktneutralen Anforderungen an das Produktionssystem festgelegt, beispielsweise der angestrebte Automatisierungsgrad, der gewünschte Verfügbarkeitsgrad der Bearbeitungssysteme oder der geplante Mitarbeitereinsatz. Die produktspezifischen Anforderungen ergeben sich aus der Anforderungsliste der Produktkonzipierung. Diese wird analysiert und auf fertigungs- bzw. montagerelevante Anforderungen reduziert¹. Anhand der Planungsebene und des Planungsinhalts wird eine geeignete Analysemethode zur Absicherung des Produktionssystemkonzepts ausgewählt. Durch die frühzeitige Festlegung wird sichergestellt, dass simulationsrelevante Planungsinformationen während

¹ vgl. [Nor12, S. 107f.] und [Bra14, S. 119f.]

der weiteren Phase berücksichtigt und spezifiziert werden. Als Ergebnis dieser Phase liegt eine Anforderungsliste vor, die als Messlatte für die Konzipierung der Prozesse und Ressourcen dient.

Im *ProductionSystemModeler* werden Anforderungen im gleichnamigen Zeichenblatt erfasst. Analog zu den zwei Parameterarten wird zwischen quantitativen und qualitativen Anforderungen unterschieden. Je Anforderungstyp steht ein Shape zur Verfügung, mit dem die einzelnen Angaben (Merkmal, Zahlenwert, Einheit, Skala, Verweise) spezifiziert werden. Für die weitere Verarbeitung erfolgt automatisch die Annotation semantischer Informationen über Merkmal und Einheit. Ein Auszug der Anforderungsliste an die Knetstraße ist in Bild 5-3 dargestellt. Darin sind die semantischen Annotationen für die Anforderung „Variables Chargengewicht“ gezeigt. Das Chargengewicht bezieht sich auf die Teigmenge, die am Ende eines Produktionszyklus die Knetstraße verlässt. Im vorliegenden Fall soll die Anlage Chargen von 250 bis 500 kg verarbeiten können. Bei der Spezifikation der Anforderung wird das entsprechende Merkmal ausgewählt und die URI „kem:batch_weight“ gespeichert. Ebenso werden die Zahlenwerte und die URI der gewählten Einheit „qudt:Kilogramm“ hinterlegt.

Nr.	F/W	Beschreibung	Wert			Einheit	Änderung	Zugeordnete Prozesse	Zugeordnete Ressourcen	
			min	exakt	max					
1.1	F	Das System soll wartungsarm sein.	8000			h	14.4.14		0	
1.2	F	Maximale Teigruhe der Knetanlage			4	h	14.4.14			
4.1	F	Variables Chargengewicht	250		500	kg	14.4.14	0	0	
4.2	F	Bodenfreiheit sämtlicher Einzelsysteme		150		mm	14.4.14	0		
5.1	F	Produktion im 3-Schicht-Betrieb	Semantische Annotation Merkmal label: „Chargengewicht“ URI: kem:batch_weight Zahlenwert: minvalue: 250 maxvalue: 500 Einheit label: „Kilogramm“ URI: http://qudt.org/vocab/unit#Kilogram						0	
6.1	F	Aufbauzeit der Anlage							0	0

Bild 5-3: Anforderungsliste mit semantischen Annotationen (Auszug)

Die semantisch aufbereiteten Anforderungen werden für den Aufbau der Suchanfragen verwendet. Anforderungen werden generell als Parameter aufgefasst, die vom jeweiligen Element (Prozess oder Ressource) bereitgestellt werden müssen. Die Beschreibung einer Anforderung dient dem Anwender und kann frei gewählt werden. Sie wird für die Suchanfragen nicht berücksichtigt. Für die semantische Verarbeitung der Daten werden die Zahlenwerte sowie die URI des Merkmals und der Einheit verwendet.

Aufstellen einer ersten Prozessfolge

Im nächsten Schritt wird eine erste Prozessfolge für das herzustellende Produkt aufgestellt. Grundlage ist das Produktkonzept und die darin spezifizierten Elemente¹. Im vorliegenden Beispiel wären dies die verwendeten Zutaten sowie der herzustellende Teigtyp. Die notwendigen Prozesse werden wahlweise durch die Anwender festgelegt oder durch den Zugriff auf vorhandene Planungsinformationen ermittelt. Wird die initiale Prozessfolge vom Anwender modelliert, werden im *ProductionSystemModeler* die vordefinierten Shapes verwendet. Materialelemente und Prozesse werden in diesem Fall über die festgelegten Grundklassen (*psc:MaterialElement*, *psc:ManufacturingProcess* bzw. *psc:AssemblyProcess*) beschrieben. Damit ist die notwendige Voraussetzung für den Einsatz der Wissensbasis geschaffen. Erfolgt ein Zugriff auf bestehendes Planungswissen, werden den ermittelten Prozessen die hinterlegten Prozessklassen zugewiesen.

In Bild 5-4 ist die wissensbasierte Modellierung der notwendigen Prozessfolge für die Herstellung des Mischteigs dargestellt. Die Wissensbasis des Unternehmens beinhaltet bereits Prozessfolgen, welche den Knetprozess beschreiben. Er besteht grundlegend aus den drei Prozessschritten *Zutaten dosieren*, *Teig kneten* und *Teig ruhen*. Als vorhandenes Fachwissen wird die Prozessfolge aus der Wissensbasis abgerufen und in das Projekt eingebunden. Die einzelnen Materialelemente und Prozesse werden entsprechend der vorliegenden Informationen klassifiziert und anhand Parametermerkmale beschrieben. Dem Anwender steht eine teilspezifizierte Prozessfolge zur Verfügung, die für das aktuelle Projekt angepasst und erweitert wird. Zur Herstellung des Mischteigs wird die Prozessfolge um den neuen Prozessschritt *Teig nachkneten* ergänzt. In diesem zusätzlichen Knetprozess wird zum Vorteig eine Körnermischung hinzugefügt und verknetet. Er stellt eine Kombination aus einem Dosier- und einem Knetprozess dar.

¹ Für den Übergang von der Konzipierung eines mechatronischen Produkts zur Modellierung der ersten Prozessfolge liefern NORDSIEK und BRANDIS Methoden, mit denen sich die produktionsorientierte Erzeugnisstruktur [Nor12, S. 108ff.] bzw. die montageorientierte Erzeugnisgliederung [Bra14, S. 122ff.] bilden lässt. Die im Produktkonzept aufgeführten Systemelemente, werden als Materialelement in der Prozessfolge abgebildet.

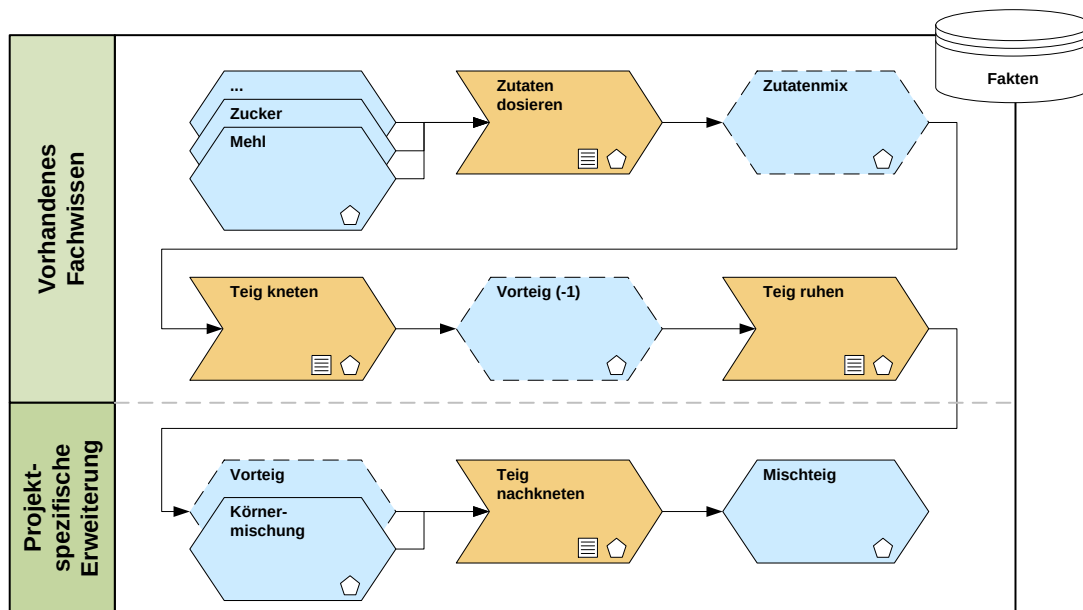


Bild 5-4: Wissensbasierte Modellierung einer ersten Prozessfolge

Abschließend werden die zu fertigenden Elemente und die Zukaufteile mit Hilfe eines Prüfschemas bestimmt [Nor12, S. 115]. Damit wird u.a. geprüft, ob das vorliegende Materialelement bereits im Unternehmen produziert wird bzw. ob es sich um ein bekanntes Zukaufteil handelt.

Spezifikation der Prozessfolge

Auf Basis der ersten Prozessfolge werden die Materialelemente, Fertigungs- und Montageprozesse gemäß der Modellierungsrichtlinien aus Kapitel 4.1 spezifiziert. Im Zuge der Prozesskonzipierung geht es nicht darum eine detaillierte Arbeitsvorgangsfolge zu erstellen, sondern den grundsätzlichen Produktionslauf aufzuzeigen. Es erfolgt eine erste Eingrenzung hinsichtlich des zu verwendenden Werkstoffes, der Fertigungsverfahren bzw. der Montagemethoden¹. Die Festlegung der Planungsinhalte wird durch den Zugriff auf die Wissensbasis unterstützt. Mit Hilfe der vorgestellten SPARQL-Anfragen (siehe Kapitel 4.3.1) wird nach bekannten Werkstücken und Bauteilen sowie Fertigungs- und Montageprozessen gesucht. Dies erfolgt für alle Materialelemente und Prozesse, die nur über die Grundklasse klassifiziert sind. Werden die Planungsinformationen im aktuellen Projekt unverändert eingesetzt, werden sie direkt für die Spezifikation verwendet. Damit ist sichergestellt, dass relevante Planungsinformationen im erstellten Produktionssystemkonzept enthalten sind. Zusätzlich wird der Modellierungs- und Planungsaufwand reduziert.

¹ vgl. [Nor12, S. 121]

Im gezeigten Beispiel wird dieser Schritt für den neuen Prozess *Teig nachkneten* durchgeführt (Bild 5-5). Standardmäßig ist der Prozess als Montageprozess (*psc:ManufacturingProcess*) klassifiziert, da er die vorgestellten Modellierungsregeln erfüllt. Einschränkungen für die Suche ergeben sich aus den verknüpften Anforderungen, in diesem Fall das Chargengewicht. Die notwendige SPARQL-Anfrage für die Suche nach vorhandenen Prozessen wird dynamisch auf Grundlage der Shape-Daten erzeugt. Verfügbare Ergebnisse werden dem Anwender präsentiert und die Parameter der ausgewählten Prozessklassen direkt in das Shape übertragen.

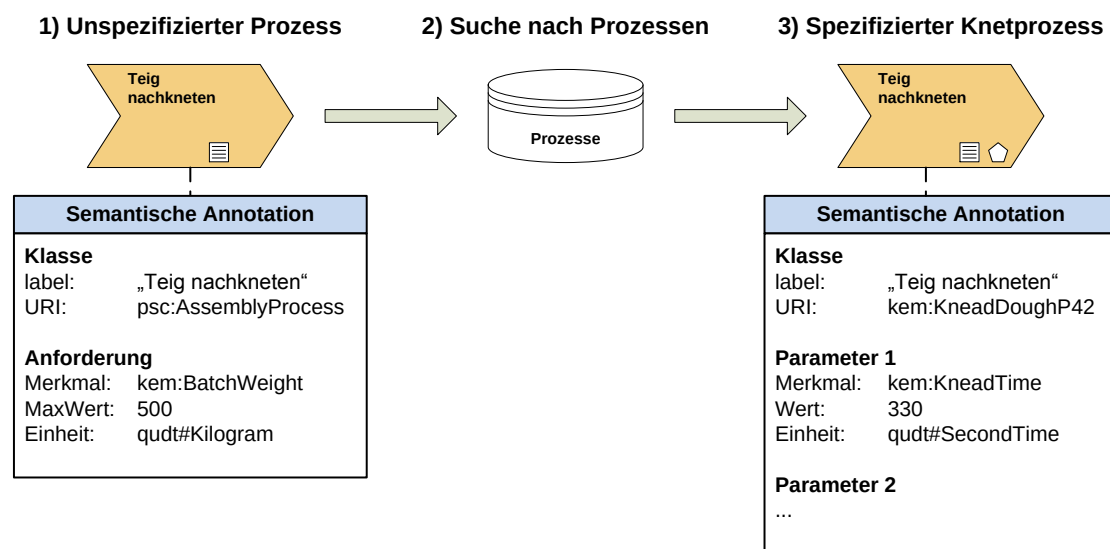


Bild 5-5: Wissensbasierte Prozessspezifikation am Beispiel des Prozesses „Teig nachkneten“

Sind Anpassungen an bestehenden Elementen oder Prozessen notwendig, liefert das hinterlegte Fachwissen dem Anwender grundlegende Informationen über Werkstoffe, Merkmale, etc. Ihm steht ein Template (Vorlage) für die weitere Spezifikation zur Verfügung. Als Ergebnis dieser Phase liegt das Konzept des Produktionssystems auf Prozessebene vor.

5.3 Modellierung der Grundstruktur des Produktionssystems

Mit der Modellierung der Grundstruktur startet die Konzipierung auf Ressourcenebene. Ziele dieser Phase sind die Fertigungs- und Montagesysteme zur Umsetzung der Prozessfolge und das initiale Layout des Produktionssystems. Bild 5-6 zeigt die einzelnen Planungsschritte und Aufgaben. Das resultierende Ressourcenmodell beinhaltet alle Ressourcen, die einen direkten Einfluss auf den Prozess, die Materialelemente und damit auf das Produktkonzept haben. Aspekte des innerbetrieblichen Materialflusses werden zunächst nicht betrachtet. Dieser ergibt sich aus den gewählten Fertigungs- und Montageresourcen sowie der räumlichen Anordnung und wird daher erst im Anschluss (Kapitel 5.4) modelliert.

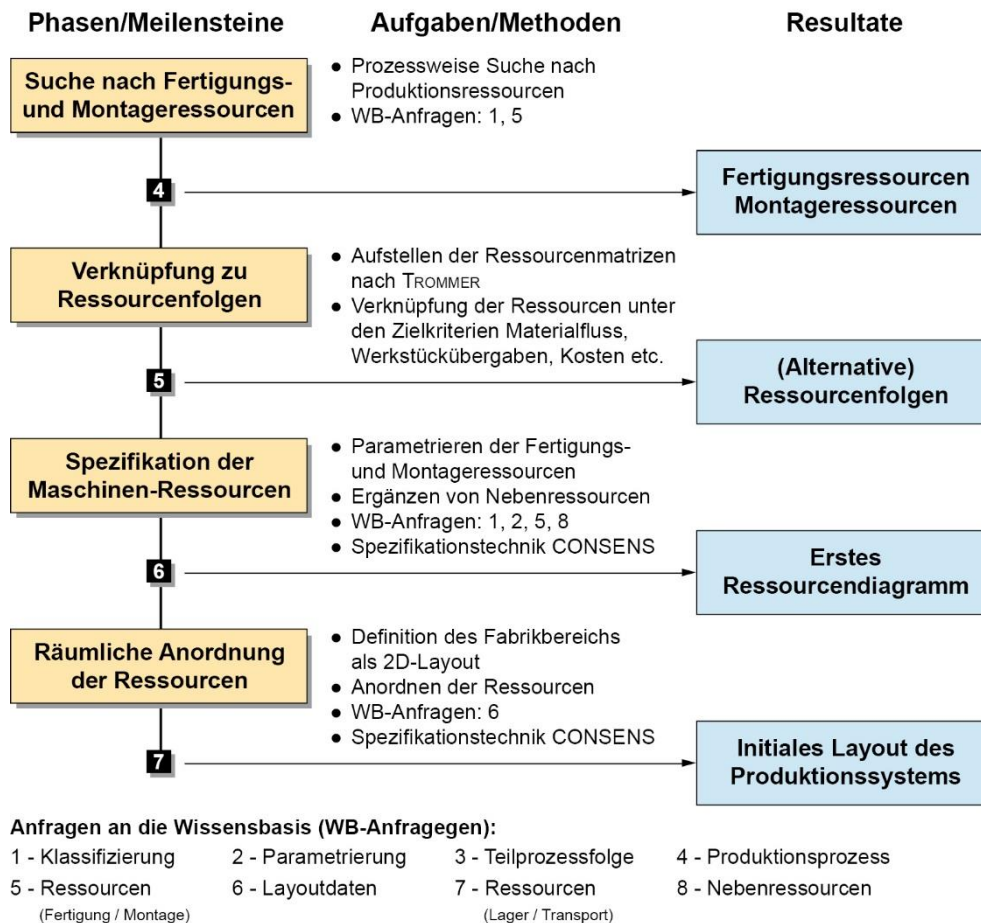


Bild 5-6: Vorgehen bei der Konzipierung der Fertigungs- und Montageressourcen

Suche nach Fertigungs- und Montageressourcen

Die Synthese der Ressourcenstruktur beginnt mit der prozessweisen Suche nach geeigneten Ressourcen. Randbedingungen für die Auswahl ergeben sich aus der spezifizierten Prozessfolge und ggf. aus der Verfügbarkeit¹. Der Abgleich umfasst die generellen Anforderungen, die Informationen des Bauteils und die technologischen Prozessaspekte (Bild 5-7). Aus den geschilderten Eingangsinformationen werden die prozessspezifischen SPARQL-Anfragen vom *ProductionSystemModeler* automatisch erzeugt.

