

*Daniel Köchling*

**Systematik zur integrativen  
Planung des Verhaltens  
selbstoptimierender  
Produktionssysteme**



**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.

Band 382 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2018

ISSN (Print): 2195-5239

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-947647-01-9

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: Daniel Köchling

Hersteller: readbox unipress in der readbox publishing GmbH  
Münster

Printed in Germany



## **Geleitwort**

Die Anforderungen an Unternehmen erhöhen sich kontinuierlich, beispielsweise hinsichtlich Flexibilität und Produktivität. Die Gründe hierfür sind kundenindividuelle Produkte und eine steigende Volatilität der Märkte. Zudem steigt der Kostendruck auf produzierende Unternehmen aufgrund des globalen Wettbewerbs und den damit einhergehenden verkürzten Innovationszyklen. Dementsprechend müssen heute neue Produkte kundenindividuell, mit einer geringen Markteintrittszeit und kostengünstig verfügbar sein. Dies resultiert in stark verkürzten Entwicklungszeiträumen für komplexe Produkte und der zugehörigen Produktionssysteme. In diesem dynamischen Umfeld müssen Produktionssysteme zudem in der Lage sein, hoch flexibel auf sich ändernde Rahmenbedingungen zu reagieren. Ein Lösungsansatz in diesem Kontext stellt ein selbstoptimierendes Produktionssystem dar. Ein derartiges Produktionssystem ist in der Lage, die vorliegende Situation zu analysieren, seine Ziele zu modifizieren und sein Verhalten gemäß der modifizierten Ziele anzupassen.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Köchling eine Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme entwickelt. Die Systematik unterstützt die Beteiligten bei der Konzipierung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Sie beinhaltet ein detailliertes Vorgehensmodell zur Strukturierung der einzelnen Arbeitsschritte, Methoden und Werkzeuge zur Lösung von Teilaufgaben sowie eine Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells des Produktionssystems. Veranschaulicht wird die Systematik durch die Erläuterung der Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystems für eine kundenindividualisierte Taschenlampe. Die Arbeit beruht auf Ergebnissen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“.

Mit seiner Dissertation bewegt sich Herr Köchling auf einem sehr herausfordernden und aktuellen Gebiet. Die von ihm entwickelte Systematik schließt die Lücke zwischen der Produktkonzipierung und einer selbstoptimierenden Produktion. Sie liefert somit einen wichtigen Beitrag für die Paderborner Schule des Entwurfs intelligenter technischer Systeme.



# **Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme**

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

genehmigte  
DISSERTATION

von  
*Dipl.-Ing. Daniel Köchling*  
aus *Geseke*

Tag des Kolloquiums: 21. Dezember 2017  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier  
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner Forschungsarbeit im Cluster-Querschnittsprojekt „Selbstoptimierung“ des BMBF-Spitzenclusters „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it's OWL).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, der meine Art zu Denken und zu Handeln nachhaltig positiv geprägt hat. Die strukturierte Arbeitsweise, die ich in der Zeit in der Fachgruppe Strategische Produktplanung und Systems Engineering erlernen durfte, hat dieses Dokument erst ermöglicht. Ich möchte ihm insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen danken und die Möglichkeit als Teamleiter stets selbstständig und gestaltend agieren zu dürfen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Mechatronik vom Heinz Nixdorf Institut danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte im Kontext Systems Engineering und Selbstoptimierung.

Den ehemaligen Kollegen der Fachgruppe und den Kollegen von Fraunhofer möchte ich für die tolle Zusammenarbeit und die gemeinsamen Erlebnisse danken. Insbesondere danke ich den Kollegen aus dem IP-Team: Frank Bauer, Rinje Brandis, Tobias Mittag, Marcus Petersen, Gerald Rehage, Vinzent Rudtsch, Jörg Schaffrath und Marcel Schneider. Die vielen tollen Erlebnisse mit ihnen im Institut, in Mochlos und neben der