¹ Informationen zur Verfügbarkeit von Maschinen im Unternehmen stehen nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und sind folglich nicht Bestandteil der vorgestellten Wissensbasis. Generell wäre eine Erweiterung des Fachwissens um Aspekte der Arbeitssteuerung denkbar. Damit würden dem Planer aktuelle Informationen aus der Produktionsumgebung während der Konzipierung zur Verfügung stehen.

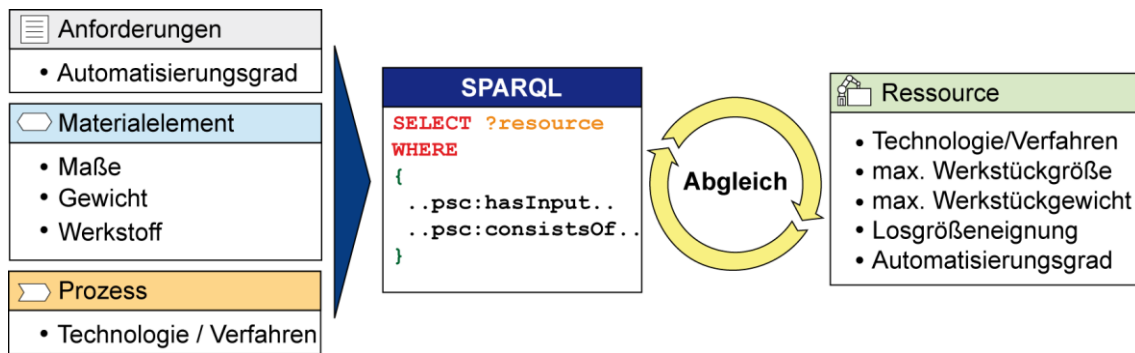


Bild 5-7: Eingangsinformationen der Ressourcensuche nach [Nor12, S. 133]

Für die Auswahl von Produktionsmitteln schlägt TROMMER ein zweistufiges Vorgehen vor. Im ersten Schritt erfolgt eine grobe Eignungsanalyse mit der Ressourcen ermittelt werden, die den Prozess prinzipiell ausführen können. Ressourcen die allgemeine und bauteilneutrale Anforderungen nicht erfüllen werden somit direkt eliminiert. Anschließend erfolgt eine feine Eignungsanalyse, bei der die bauteilspezifischen Merkmale mit berücksichtigt werden. Es werden die geometrischen und technologischen Merkmalsausprägungen mit den Eigenschaften der Ressource abgeglichen [Tro01, S. 54ff.].

Das geschilderte Vorgehen wird vom Planungswerkzeug unterstützt. Die einzelnen Prozessschritte der vorab spezifizierten Prozessfolge werden einzelnen betrachtet und notwendige SPARQL-Anfragen für die grobe Eignungsanalyse automatisiert erstellt. Es werden alle Ressourcen ermittelt, die eine *psc:realizeProcess*-Relation zu einer Prozessinstanz der gesuchten Prozessklasse besitzen. Im gezeigten Beispiel sind die Ressourcen *Dosierstation ZD1*, *Dosierstation ZD1F6* und *Dosierplatz* geeignet den Prozess *Zutaten dosieren* (Klasse *kem:Dosierprozess*) umzusetzen. Die Ergebnisse werden dem Anwender direkt in einer Ressourcenmatrix dargestellt (Bild 5-8).

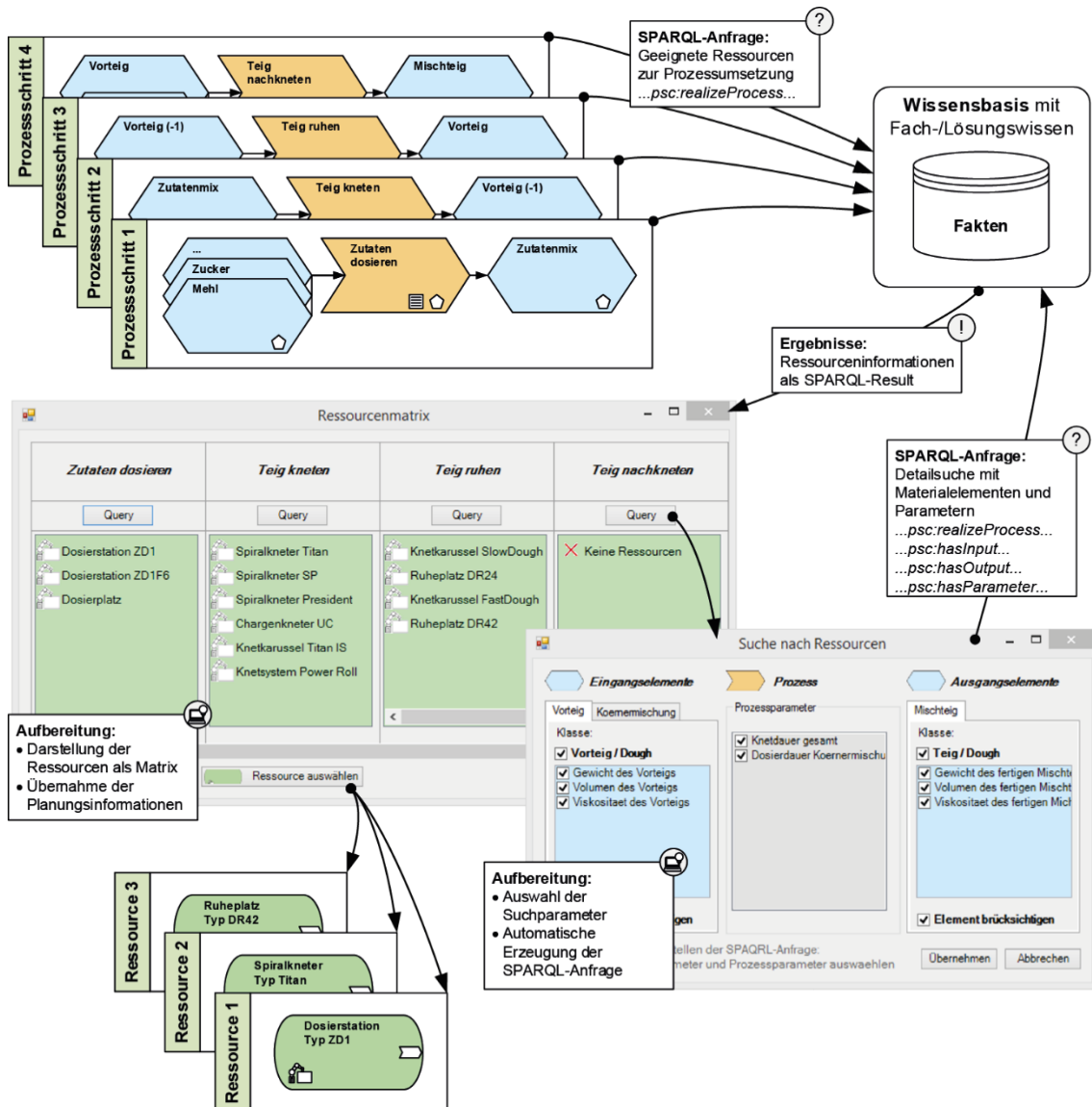


Bild 5-8: Umsetzung der Ressourcensynthese am Beispiel der Knetstraße

Für eine weitere Detaillierung der Suchanfragen steht dem Anwender eine Eingabemaske zur Verfügung. Im Sinne der vorab erwähnten feinen Eignungsanalyse werden die SPARQL-Anfragen um Eingangs- und Ausgangselemente sowie deren Parameter erweitert. Auf Basis der gewählten Suchkriterien werden die SPARQL-Anfragen automatisch erzeugt und an die Wissensbasis gestellt. Als Ergebnis werden alle Ressourcen zurückgegeben, die die betrachteten Prozesse und die definierten Randbedingungen erfüllen.

Verknüpfung zu Ressourcenfolgen

Aus den Ergebnissen der Einzelanfragen wird die Ressourcenmatrix mit den potentiellen Ressourcen aufgestellt. Je Prozess stehen meist mehrere Alternativen zur Verfügung, die in der Gesamtbetrachtung zu alternativen Ressourcenfolgen kombiniert werden. Die Bildung der Ressourcenfolgen kann unter verschiedenen Zielkriterien erfolgen, z. B. mög-

lichst wenige Maschinenwechsel, ein hoher Automatisierungsgrad, geringe Maschinenstundensätze etc. Die Ressourcenmatrix für die vorab spezifizierte Prozessfolge ist in Bild 5-8 dargestellt. Für die Standardprozesse einer Knetstraße sind im Unternehmen mehrere alternative Maschinen verfügbar. Beim projektspezifischen Prozess *Teig nachkneten* handelt es sich um einen neuen Produktionsprozess, für den bisher keine Ressourcen entwickelt wurden. Die Suchanfrage für die Materialelemente/Prozess-Kombination liefert folglich keine Ergebnisse. Da jeder Prozessschritt durch eine Ressource umgesetzt werden muss, wird zunächst eine Ressource der Klasse *Maschine* modelliert.

Spezifikation der Ressourcen

Die Ressourcen der ausgewählten Ressourcenfolge werden anschließend spezifiziert. Der Ablauf dieses Arbeitsschrittes ist identisch mit dem auf Prozessebene. Je Ressource werden die Parameter aus der Wissensbasis abgerufen und dem Shape zugewiesen. Fehlende Merkmalsausprägungen oder zusätzliche Parameter sind durch den Anwender zu ergänzen. Dieser Planungsschritt wird ebenfalls durch die Suchanfragen zur Klassifizierung und Parametrierung unterstützt. Für die eingefügte Maschinenressource werden die Merkmale der *Dosierstation ZD1*, des *Spiralknetters Titan* sowie der *Ruheplätze RD42* abgerufen und damit die jeweiligen Ressourcenparameter spezifiziert. Die Anzahl der benötigten Ressourcen je Prozessschritt ergibt sich z. B. aus der geforderten Ausbringungsmenge der Knetstraße und der Leistungsfähigkeit der einzelnen Ressourcen.

Die resultierende Ressourcenstruktur der Knetstraße ist in Bild 5-9 abgebildet. Die Systemgrenzen im Ressourcenmodell bilden die zwei Zutatenlager sowie die nachfolgende Backstraße. Zur Umsetzung des ersten Knetprozesses *Teig kneten* werden zwei Spiralknetter vom Typ Titan eingesetzt. Für den nachfolgenden Prozessschritt *Teig ruhen* (Ruhezeit mindestens 40 min) werden mehrere Ruheplätze vom Typ RD42 vorgesehen. Der zu entwickelnde *Dosierknetter* ist im Materialfluss eingebunden und wird über die Nebenressource *Knethaken SPx380* näher spezifiziert.

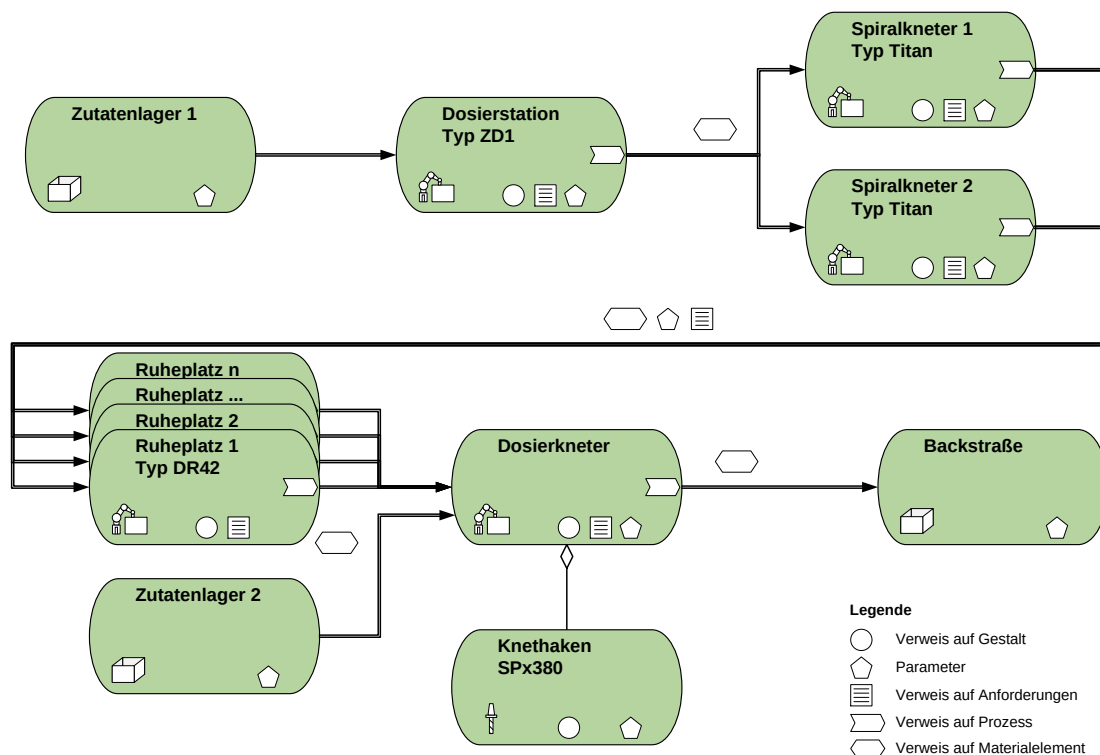


Bild 5-9: Grundstruktur der Knetstraße

Wird für einen Fertigungs- oder Montageprozess keine passende Maschine gefunden, bestehen zwei Handlungsoptionen. Zunächst kann der betrachtete Produktionsprozess weiter untergliedert werden und anschließend eine neue Suche anhand der Teilprozesse erfolgen. Führt auch dies zu keinem Ergebnis, muss eine neue Maschine entwickelt werden. Im gezeigten Beispiel wäre dies für den Dosierkneter der Fall. Es ergibt sich ein eigenständiges Entwicklungsprojekt, welches losgelöst von der Planung der Knetstraße durchgeführt wird. Es erfolgt ein Wechsel der Prozess- und Ressourcenbetrachtung. Die Ressource wird nicht mehr als Teil des Produktionssystems gesehen, sondern als mechatronisches System. Der Produktionsprozess wird zur Hauptfunktion, welche das mechatronische System erfüllen muss. Randbedingungen für die Entwicklungsaufgabe lassen sich aus dem Produktionssystemkonzept ableiten. Die eingehenden und ausgehenden Materialflüsse sowie die verknüpften Maschinen bilden Teile des Umfeldmodells. Prozess- und Ressourcenparameter werden zu Anforderungen, welche die Maschine erfüllen muss¹.

¹ Auf den weiteren Entwicklungsablauf des Dosierkneters wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Das generelle Vorgehen zur Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme sowie weiterführende Literatur wurden in Kapitel 2.3.1 vorgestellt. Die Unterstützung des Entwicklungsprozesses durch den Einsatz semantischer Technologien wird in [GTS14] ausführlich beschrieben.

Räumliche Anordnung der Ressourcen

Im letzten Planungsschritt wird das initiale Layout des Produktionssystems festgelegt und die spezifizierten Ressourcen darin platziert. Zunächst wird die verfügbare Fläche innerhalb der Fabrik oder des Produktionsbereichs abgebildet. Microsoft Visio bietet für diese Aufgabe vordefinierte Shape zur Grundrissplanung oder zur Werksplanung, auf die zurückgegriffen werden kann. Die verfügbaren Layoutinformationen richten sich danach, ob bestehende Ressourcen genutzt werden oder die Ressourcen beschafft bzw. entwickelt werden müssen. Für bestehende Ressourcen werden die Layoutdaten aus der Wissensbasis abgerufen und die Maschine als Rechteck abgebildet. Sind keine Layoutdaten verfügbar, wird benötigte Grundfläche durch den Anwender vorgegeben.

5.4 Detaillierung der Grundstruktur

In der dritten Hauptphase wird die vorab erstellte Grundstruktur weiter detailliert. Ergänzend zu den spezifizierten Fertigungs- und Montageressourcen erfolgt die Festlegung des innerbetrieblichen Materialflusses. Dieser ergibt sich aus der Prozess-Ressourcen-Zuordnung und den Reihenfolge-Beziehungen zwischen den Prozessen. In Verbindung mit den Layoutinformationen werden die weiteren Hauptressourcen Lager und Transport ausgewählt und die Ressourcenstruktur erweitert. Ergebnis ist das vollständige Produktionssystemkonzept.

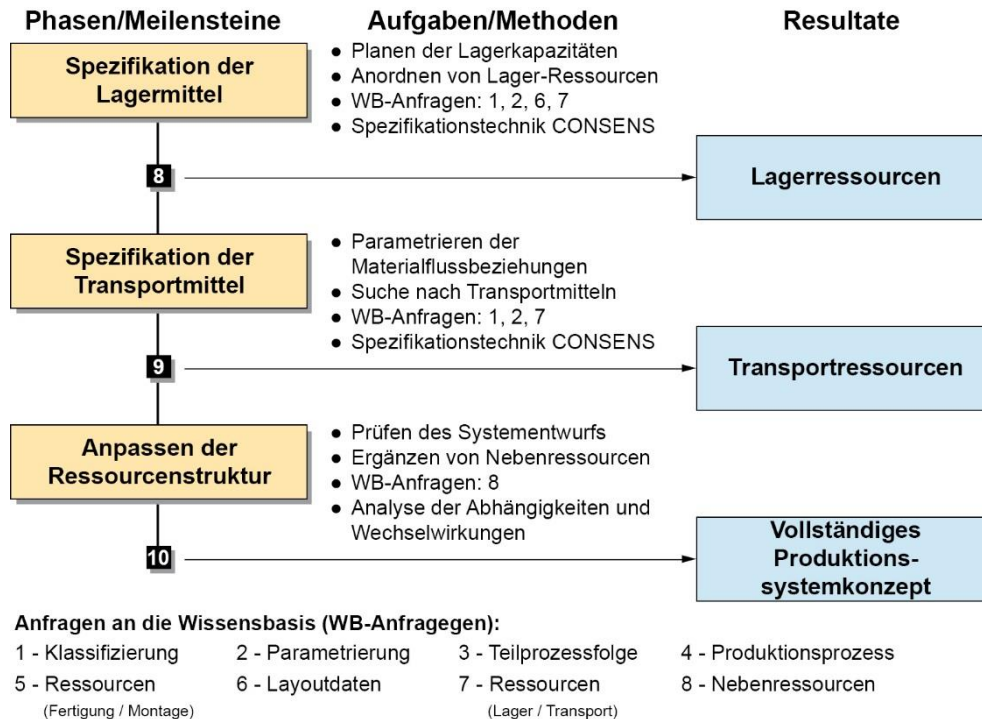


Bild 5-10: Vorgehen bei der Konzipierung der Materialflussressourcen

Spezifikation der Lagermittel¹

In der erstellten Grundstruktur des Produktionssystems sind die Taktzeiten der einzelnen Maschinen sowie deren Anordnung im Produktionsbereich festgelegt. Anhand dieser Planungsinformationen werden Zwischenlager geplant, falls diese notwendig sind. Hierzu sind einige Kenngrößen zu bestimmen, z. B. die benötigte Lagerkapazität, die Beschaffenheit des Lagerguts oder die verfügbare Fläche. Weiterhin sind geeignete Lagerstrategien festzulegen nach denen Materialelemente ein- und ausgelagert werden.

Jedes Zwischenlager wird über das entsprechende Ressourcen-Shape abgebildet und in den bestehenden Materialfluss zwischen den Maschinen eingebettet. Die Lagerfläche wird im initialen Layout erfasst und das Lager im Produktionsbereich positioniert. Ausgehend von den vorliegenden Planungsinformationen werden geeignete Lagermittel in der Wissensbasis gesucht. Die Kriterien für den Aufbau der Suchanfragen sind die spezifizierten Lagerkenngrößen, die Parameter des Materialelements und die festgelegte Lagerfläche. Sind in der frühen Planungsphase noch keine genauen Festlegungen der Lagertechnik erforderlich oder möglich, wird nur der generelle Lagertyp (Bodenlagerung, Hochregal, etc.) angegeben. Für den Lagertyp werden die Parameter abgerufen und als Template für die Spezifikation verwendet.

Spezifikation der Transportmittel

Mit dem Vorliegen der Fertigungs- und Montagesysteme sowie der Zwischenlager werden abschließend die Materialflussbeziehungen parametrisiert und geeignete Transportmittel ausgewählt². Jede Materialflussbeziehung ist mit einem Materialelement verknüpft, welches das Fördergut repräsentiert. Die Förderstrecken lassen sich aus der Anordnung der Maschinen und Lager im initialen Layout ableiten. Weitere Kriterien für die Auswahl der Transportmittel sind z. B. der Automatisierungsgrad, Stau- und Pufferfähigkeit, Wartungsaufwand oder Förderleistung. Merkmale zur Beschreibung von Transportmitteln werden in der Wissensbasis abgelegt und für die Spezifikation der Materialflussbeziehungen genutzt. Wie bei der Spezifikation der anderen Hauptressourcen, stehen dem Anwender vorkonfigurierte Transportressourcen oder Templates für generelle Transportmittel zur Verfügung.

Die Suche nach geeigneten Transportmitteln erfolgt analog zur vorab präsentierten Suche nach Fertigungs- und Montageressourcen (vgl. Bild 5-8). Aus jedem Materialfluss der Grundstruktur ergibt sich eine Suchanfrage an die Wissensbasis. Über die Materialfluss-

¹ Für das Beispiel der Knetstraße ist dieser Planungsschritt nicht relevant. Die Funktion eines Zwischenlagers wird bereits durch die spezifizierten Ruheplätze übernommen. Weitere Lager sind im Produktionsablauf nicht erforderlich. Eine Übersicht von Lagerkenngrößen und häufig eingesetzten Lagermittel liefert [ZEI08].

² Grundlegende Transportmittel sowie Merkmale zur Auswahl finden sich ebenfalls in der Arbeit von ZEIDLER [ZEI08].

parameter und die Materialelementparameter lässt sich die Suchanfrage weiter detaillieren. Der Materialtransport innerhalb der Knetstraße wird durch ein schienengebundenes Transportsystem (Carriertransporter vom Typ 300BT) übernommen. In Bottichen werden die Zutaten und der Teig vollautomatisiert zwischen den einzelnen Stationen transportiert. Somit kommt nur eine Ressource vom Typ Transport zur Umsetzung aller spezifizierten Materialflüsse zum Einsatz. Alternative Transportmittel wären ein manueller Bottichtransport durch den Anlagenbediener oder ein Transport durch einen großen Portalroboter.

Anpassen der Ressourcenstruktur

Der letzte Planungsschritt ist das Anpassen und Vervollständigen der Ressourcenstruktur. Fehlende Verweise zwischen den Partialmodellen werden mit Hilfe des in Kapitel 4.3.3 vorgestellten Vorgehens ermittelt und vom Anwender ergänzt. Für die ausgewählten Hauptressourcen werden die erforderlichen Nebenressourcen abgefragt und spezifiziert. Über die Eingangs- und Ausgangslager werden verfügbare Informationen zur Anlieferung der Rohteile (Zutaten, Körnermischung) und zum Abtransport des fertigen Produkts (Mischteig) erfasst. Die genauen Lagermittel sind nicht von Bedeutung, da es sich um Bereiche außerhalb des betrachteten Produktionssystems handelt. Folglich werden sie auch nicht im initialen Layout des Produktionssystems erfasst. Für erste Analysen, beispielsweise mittels einer Materialflusssimulation, werden die Angaben zum Wareneingang benötigt, um das dynamische Verhalten des Systems zu überprüfen.

Aus der Wahl der Hauptressourcen für die Herstellung und den Transport des Teigs ergibt sich die Notwendigkeit einer weiteren Ressource für die Übergabe an die nachfolgende Backstraße. Innerhalb der Knetstraße werden Bottiche zum Transport eingesetzt. Zum Abschluss der Prozessfolge muss der fertige Mischteig aus dem Bottich entnommen und der nachfolgenden Station übergeben werden. Hierzu wird ein Hebekipper vom Typ Titan verwendet. Der fertige Mischteig wird nach dem Prozessschritt *Teig nachkneten* zum Hebekipper transportiert und ausgeleert. In Bild 5-11 ist der Hebekipper in den bestehenden Materialfluss integriert und der Carriertransporter spezifiziert. Eine vollständige Ressourcenstruktur der Knetstraße und das initiale Layout sind in Anhang A4 dargestellt.

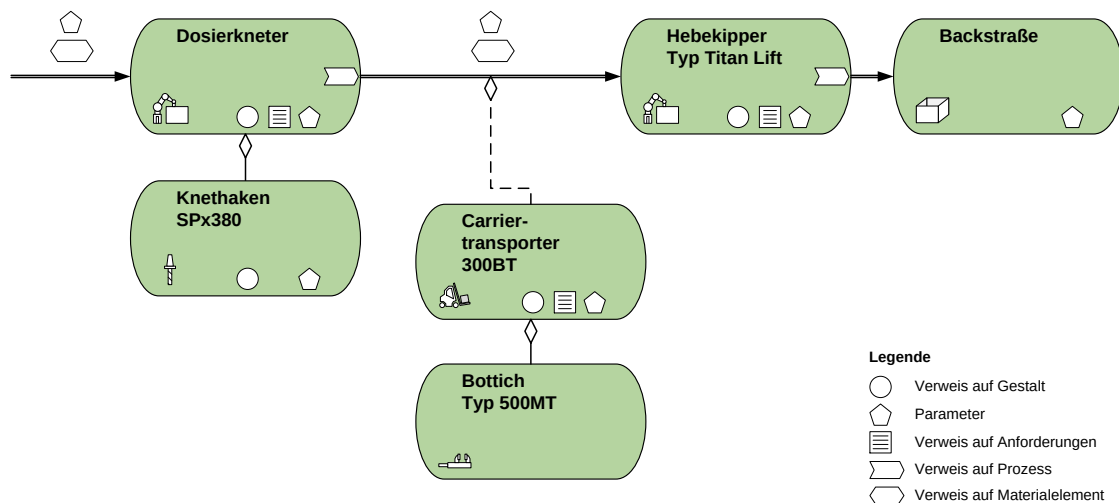


Bild 5-11: Erweiterte Ressourcenstruktur der Knetstraße (Ausschnitt)

5.5 Analyse des Produktionssystemkonzepts

Entwicklungs- und planungsbegleitende Analyse- und Bewertungsmethoden haben sich im industriellen Alltag etabliert. Die erzielten Ergebnisse helfen dem Planer, alternative Konzepte zu bewerten oder getroffene Annahmen zu überprüfen. Für die frühzeitige Produktionssystemkonzipierung wurden einige Bewertungsmethoden in Kapitel 2.5.2 kurz vorgestellt. Deren Einsatz kann wie eingangs erwähnt kontinuierlich während des Konzipierungsprozesses erfolgen. Die in Bild 5-12 gezeigten Phasen sind daher generell gültig.

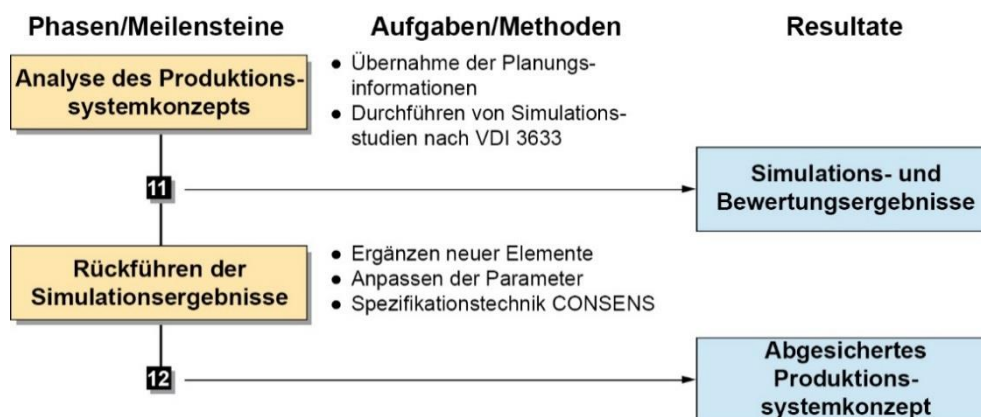


Bild 5-12: Vorgehen zur Absicherung des Produktionssystemkonzepts

Analyse des Produktionssystemkonzepts

Erster Arbeitsschritt für die Analyse eines Produktionssystemkonzepts ist die Übernahme der Planungsinformationen aus den unterschiedlichen Partialmodellen (Bild 5-13). Dieser Vorgang wird über die implementierte AutomationML-Schnittstelle unterstützt. Aus den Partialmodellen Prozesse, Ressourcen und Gestalt werden die spezifizierten Informationen ausgelesen und in einer standardisierten Datenformat gespeichert. Im zweiten Schritt

erfolgt die Modellerstellung auf Basis der Planungsdaten. Aus der Kombination der Partialmodelle Ressourcen und Gestalt ergibt sich der Aufbau des Produktionssystems. Der Produktionsablauf ist im Partialmodell Prozesse abgebildet. Zur Reduzierung des Modellierungsaufwands wurde prototypisch eine automatisierte Modellerstellung für die Materialflusssimulation Plant Simulation umgesetzt¹. Die AutomationML-Datei wird über eine XML-Schnittstelle importiert und anhand der Planungsdaten das Simulationsmodell erstellt. So lässt sich aufwandsarm das Grundmodell des Produktionssystems erstellen. Das weitere Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien wurde in Kapitel 2.5.1 präsentiert. Als Ergebnis der Planungsphase liegen Simulations- und Bewertungsergebnisse für den aktuellen Stand des Produktionssystemkonzepts vor.

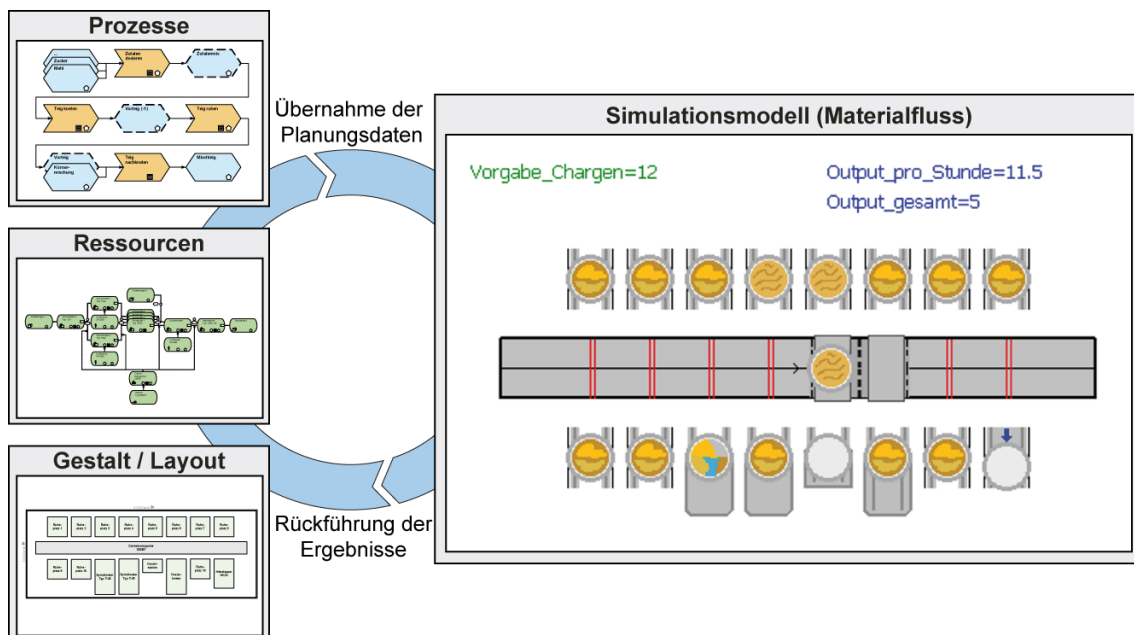


Bild 5-13: Simulative Absicherung von Produktionssystemkonzepten

Rückführen der Simulationsergebnisse

Der letzte Arbeitsschritt umfasst die Rückführung der ermittelten Ergebnisse in die Partialmodelle. Damit sind alle Änderungen und Erweiterungen am Simulationsmodell gemeint, die Auswirkungen auf die weitere Ausarbeitung haben und daher in der Prinzipiellösung erfasst werden müssen. So wird die konsistente Planungsgrundlage für die einzelnen Aufgabenbereiche der Arbeitsplanung gewährleistet. Änderungen umfassen vorwiegende Parameterausprägungen die im Zuge der Simulation angepasst wurden um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Dazu zählt beispielsweise die Anpassung der Taktzeit einzelner Maschine, um die geforderte Ausbringungsmenge zu erreichen oder die Auslegung von Transportressourcen, um die Versorgung der Maschinen zu gewährleisten. Sol-

¹ Das Vorgehen zur frühzeitigen Analyse von Produktionssystemen wurde in [CSER13] vorgestellt.

che Effekte lassen sich aus einer rein statischen Betrachtung des Systems nur schwer ermitteln bzw. abschätzen. Gleiches gilt für die Auslegung und Dimensionierung von Lagerressourcen. Werden diese erst in der Materialflussanalyse ergänzt, sind entsprechende Hauptressourcen im Partialmodell Ressourcen hinzuzufügen. Wurden alle Simulations- und Bewertungsergebnisse eingearbeitet, liegt das abgesicherte Produktionssystemkonzept vor.

5.6 Bewertung des Planungswerkzeugs anhand der Anforderungen

Mit dem Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung werden die Entwickler und Planer in der frühen Planungsphase unterstützt. Durch das Zusammenspiel der graphischen Modellierungsmethode, der semantischen Wissensrepräsentation und der darauf aufbauenden Problemlösungskomponente wird die Erarbeitung der einzelnen Produktionssystemaspekte vereinfacht. Nachfolgend wird das Planungswerkzeug anhand der Anforderungen auf Kapitel 2.8 bewertet:

A1) Einordnung in die bestehende Entwicklungsmethodik: Die Phasen des präsentierten Vorgehensmodells zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung dienen dem Entwickler als Leitfaden für die Erarbeitung der einzelnen Aspekte. Damit wird die zielgerichtete Kombination aus graphischer Modellierung und dem Einsatz der Wissensbasis sichergestellt. Die bestehenden Vorgehensmodelle für die Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK und BRANDIS werden hinsichtlich der Konzipierung auf Ressourcenebene erweitert. Das Vorgehen zur Absicherung des Produktionssystemkonzepts verläuft parallel zu den drei Hauptphasen (vgl. Kapitel 2.4) und ergänzt diese. Der Einsatz des Planungswerkzeugs ordnet sich damit vollständig in die bestehende Entwicklungsmethodik ein.

A2) Eindeutige graphische Modellierung: Mit der Spezifikationstechnik CONSENS steht den Entwicklern in der frühen Planungsphase ein intuitives Hilfsmittel für die Kommunikation und die Koordination zur Verfügung. Anhand weniger graphischer Elemente werden die Aspekte Prozesse und Ressourcen abgebildet. Die bestehenden Elemente und Modellierungsregeln wurden hinsichtlich der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung erweitert. Die Modellierungsregeln dienen dem Modellersteller als Anleitung zur Anwendung der Elemente. Weiterhin helfen sie einem Modellbetrachter bei der Interpretation der Planungsinformationen. Ein eindeutiges und einheitliches Verständnis ist sichergestellt.

A3) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitsablaufplanung: Die entwickelte ProSyCo-Ontologie ermöglicht das Abbilden von Fachwissen über Materialelemente, Prozesse und mehrstufige Prozessfolgen. Im Unternehmen verfügbare Rohteile, Zwischenzustände und Produkte sowie Informationen über eingesetzte Fertigungs- und Montageprozesse können semantisch aufbereitet werden. Prozessfolgen ermöglichen die Hierarchisierung von Produktionsprozessen. Mit den vorhandenen Konzepten und Relationen lassen sich die notwendigen Informationen für die frühzeitige Arbeitsablaufplanung erfassen.

A4) Fachwissen für die frühzeitige Arbeitssystemplanung: Die ProSyCo-Ontologie stellt weiterhin Konzepte zur semantischen Repräsentation von Bearbeitungs-, Lager- und Transportsystemen zur Verfügung. Zur Detaillierung können Ressourcenkonfigurationen modelliert werden, mit denen einer Hauptressource notwendige Werker, Werkzeuge und Hilfsmittel zugewiesen werden. Über eine Ressourcenkomposition lassen sich mehrstufige Produktionssysteme mit dem innerbetrieblichen Materialfluss erfassen. Für die Abbildung des Fachwissens in der frühzeitigen Arbeitssystemplanung sind die notwendigen Konzepte und Relationen enthalten.

A5) Flexible Wissensrepräsentation für die Konzipierungsphase: Die ProSyCo-Ontologie stellt das Grundvokabular für die Wissensrepräsentation zur Verfügung. Durch die enge Abstimmung mit den Elementen der Spezifikationstechnik CONSENS ist eine direkte Kombination sichergestellt. Die Prozess- und Ressourcenbetrachtung umfasst sowohl die Fertigung und die Montage als auch den innerbetrieblichen Materialfluss. Ausgehend von dem Grundvokabular lassen sich individuelle Wissensbasen mit projekt- oder unternehmensspezifischen Klassifikationen aufbauen.

A6) Intuitive Anwendung und Modellierungsunterstützung: Der entwickelte ProductionSystemModeller basiert auf Microsoft Visio und bietet dem Anwender eine gewohnte Office-Umgebung für die Erstellung der Partialmodelle. Vordefinierte Shapes, Kontroll- und Prüffunktionalitäten sowie angepasste Eingabemasken erleichtern die Modellierung und Dateneingabe. Über die standardmäßige Drag-and-Drop-Modellierung und die erweiterten Funktionen sind die Voraussetzungen für eine intuitive Anwendung geschaffen.

A7) Anwenderorientierte Wissensnutzung: Über das DotNetRDF-Framework lässt sich der ProductionSystemModeller ohne viel Aufwand mit einer Wissensbasis verbinden. Die notwendigen SPARQL-Anfragen werden automatisch anhand der graphischen Modellierung und den definierten Parametern erzeugt. Ergebnisse werden dem Anwender über die Eingabemasken dargestellt und die Planungsinformationen direkt in die graphische Modellierung überführt. Der Anwender kommt mit den semantischen Technologien nicht in Kontakt und kann sich auf die Erarbeitung der Produktionssystemaspekte konzentrieren.

A8) Unterstützung der frühzeitigen Bewertung: Eine frühzeitige Absicherung und Bewertung des erstellten Konzepts wird auf zwei Arten unterstützt. Zum einen bietet die ProSyCo-Ontologie die Möglichkeit, Informationen über die Bewertungsmethoden an den Parametern zu annotieren. Damit wird sichergestellt, dass der Anwender die notwendigen Angaben spezifiziert. Zum anderen werden die Planungsinformationen durch den ProductionSystemModeller exportiert und können in anderen Simulationswerkzeugen für die Modellerstellung verwendet werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen sehen sich zukünftig der Herausforderung gegenüber, neue Produkte in immer kürzeren Abständen an den Markt zu bringen. Diese Dynamisierung der Produktlebenszyklen erfordert eine effiziente und effektive Produktentwicklung. Damit einhergehend müssen auch die notwendigen Produktionssysteme immer schneller geplant und umgesetzt werden. Ein Lösungsansatz bietet die integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem. Die notwendigen Arbeitsschritte werden integrativ und zeitlich parallel durchgeführt. Dies erfordert eine frühzeitige und intensive Abstimmung zwischen den beteiligten Fachleuten. Als geeigneter Startpunkt der integrativen Entwicklung hat sich die Konzipierungsphase herausgestellt, da sich bereits auf Konzeptebene Wechselwirkungen berücksichtigen lassen.

Zur Modellierung der Prinziplösungen von Produkt und Produktionssystem wurde am Lehrstuhl für Produktentstehung die Spezifikationstechnik CONSENS entwickelt. CONSENS erlaubt eine semi-formale graphische Modellierung des Systems und dient als Koordinations- und Kommunikationsmedium. Das Produktionssystem wird über die vier Aspekte Anforderungen, Prozesse, Ressourcen und Gestalt beschrieben. Jeder Aspekt setzt sich aus mehreren Elementen und Beziehungen zusammen. Die einzelnen Aspekte stehen zudem untereinander in Beziehung. Es ergibt sich ein kohärentes System von Partialmodellen. Die spezifizierten Planungsinformationen bilden die Grundlage für die weitere Ausarbeitung des Produktionssystems im Zuge der Arbeitsplanung. Weiterhin ist die Prinziplösung frühzeitig durch geeignete Bewertungsmethoden und Simulationswerkzeuge abzusichern. Für die Konzipierung des Produktionssystems benötigt der Planer somit Fachwissen für den Aufbau der Partialmodelle und die Spezifikation der Elemente. Eine Möglichkeit für die gezielte Bereitstellung von Fachwissen bieten wissensbasierte Systeme in Kombinationen mit semantischen Technologien zur Informations- und Wissensrepräsentation. Semantische Technologien versetzen den Computer in die Lage, die modellierten Informationen zu interpretieren und aus den vorliegenden Fakten Schlüsse zu ziehen. Die **Herausforderung** liegt in der Verknüpfung der graphischen Modellierung des Produktionssystems mit der semantischen Repräsentation von Fachwissen. Beide Modellierungsmethoden müssen dahingehend aufeinander abgestimmt werden, dass sich die semantisch aufbereiteten Planungsinformationen direkt in den graphischen Modellierungsprozess einbetten lassen.

Im Stand der Technik wurden wissensbasierte Planungswerkzeuge und Ontologien zur Wissensrepräsentation vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Produktionssystemkonzipierung analysiert. Die Arbeiten fokussieren meist die spätere Ausarbeitung des Produktionssystems und unterstützen die Wissensrepräsentation oder die graphische Modellierung nur unzureichend. Daraus ergibt sich der **Handlungsbedarf** für ein *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung*.

Das entwickelte Planungswerkzeug orientiert sich am grundlegenden Aufbau eines wissensbasierten Systems und liefert gezielte Unterstützung für die Konzipierung eines Produktionssystems mit CONSENS. Als Ausgangspunkt dient ein vorliegendes Produktkonzept. Das Planungswerkzeug unterstützt den Planer bei der rechnerinternen Abbildung der vier Produktionssystemaspekte entsprechend der Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK. Dabei wird kontinuierlich auf vorliegendes Fachwissen zugegriffen. Der Transfer von Wissen und die Wiederverwendung bestehender Konzepte sollen verbessert und vereinfacht werden. Das Planungswerkzeug baut auf den vier Bestandteilen Spezifikationstechnik, Ontologie, Problemlösungskomponente und Vorgehensmodell auf.

- Für graphische Modellierung kommt die **Spezifikationstechnik** CONSENS zum Einsatz. Die bestehenden Arbeiten von REYES-PERES wurden um Grundklassen für die Elemente und Modellierungsregeln ergänzt. Damit wird die eindeutige Abbildung der Planungsinformationen gewährleistet.
- Eine **Ontologie** bildet die Grundlage für die maschinenverständliche Aufbereitung von Fachwissen für die Konzipierung. Die Konzepte der ProSyCo-Ontologie sind auf die graphische Modellierung mit CONSENS abgestimmt und ermöglichen so eine direkte Verknüpfung der vorliegenden Informationen mit den graphischen Elementen. Ausgehend von den ProSyCo-Konzepten, lassen sich individuelle Wissensbasen erstellen.
- Zur Unterstützung des Anwenders während der Modellierung, für die Synthese von Ressourcen und die Ermittlung von Abhängigkeiten / Wechselwirkungen wird die **Problemlösungskomponente** genutzt. Vorliegende Planungsinformationen werden in SPARQL-Suchanfragen überführt und Fachwissen aus der Wissensbasis abgerufen.
- Das **Vorgehensmodell** beschreibt die durchzuführenden Tätigkeiten während der wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Es dient dem Anwender als roter Faden und stellt die zielgerichtete Kombination von graphischer Modellierung und den Zugriff auf Fachwissen sicher.

Die Umsetzung des Planungswerkzeugs erfolgte als Microsoft Visio Add-In für die graphische Modellierung und mit einem Fuseki-Server für die Wissensbasis. Für die einfache Modellierung stehen vordefinierte Schablonen und angepasste Funktionen zur Verfügung. Die Anwendung wurde für einen beispielhaften Planungsprozess dargestellt. Damit wurde gezeigt, dass das Planungswerkzeug die gestellten Anforderungen erfüllt.

Ausblick und zukünftiger Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit zeigt, wie sich die Produktionssystemkonzipierung durch den Einsatz semantischer Technologien unterstützen lässt. Aufbauend auf den erreichten Ergebnissen bieten sich Anknüpfungsmöglichkeiten für weiterführende Arbeiten.

- **Frühzeitige Spezifikation des Verhaltens:** Die Partialmodelle Prozess und Ressourcen decken das Verhalten des Produktionssystemkonzepts bislang nur unzureichend ab. Das Prozessmodell liefert den prinzipiellen Produktionsablauf, ein Konzept zur geplanten Produktionssteuerung wird jedoch nicht spezifiziert. Für erste Analysen, beispielsweise mittels einer Materialflusssimulation, werden diese Planungsinformationen vom Simulationsexperten benötigt. Bislang fehlen Möglichkeiten zur Spezifikation des Verhaltens mittels der vier Aspekte zur Konzipierung des Produktionssystems. Einen Ansatzpunkt bieten die Verhaltensmodelle der Produktkonzipierung.
- **Automatisierung von Planungsaufgaben:** Die vorgestellte Ontologie bietet ein Grundvokabular zur semantischen Repräsentation von Planungsinformationen in der Konzipierungsphase. Die ProSyCo-Ontologie wurde im Hinblick auf die Bereitstellung von Wissen erarbeitet und die SPARQL-Anfragen auf typische Fragenstellungen der Produktionssystemkonzipierung ausgelegt. Für eine weitere Unterstützung des Anwenders während der Konzipierung müssen die erarbeiteten Konzepte detailliert werden. Beispielsweise für die Suche und Auswahl von Ressourcen anhand ähnlicher Prozessbeschreibungen oder die Konfiguration alternativer Ressourcenfolgen in der Ressourcenmatrix. Neben dem Faktenwissen sind hierzu Regeln für die einzelnen Planungsaufgaben bereitzustellen und vom Planungswerkzeug auszuwerten. Damit lassen sich wiederkehrende Aufgaben der Produktionssystemkonzipierung automatisiert durchführen und der Planungsaufwand weiter reduzieren.
- **Ganzheitliche semantische Betrachtung des Produktentstehungsprozesses:** Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Fachwissen für die Produktionssystemkonzipierung auf Prozess- und Ressourcenebene betrachtet. Abhängigkeiten und Wechselwirkungen während der Konzipierung können mit Hilfe semantischer Technologien berücksichtigt werden. Ein Ansatz wurde in dieser Arbeit präsentiert. Im Sinne einer frühzeitigen und integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, sind die Wechselwirkungen mit der Produktkonzipierung ebenfalls zu bestimmen. Es bedarf einer ganzheitlichen semantischen Beschreibung von Produkt- und Produktionssystemkonzept. Die Arbeiten des ENTIME-Projekts liefern Konzepte für eine semantische Repräsentation von Anforderungen, Funktionen und Systemelementen. Durch eine Verknüpfung mit den ProSyCo-Konzepten würde die Grundlage für eine ganzheitliche Betrachtung geschaffen. Auf Basis einer vollständigen semantischen Repräsentation von Produkt- und Produktionssystem ließen sich Auswirkungen von Konzeptänderungen propagieren und die Zusammenarbeit der Fachexperten weiter verbessern.

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
BDE	Betriebsdatenerfassung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
DIN	Deutsches Institut für Normung
d. h.	das heißt
etc.	et cetera
ISBN	International Standard Book Number
IT	Informationstechnik
Kap.	Kapitel
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
NC	Numerical Control
OWL	Web Ontology Language
ProSyCo	Ontology for Production System Concept
RC	Robot Control
RDF	Resource Description Framework
RDFS	Resource Description Framework Schema
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (ehemals Verband für Arbeitsstunden e.V.)

SPARQL	SPARQL Protocol And RDF Query Language
SWRL	Semantic Web Rule Language
u.U.	unter Umständen
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VRML	Virtual Reality Modeling Language
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

Literaturverzeichnis

- [ABG+14] ANACKER, H.; BAUER, F.; GAUSEMEIER, J.; SCHIERBAUM, T.: Systementwurf mit Hilfe von Lösungsmustern aus dem Semantic Web. In: Gausemeier, J.; Trächtler, A.; Schäfer, W. (HRSG.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme, Hanser, München, 2014, S. 142–164
- [ADG+14] ANACKER, H.; DZIWOK, S.; GAUSEMEIER, J.; OESTERSÖTEBIER, F.; RIEKE, J.; SCHÄFER, W.; SEIFERT, L.; TRÄCHTLER, A.: Aufbereitung von Lösungswissen für das Semantic Web. In: Gausemeier, J.; Trächtler, A.; Schäfer, W. (HRSG.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme, Hanser, München, 2014, S. 99–141
- [AM11] AMERI, F.; MCARTHUR, C.: An Experimental Evaluation of a Rule-Based Approach to Manufacturing Supplier Discovery in Distributed Environments. In: ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011, S. 1121–1133
- [AM13a] AMERI, F.; MCARTHUR, C.: A multi-agent system for autonomous supply chain configuration. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Ausgabe 5-8/2013, S. 1097–1112
- [AM13b] AMERI, F.; MCARTHUR, C.: Semantic rule modelling for intelligent supplier discovery. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Ausgabe 2013, S. 1–21
- [Ame07] AMERI, F.: Supply chain standardization – An ontological approach, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2007
- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G. (Hrsg.): Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [AR68] AWF - AUSSCHUß FÜR WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG E.V.; REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN E.V.: Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil 1 - Arbeitsplanung, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, Köln, Frankfurt, 1968
- [Bai08] BAIER, E.: Semantische Technologien in Wissensmanagementlösungen – Einsatzpotenziale für den Mittelstand, MFG-Stiftung Baden-Württemberg, Band 13, Stuttgart, 2008
- [BBP+14-ol] BECKETT, D.; BERNERS-LEE, T.; PRUD'HOMMEAU, E.; CAROTHERS, G.: RDF 1.1 Turtle - Terse RDF Triple Language – W3C Recommendation 25 February 2014. Unter: <http://www.w3.org/TR/turtle/>, 7.3.2014
- [BF06] BLUMAUER, A.; FUNDNEIDER, T.: Semantische Technologien in integrierten Wissensmanagement-Systemen. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (HRSG.): Semantic Web — Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg [u.a.], 2006
- [BG14-ol] BRICKLEY, D.; GUHA, R. V.: RDF Schema 1.1 – W3C Recommendation 25 February 2014. Unter: <http://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf-schema-20140225/>, 3.3.2014
- [BGN+09] BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.; NORDSIEK, D.; REYES PÉREZ, M.: A Holistic Approach for the Conceptual Design of Production Systems regarding the Inter-action between Product and Production System. In: Zäh, M. (HRSG.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009) – Munich, Germany, October 5th - 7th, 2009, Utz, München, 2009
- [BHL01] BERNERS-LEE, T.; HENDLER, J.; LASSILA, O.: The Semantic Web – A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. In: SCIENTIFIC AMERICAN (HRSG.): Scientific American - May 2001, Georg von Holtzbrinck Publishing Group, New York, NY, 2001, S. 34–43

- [BHM+06] BERNARDI, A.; HOLZ, H.; MAUS, H.; VAN ELST, L.: Komplexe Arbeitswelten in der Wissensgesellschaft. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (HRSG.). Semantic Web — Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg [u.a.], 2006, S. 26–45
- [Bod06] BODENDORF, F.: Daten- und Wissensmanagement, Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2006
- [Bor97] BORST, W. N.: Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse, 1997
- [Bou12] BOURIER, G.: Beschreibende Statistik – Praxisorientierte Einführung Mit Aufgaben und Lösungen, Gabler Verlag, Wiesbaden, 10. Auflage, 2012
- [BPV12] BECKER, J.; PROBANDT, W.; VERING, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung – Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement, Springer Gabler, Berlin [u.a.], 2012
- [Bra06-ol] BRATT STEVE: Semantic Web and Other W3C Technologies to Watch. Unter: <http://www.w3.org/2006/Talks/1023-sb-W3CTechSemWeb/>, 22.5.2014
- [Bra14] BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipien mechatronischer Systeme. Dissertation, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 2014
- [CF92] CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T.: Automobilentwicklung mit System – Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA, Campus-Verlag, Frankfurt am Main, New York, 1992
- [CWL14-ol] CYGANIAK, R.; WOOD, D.; LANTHALER, M.: RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax – W3C Recommendation 25 February 2014. Unter: <http://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/>, 3.3.2014
- [Dan99] DANGELMAIER, W.: Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung ; Grundlagen, Algorithmen und Beispiele, Springer-Verlag, Berlin u.a., 1999
- [DIN55350-11] DIN 55350-11: Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005, Mai 2008
- [DIN55350-12] DIN 55350-12: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Merkmalsbezogene Begriffe, März 1989
- [DIN8580] DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriff, Einteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003
- [DK11] DIBOWSKI, H.; KABITZSCH, K.: Ontology-Based Device Descriptions and Device Repository for Building Automation Devices. EURASIP Journal on Embedded Systems, Ausgabe 2011, S. 1–17
- [Dra10] DRATH, R.: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML – Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010
- [DS05] DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht ; mit 79 Tabellen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3., verb. Aufl., 2005
- [Dud14a-ol] DUDEN: Ontologie. Unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Ontologie>, 7.3.2014
- [Dud14b-ol] DUDEN: Wechselwirkung. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Wechselwirkung>
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, Hanser, München [u.a.], 4., aktualisierte Auflage, 2009

- [EKL13] EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 6. Auflage, 2013
- [ES05] EVERSHEIM, W.; SCHUH, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Fertigung und Montage. VDI-Verlag, Band 4, Düsseldorf, 2. Auflage, 1989
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1997
- [FFB+08] FENVES, S. J.; FOUFOU, S.; BOCK, C.; SRIRAM, R. D.: CPM2: A Core Model for Product Data. Journal of Computing and Information Science in Engineering, Ausgabe 1/2008, S. 14501
- [FFG94] FADEL, F. G.; FOX, M. S.; GRUNINGER, M.: A Generic Enterprise Resource Ontology. In: Enabling Technologies for Concurrent Engineering, 3rd Workshop, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, April 1994, S. 117–128
- [FKV14] FELDMANN, S.; KERNSCHMIDT, K.; VOGEL-HEUSER, B.: Combining a SysML-based modeling approach and semantic technologies for analyzing change influences in manufacturing plant models. In: ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H. (HRSG.): Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2014), 2014
- [Fox92] FOX, M. S.: The TOVE Project: Towards a Common-Sense Model of the Enterprise. In: Petrie, C. J. (HRSG.): Enterprise integration modeling – Proceedings of the first international conference, MIT Press, Cambridge, Mass, 1992
- [FR00] FELDMANN, K.; REINHART, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion – Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Springer Verlag, Berlin [u.a.], 2000
- [Gaa10] GAAG, A.: Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, Dr. Hut Verlag, München, 2010
- [Gab14-ol] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: Wissensmanagement. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55427/wissensmanagement-v8.html>, 18.02.2014
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GBD+12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; DOROCIAC, R.; MÜLDER, A.; NYBEN, A.; TERFLOTH, A.: Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (HRSG.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren — Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES PÉREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (HRSG.): Design 2010 — 11th International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010, Zagreb, 2010, S. 711–722
- [GD10] GAUSEMEIER, J.; DEYTER, S.: Spezifikation der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J. (HRSG.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GDK+11] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; KAHL, S.; NORDSIEK, D.: Integrative development of product and production system for mechatronic products. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Ausgabe 4/2011, S. 772–778

- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design, Ausgabe 4/2009, S. 201–223
- [GK06] GIENKE, H.; KÄMPF, R.: Praxishandbuch Produktion – Innovatives Produktionsmanagement; Organisation, Konzepte, Controlling. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GL02] GRUNINGER, M.; LEE, J.: Ontology applications and design, v. 45, no. 2
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2. überarbeitete Auflage, 2014
- [GPP13-ol] GEARON, P.; PASSANT, A.; POLLERES, A.: SPARQL 1.1 Update – W3C Recommendation 21 March 2013. Unter: <http://www.w3.org/TR/sparql11-update/>
- [GR98] GIARRATANO, J. C.; RILEY, G.: Expert systems – Principles and programming, PWS Pub. Co., Boston, 3rd ed, 1998
- [GRS14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F. J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Design methodology for intelligent technical systems – Develop intelligent technical systems of the future, 2014
- [Gru12] GRUNDIG, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik, Methoden, Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2012
- [Gru93] GRUBER, T. R.: A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, Ausgabe 2/1993, S. 199–220
- [GS14-ol] GANDON, F.; SCHREIBER, G.: RDF 1.1 XML Syntax – W3C Recommendation 25 February 2014. Unter: <http://www.w3.org/TR/rdf-syntax-grammar/>
- [GT05] GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H.: Produktion und Logistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg [u.a.], 6. Auflage, 2005
- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Gua97] GUARINO, N.: Semantic matching: Formal ontological distinctions for information organization, extraction, and integration. In: Carbonell, J. G.; Siekmann, J.; Goos, G.; Hartmanis, J., ET AL. (HRSG.). Information Extraction A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology, Springer Berlin Heidelberg, Band 1299, Berlin, Heidelberg, 1997, S 139–170
- [Har10] HARMS, R.: Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen. Dissertation, Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Technisch Hochschule Berlin, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2010
- [HKR+08] HITZLER, P.; KRÖTZSCH, M.; RUDOLPH, S.; SURE, Y.: Semantic Web – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [HMR10] HELBING, K.; MUND, H.; REICHEL, M.: Handbuch Fabrikprojektierung – Mit 331 Tabellen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [HPB+04-ol] HORROCKS, I.; PATEL-SCHNEIDER, P. F.; BOLEY, H.; TABET, S.; GROSOFF, B.; DEAN, M.: SWRL: A Semantic Web Rule Language - Combining OWL and RuleML – W3C Member Submission 21 May 2004. Unter: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>
- [HS13-ol] HARRIS, S.; SEABONE, A.: SPARQL 1.1 Query Language – W3C Recommendation 21 March 2013. Unter: <http://www.w3.org/TR/sparql11-query/>, 6.3.2014

- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; WECK, O. de; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung, Orell Füssli, Zürich, 12. Auflage, 2012
- [ISO8373] ISO 8373: Robots and robotic devices. International Organization for Standardization, 2012
- [JL09] JOO, J.; LEE, S. M.: Adoption of the Semantic Web for overcoming technical limitations of knowledge management systems. Expert Systems with Applications, Ausgabe 3/2009, S. 7318–7327
- [Kai13] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer System. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2013
- [KHC09] KHLWANI, N.; HARDING, J. A.; CHOUDHARY, A. K.: Semantic web in manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Ausgabe 7/2009, S. 905–924
- [Kös06] KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Paderborn, 2006
- [Kur89] KURBEL, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen – Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme, Springer-Verlag, Berlin [u.a.], 1989
- [LH07] LIN, H. K.; HARDING, J. A.: A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. Computers in Industry, Ausgabe 5/2007, S. 428–437
- [LHS04] LIN, H.-K.; HARDING, J. A.; SHAHBAZ, M.: Manufacturing system engineering ontology for semantic interoperability across extended project teams. International Journal of Production Research, Ausgabe 24/2004, S. 5099–5118
- [Loh06] LOHSE, N.: Towards an ontology framework for the integrated design of modular assembly systems. Dissertation, Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of Nottingham, 2006
- [LSD+06] LEMAIGNAN, S.; SIADAT, A.; DANTAN, J.-Y.; SEMENENKO, A.: MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain. In: : IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06), 2006, S. 195–200
- [Mar06] MARTIN, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 2006
- [Mar99] MARTIN, H.: Praxiswissen Materialflussplanung – Transportieren, Handhaben, Lagern, Kommissionieren. Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden, 1999
- [MD03] MARTIN, P.; D'ACUNTO, A.: Design of a production system: An application of integration product-process. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Ausgabe 7-8/2003, S. 509–516
- [MH04-ol] MCGUINNESS, D. L.; HARMELEN, F. v.: OWL Web Ontology Language - Overview – W3C Recommendation. Unter: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/>
- [Mic06] MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006
- [MZK+10] MERDAN, M.; ZOITL, A.; KOPPENSTEINER, G.; DEMMELMAYR, F.: Semantische Technologien – Stand der Technik. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 10/2010, S. 291–299
- [NBG13] NORDSIEK, D.; BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.: Integrative Produktionssystemkonzipierung in der Mechatronik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 108 (2013) 9, Carl Hansa Verlag, München, 2013

- [NHK+09] NYHUIS, P.; HIRSCH, B.; KLEMKE, T.; WULF, S.: Bewertung und Auswahl digitaler Werkzeuge in der Fabrikplanung. In: Schenk, M. (HRSG.). Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation, Gito, Berlin, 2009
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [NWD+08] NYHUIS, P.; WULF, S.; DENKENA, B.; EIKÖTTER, M.: Integrative Fabrik-, technologie- und Produktplanung – Aus Basis eines Systemmodells. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 5/2008, S. 409–414
- [Obe06] OBERLE, D.: Semantic management of middleware, Springer-Verlag, Band 1, New York, 2006
- [Pau11] PAUL, J.: Praxisorientierte Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Mit Beispielen und Fallstudien, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2011
- [PB06a] PELLEGRINI, T.; BLUMAUER, A. (Hrsg.): Semantic Web – Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg [u.a.], 2006
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHOSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [PL11] PONN, J.; LINDEMANN, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen, Springer-Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 2011
- [Pla02] PLATH, H.-E.: Erfahrungswissen und Handlungskompetenz - Konsequenzen für die berufliche Weiterbildung. In: Kleinhenz, G. (HRSG.): IAB-Kompodium Arbeitsmarkt- und Berufsforschung – Beiträge zur Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Nürnberg, 2002, S. 517–529
- [PRR12] PROBST, G.; RAUB, S.; ROMHARDT, K.: Wissen managen – Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012
- [REF90] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V.: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme, Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1990
- [Rey11] REYES PÉREZ, M.: A specification technique for the conceptual design of manufacturing systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011
- [Rüh10] RÜHL, J.: Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung – Stochastische Simulation von Produktionssystemen während der Produktentwicklungsphase, Shaker, Band 159, Aachen, 2010
- [SAA+00] SCHREIBER, G.; AKKERMANS, H.; ANJEWIERDEN, A.; HOOG, R. de; SHADBOLT, N.; VAN DE VELDE, WALTER; WIELINGA, B.: Knowledge engineering and management – The CommonKADS methodology, The MIT Press, Cambridge, London, op. 2000
- [SBF98] STUDER, R.; BENJAMINS, V.; FENSEL, D.: Knowledge engineering: Principles and methods. Data & Knowledge Engineering, Ausgabe 1-2/1998, S. 161–197
- [Sch08] SCHADY, R.: Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2008
- [SDI+00] SCHLENOFF, C.; DENNO, P.; IVESTER, R.; LIBES, D.; SZYKMAN, S.: An analysis and approach to using existing ontological systems for applications in manufacturing. AI EDAM, Ausgabe 4/2000, S. 257–270
- [SMG+08] SUN, W.; MA, Q.-Y.; GAO, T.-Y.; WANG, H.-P.; GUO, L.: Applications of Semantic Web Technologies for Ontology-Based Knowledge Management in Product Development. In :

- 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2008, S. 1–4
- [SMG09] SUN, W.; MA, Q.-Y.; GAO, T.-Y.: An Ontology-Based Manufacturing Design System. *Information Technology Journal*, Ausgabe 5/2009, S. 643–656
- [SS09] STAAB, S.; STUDER, R.: *Handbook on ontologies*, Springer-Verlag, Berlin, 2nd ed, 2009
- [The12-ol] The Unicode Consortium (Hrsg.): *The Unicode standard – Version 6.2 - Core specification*. Unicode Consortium, Mountain View, California, 2012
- [Tro01] TROMMER, G.: *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [VAC+09] VOGEL, O.; ARNOLD, I.; CHUGHTAI, A.; IHLER, E.; KEHRER, T.; MEHLIG, U.; ZDUN, U.: *Software-Architektur – Grundlagen - Konzepte - Praxis*. Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg, 2. Auflage, 2009
- [VDI2206] VDI-RICHTLINIE 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [VDI2221] VDI-RICHTLINIE 2221: *Methodik zum Entwicklen und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- [VDI2860] VDI-RICHTLINIE 2860: *Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990
- [VDI3633-1] VDI-RICHTLINIE 3633-1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2010
- [VDI3633-3] VDI-RICHTLINIE 3633-3: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 1997
- [VDI5200] VDI-RICHTLINIE 5200: *Fabrikplanung - Planungsvorgehen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011
- [VDI5610] VDI-RICHTLINIE 5610: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*. Beuth Verlag GmbH, März 2009
- [W3C12-ol] W3C OWL WORKING GROUP: *OWL 2 Web Ontology Language – Document Overview (Second Edition)*. Unter: <http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-overview-20121211/>
- [W3C13-ol] W3C SPARQL WORKING GROUP: *SPARQL 1.1 Overview – W3C Recommendation 21 March 2013*. Unter: <http://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>, 6.3.2014
- [War93] WARNECKE, H.-J.: *Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung*. Springer-Verlag, Berlin, 1993
- [Wie10] WIENDAHL, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, München, 7. aktualisierte Auflage, 2010
- [Wie96] WIENDAHL, H.-P.: *Grundlagen der Fabrikplanung*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management "Betriebshütte"*, Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 1996
- [WK09] WEBER, W.; KABST, R.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*, Gabler, Wiesbaden, 7. überarb. Auflage, 2009
- [WRN09] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.: *Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Yu11] YU, L.: *A Developer's Guide to the Semantic Web*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011

- [ZCY99] ZHAO, J.; CHEUNG, W. M.; YOUNG, R.: A consistent manufacturing data model to support virtual enterprises. *International Journal of Agile Management Systems*, Ausgabe 3/1999, S. 150–158
- [Zei08] ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Relevante Teilergebnisse des Projekts ENTIME	A-1
A2 Vorgehensmodelle zur Produktionssystemkonzipierung	A-3
A2.1 Vorgehensmodell nach NORDSIEK.....	A-3
A2.2 Vorgehensmodell nach BRANDIS.....	A-6
A3 Ergänzungen zu Kapitel 4	A-9
A3.1 Modellierung einer Zahlenwert-Einheit-Kombination.....	A-9
A3.2 SPAQRL-Abfragen zur Modellierung	A-10
A4 Ergänzungen zu Kapitel 5	A-11
A4.1 Konzipierung auf Ressourcenebene.....	A-11
A4.2 Konzipierung auf Gestaltebene	A-12

A1 Relevante Teilergebnisse des Projekts ENTIME

Im Forschungsprojekt ENTIME (Entwurfstechnik Intelligent Mechatronik) wurde der Einsatz semantischer Technologien für die Produktkonzipierung erforscht und anhand von Praxisbeispielen validiert. Nachfolgend wird kurz der grundlegende Ansatz vorgestellt. Für detaillierte Informationen sei auf das Fachbuch [GTS14] verwiesen.

Für den Systementwurf werden realisierte und bewährte Lösungen in Form von sogenannten Lösungsmustern bereitgestellt. Ein Lösungsmuster ist eine abstrakte Darstellung eines konkreten Lösungselements und beschreibt die Struktur und das Verhalten in einer allgemeinen Form. Bild A-1 zeigt die einheitliche Spezifikation eines Lösungsmusters in Anlehnung an die Aspekte der Spezifikationstechnik CONSENS¹.

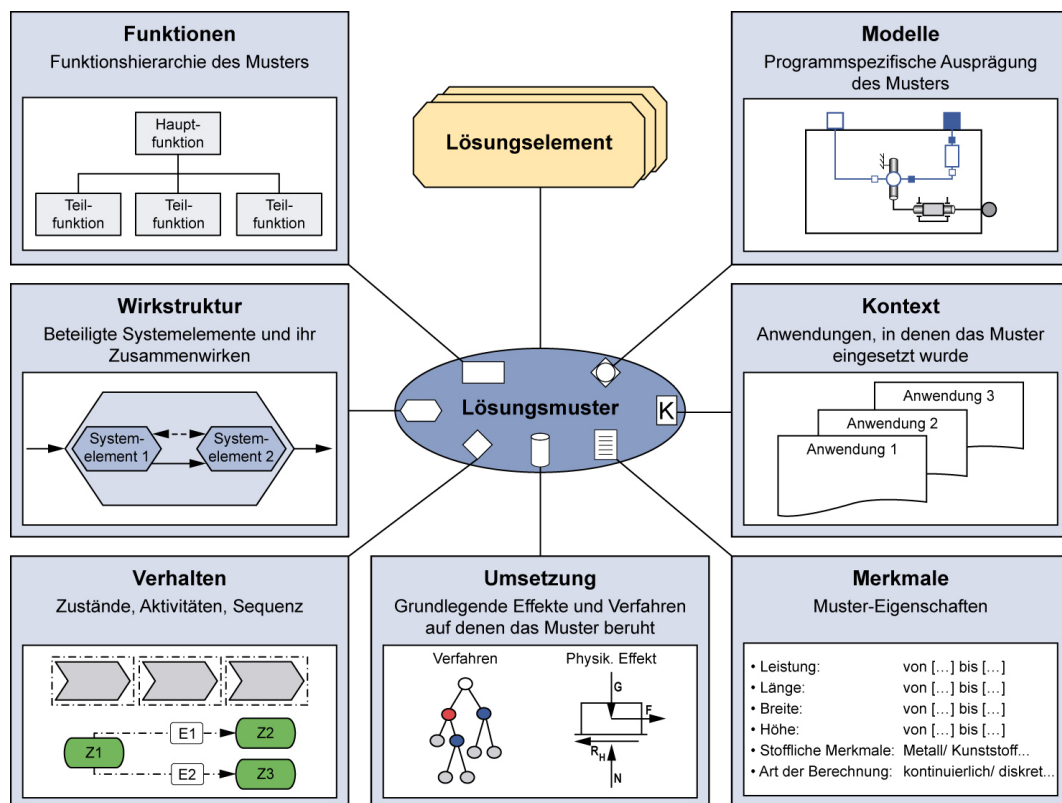


Bild A-1: Einheitliche Spezifikation von Lösungsmustern [ADG+14, S. 125]

Zur semantischen Beschreibung eines Lösungsmusters wurde im Projekt ENTIME eine Ontologie erarbeitet, welche die Produktkonzipierung fokussiert. Die Klassen und Beziehungen der Ontologie sind in Bild A-2 dargestellt. Darin sind ebenfalls die Beziehungen zu weiteren Ontologien gezeigt, die im Projekt ENTIME erarbeitet wurden.

¹ Nach DUMITRESCU wäre die Spezifikation auch mit einer anderen Sprache möglich (vgl. [Dum11, S. 130]).

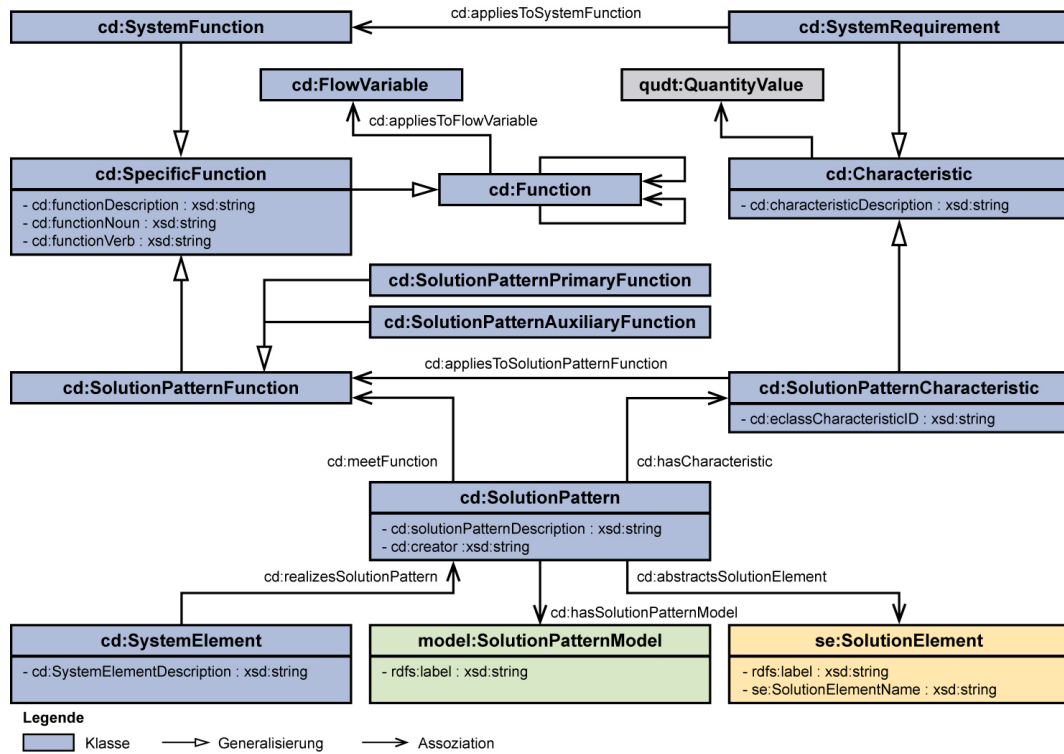


Bild A-2: Ausschnitt der Basis-Ontologie ConceptualDesign [ADG+14, S. 131]

In Bild A-3 ist der generelle Ablauf bei der Suche nach Lösungsmustern visualisiert. Als Planungswerkzeug dient beispielsweise der Mechatronic Modeller. Anhand der spezifizierten Systemfunktionen und Anforderungen werden Anfragen erzeugt und mögliche Lösungsmuster im Semantic Web gesucht. Aus den Teillösungen werden abschließend konsistente Gesamtlösungen erarbeitet und in der Wirkstruktur spezifiziert.

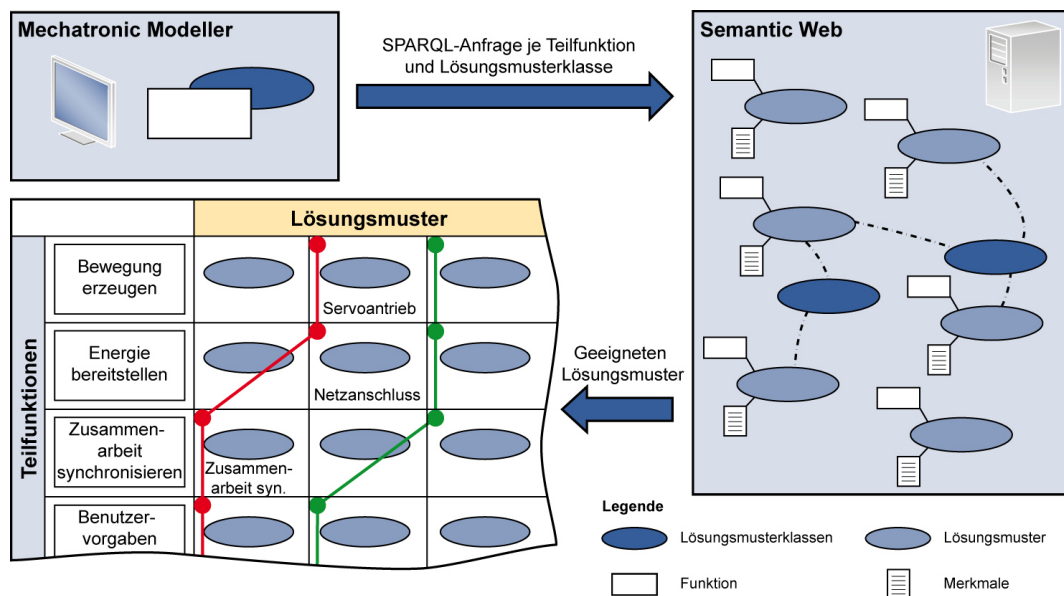


Bild A-3: Detailsuche nach Lösungsmustern [ABG+14, S. 161]

A2 Vorgehensmodelle zur Produktionssystemkonzipierung

A2.1 Vorgehensmodell nach NORDSIEK

Die nachfolgenden drei Bilder zeigen das Vorgehensmodell nach NORDSIEK. Es ist Bestandteil der von ihm entwickelten *Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme*. Die einzelnen Aufgaben und Methoden sind auf die integrative Entwicklung eines mechatronischen Produkts und des zugehörigen Produktionssystems abgestimmt. Sie liefern dennoch ein grundlegendes Vorgehen für die Erarbeitung der unterschiedlichen Aspekte des Produktionssystems.

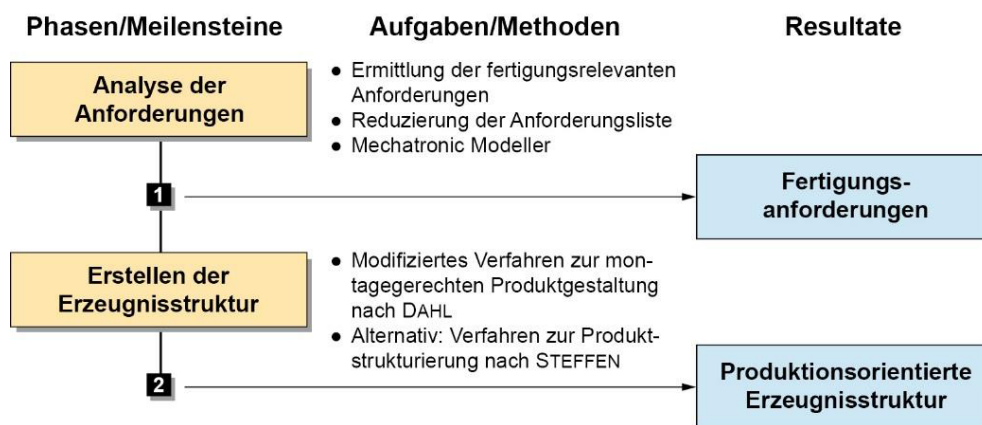


Bild A-4: Vorgehen beim Planen und Klären der Produktionsaufgabe [Nor12, S. 107]

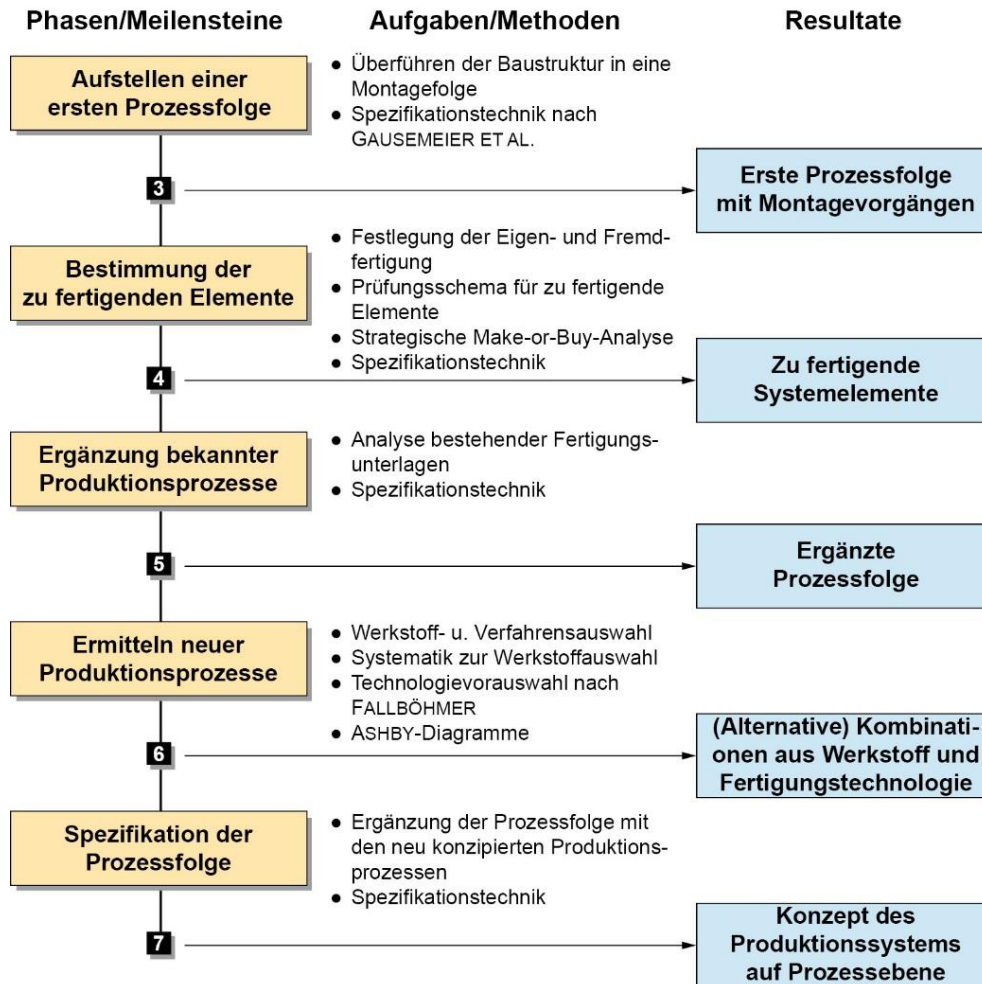


Bild A-5: Vorgehen bei der Konzipierung auf Prozessebene [Nor12, S. 113]

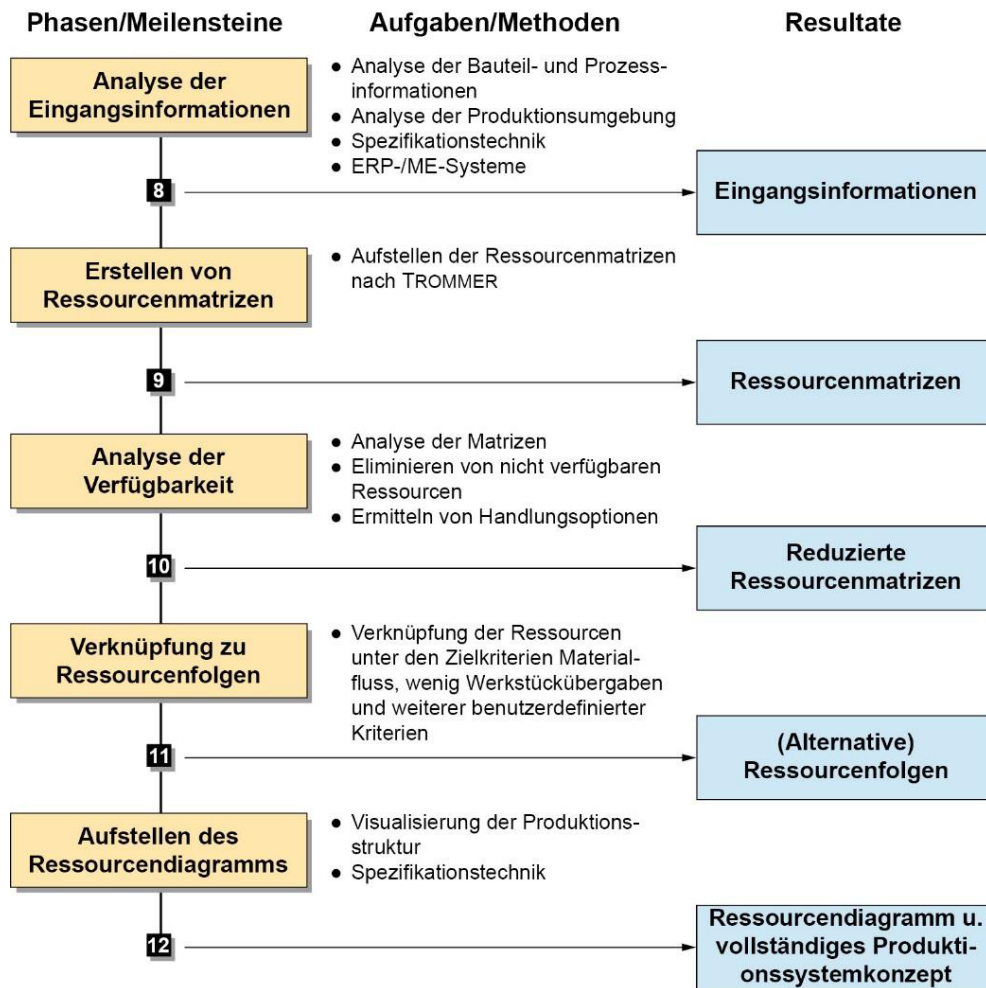


Bild A-6: Vorgehen bei der Konzipierung auf Ressourcenebene [Nor12, S. 132]

A2.2 Vorgehensmodell nach BRANDIS

BRANDIS präsentiert in seiner *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme* ebenfalls ein Vorgehensmodell. Es fokussiert die frühzeitige Montageplanung. In den folgenden Bildern sind die einzelnen Planungsphasen und Aufgaben dargestellt.

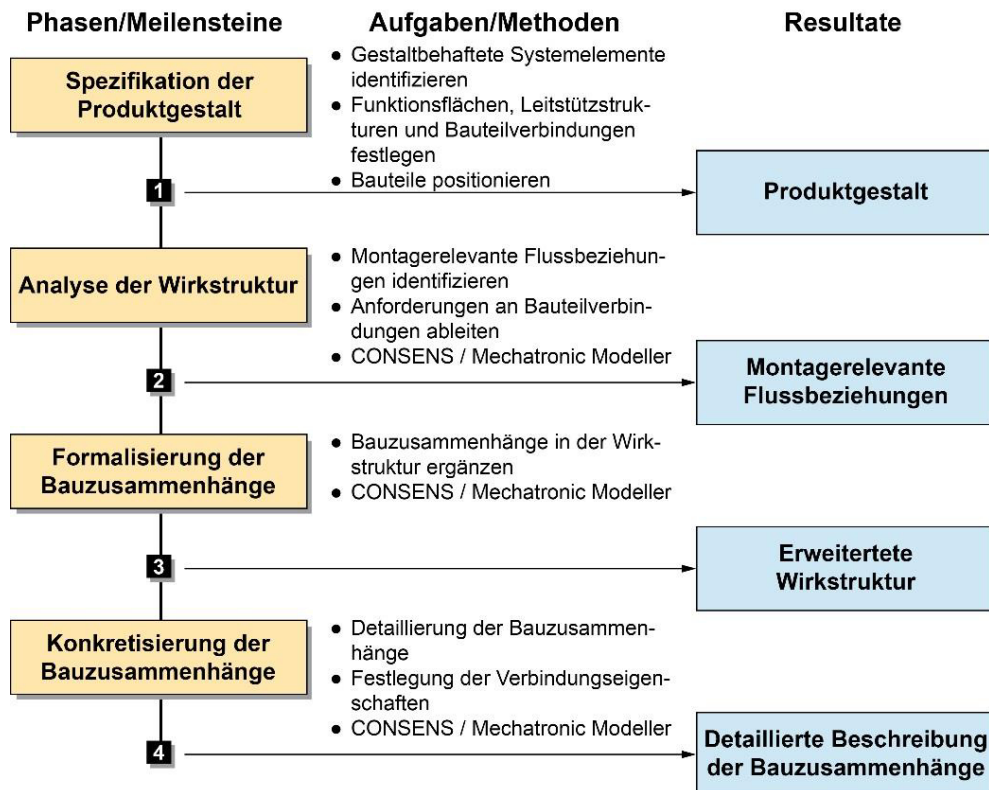


Bild A-7: Vorgehen bei der Konzipierung der Produktgestalt [Bra14, S. 108]

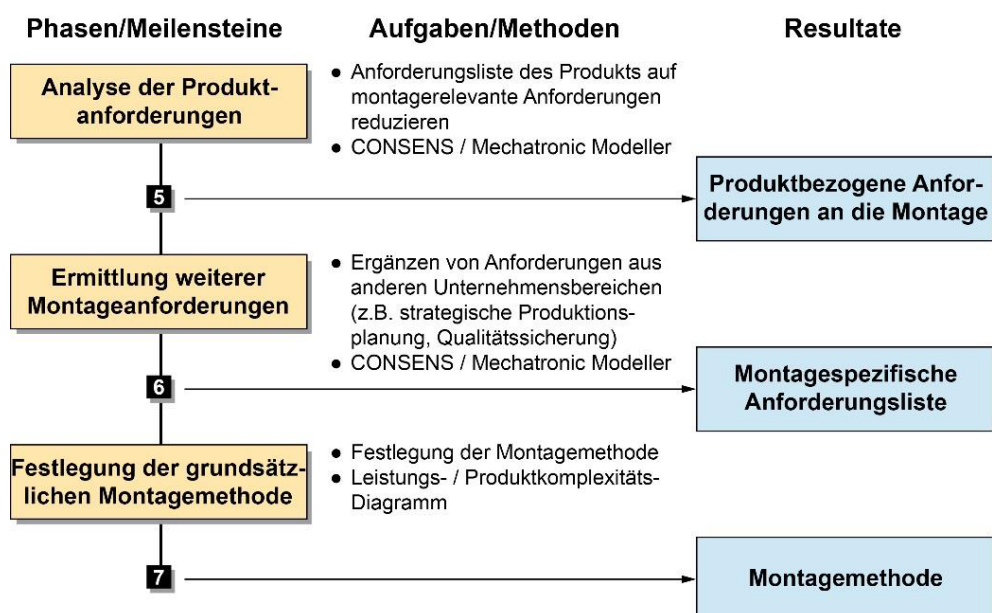


Bild A-8: Vorgehen bei dem Planen und Klären der Aufgabenstellung [Bra14, S. 119]

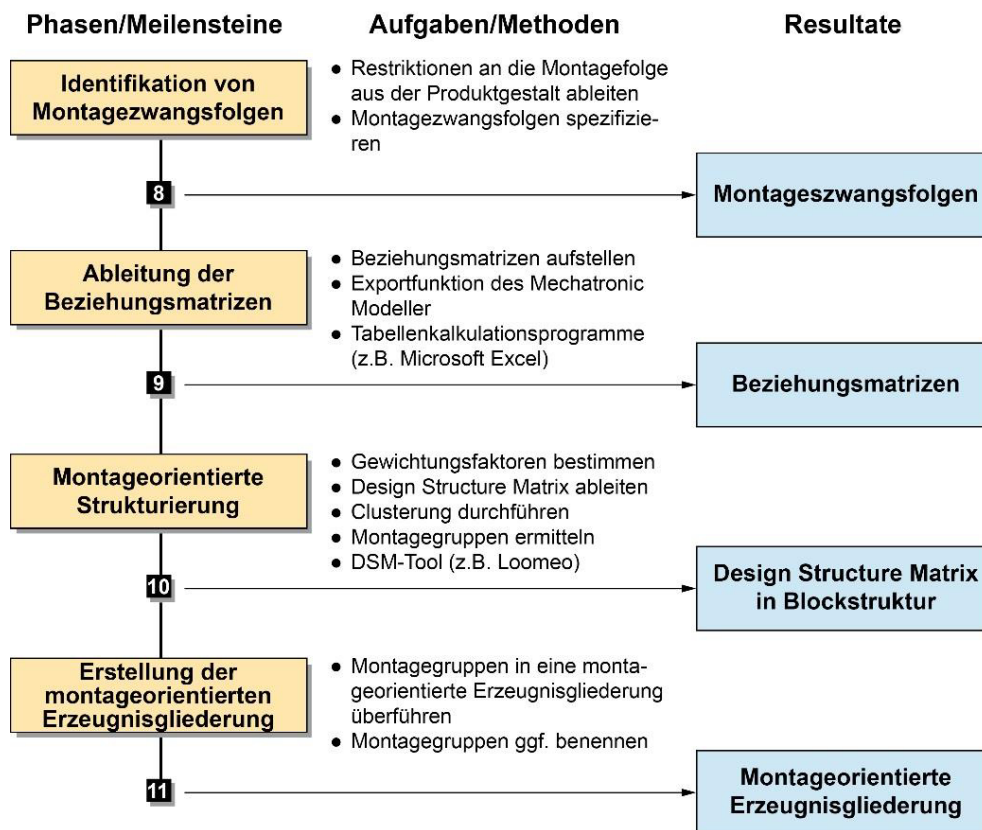


Bild A-9: Vorgehen bei der montageorientierten Produktstrukturierung
[Bra14, S. 124]

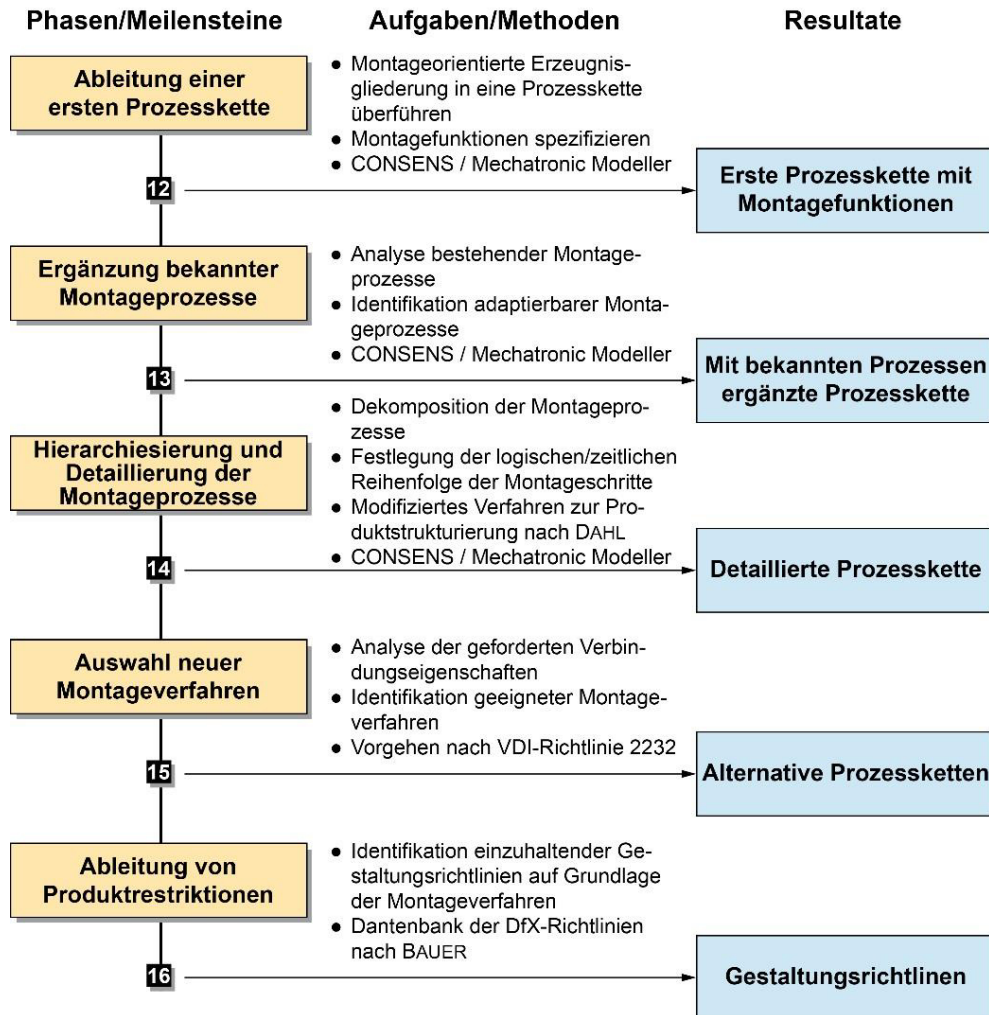


Bild A-10: Vorgehen bei der Konzipierung des Montageprozesses [Bra14, S. 137]

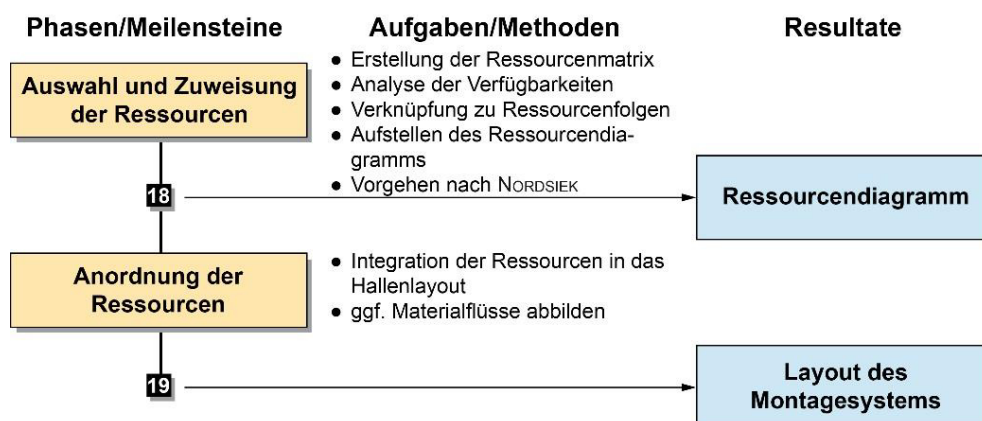


Bild A-11: Vorgehen zur Konzipierung des Montagesystems [Bra14, S. 153]

A3 Ergänzungen zu Kapitel 4

A3.1 Modellierung einer Zahlenwert-Einheit-Kombination

Zur Beschreibung von Eigenschaften bietet die Web Ontology Language zwei Möglichkeiten, *ObjectProperties* und *DatatypeProperties*. Damit lassen sich Beziehungen zwischen zwei Instanzen bzw. einer Instanz und einem konkreten Datenwert abbilden (vgl. Kapitel 2.7.2.2). Informationen über Merkmal, Zahlenwert und Einheit sind prinzipiell über drei separate *DatatypeProperties* modellierbar, die jedoch in keinem logischen Zusammenhang stehen würden. Eine Möglichkeit einem *DatatypeProperty* zusätzliche Informationen zuzuweisen, ist die Verwendung von OWL Annotation Properties. Damit lassen sich an eine Klasse, eine Eigenschaft, eine Instanz oder eine Ontologie beschreibende Angaben annotiert [MH04-ol]. In der MSDL-Ontologie wird dieser Ansatz für manche Eigenschaftsangaben genutzt. Über *rdfs:comment* wird zum Beispiel die Angabe „unit is mm“ für das *DatatypeProperty* *hasLength* festgelegt. Die Interpretation der modellierten Informationen ist Aufgabe des Anwenders oder der verwendeten Software. Durch die Auswertung der String-Angaben muss darauf geschlossen werden, dass es sich um eine Längenangabe in Millimetern handelt. Soll die Länge in Metern anstatt in Millimetern angegeben werden, müsste hierzu ein neues *DatatypeProperty* definiert werden. Für automatische Reasoning-Prozesse werden Annotation Properties zudem nicht berücksichtigt.

A3.2 SPAQRL-Abfragen zur Modellierung

```
PREFIX psc: <http://www.hni.uni-paderborn.de/pe/ProSyCo/ontology#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX qudt: <http://qudt.org/schema/qudt#>

SELECT DISTINCT ?parameter ?property ?quantity_value ?unit
?characteristic ?name ?comment
WHERE {
    psc:Product_42 rdfs:subClassOf* ?class .
    ?class rdfs:subClassOf
        [ a owl:Restriction ;
          owl:onProperty ?parameter_property;
          owl:hasValue ?parameter ] .
    ?parameter rdfs:label ?name .

    OPTIONAL {
        ?parameter rdfs:comment ?comment .
    } .
    # Type of parameter
    ?parameter a psc:QuantityParameter .
    ?parameter_property rdfs:subPropertyOf* psc:hasParameter .
    ?parameter ?property ?object .
    OPTIONAL {
        ?parameter psc:hasCharacteristic ?characteristic .
    } .
    OPTIONAL {
        ?object
            qudt:numericValue ?quantity_value ;
            qudt:unit ?unit .
    } .
}
```

Bild A-12: SPARQL-Anfrage zum Abfragen der quantitativen Parameter

A4 Ergänzungen zu Kapitel 5

A4.1 Konzipierung auf Ressourcenebene

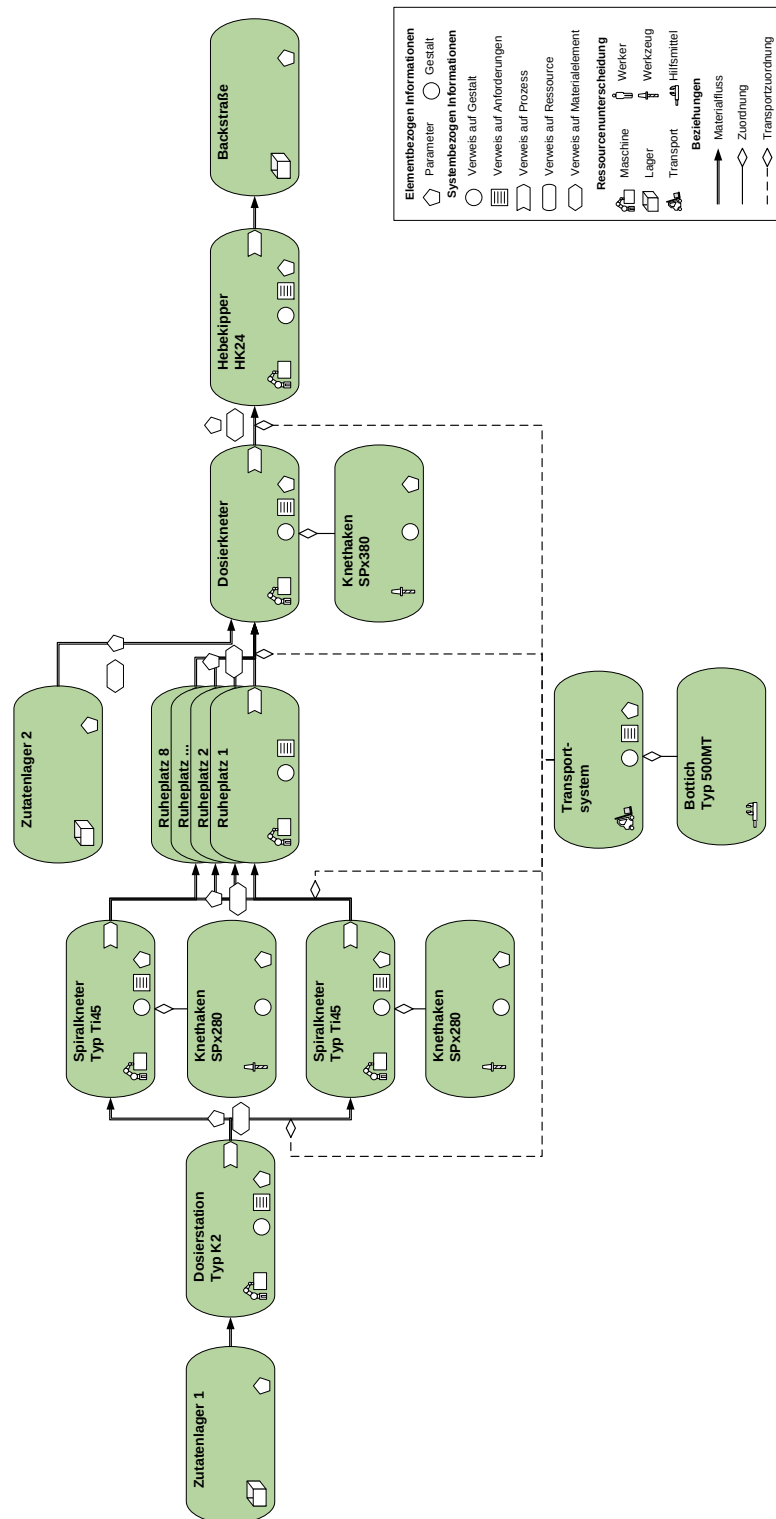


Bild A-13: Vollständige Ressourcenstruktur der Knetstraße

A4.2 Konzipierung auf Gestaltebene

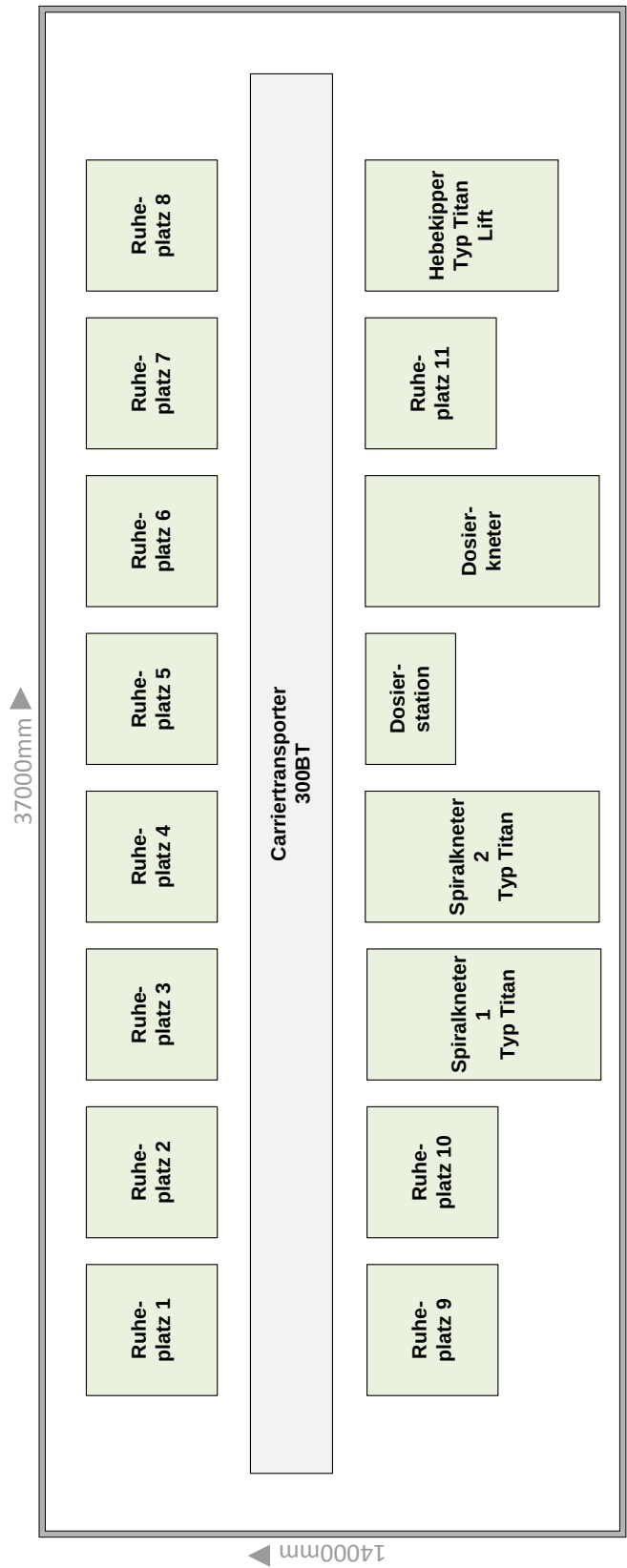


Bild A-14: Initiales Layout der Knetstraße mit allen Ressourcen

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: En-route to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today eight Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- | | |
|--|---|
| <p>Bd. 311 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 311, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-30-4</p> <p>Bd. 312 BENSIEK, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-31-1</p> <p>Bd. 313 KOKOSCHKA, M.: Verfahren zur Konzipierung imitationsgeschützter Produkte und Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 313, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-32-8</p> <p>Bd. 314 VON DETTEN, M.: Reengineering of Component-Based Software Systems in the Presence of Design Deficiencies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 314, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-33-5</p> <p>Bd. 315 MONTEALEGRE AGRAMONT, N. A.: Immunorepairing of Hardware Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 315, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-34-2</p> <p>Bd. 316 DANGELMAIER, W.; KLAAS, A.; LAROQUE, C.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-35-9</p> <p>Bd. 317 PRIESTERJAHN, C.: Analyzing Self-healing Operations in Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 317, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-36-6</p> <p>Bd. 318 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5. und 6. Dezember 2013, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlags-</p> | <p>schriftenreihe, Band 318, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-37-3</p> <p>Bd. 319 GAUSEMEIER, S.: Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 319, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-38-0</p> <p>Bd. 320 GEISLER, J.: Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 320, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-39-7</p> <p>Bd. 321 MÜNCH, E.: Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 321, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-40-3</p> <p>Bd. 322 RENKEN, H.: Acceleration of Material Flow Simulations - Using Model Coarsening by Token Sampling and Online Error Estimation and Accumulation Controlling. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 322, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-41-0</p> <p>Bd. 323 KAGANOVA, E.: Robust solution to the CLSP and the DLSP with uncertain demand and online information base. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 323, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-42-7</p> <p>Bd. 324 LEHNER, M.: Verfahren zur Entwicklung geschäftsmodell-orientierter Diversifikationsstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 324, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-43-4</p> <p>Bd. 325 BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipiöpfung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 325, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-44-1</p> |
|--|---|

Bezugsadresse:
 Heinz Nixdorf Institut
 Universität Paderborn
 Fürstenallee 11
 33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 326 KÖSTER, O.: Systematik zur Entwicklung von Geschäftsmodellen in der Produktentstehung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 326, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-45-8
- Bd. 327 KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstrukturen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-46-5
- Bd. 328 KRÜGER, M.: Parametrische Modellordnungsreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 328, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-47-2
- Bd. 329 AMELUNXEN, H.: Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 329, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-48-9
- Bd. 330 KEIL, R.; SELKE, H. (Hrsg.): 20 Jahre Lernen mit dem World Wide Web. Technik und Bildung im Dialog. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 330, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-49-6
- Bd. 331 HARTMANN, P.: Ein Beitrag zur Verhaltensantizipation und -regelung kognitiver mechatronischer Systeme bei langfristiger Planung und Ausführung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 331, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-50-2
- Bd. 332 ECHTERHOFF, N.: Systematik zur Planung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-51-9
- Bd. 333 HASSAN, B.: A Design Framework for Developing a Reconfigurable Driving Simulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 333, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-52-6
- Bd. 334 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 20. und 21. November 2014, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-53-3
- Bd. 335 RIEKE, J.: Model Consistency Management for Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 335, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-54-0
- Bd. 336 HAGENKÖTTER S.: Adaptive prozessintegrierte Qualitätsüberwachung von Ultraschalldrahtbondprozessen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 336, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-55-7
- Bd. 337 PEITZ, C.: Systematik zur Entwicklung einer produktlebenszyklusorientierten Geschäftsmodell-Roadmap. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 337, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-56-4
- Bd. 338 WANG, R.: Integrated Planar Antenna Designs and Technologies for Millimeter-Wave Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 338, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-57-1
- Bd. 339 MAO, Y.: 245 GHz Subharmonic Receivers For Gas Spectroscopy in SiGe BiCMOS Technology. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 339, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-58-8
- Bd. 340 DOROCIĄK, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5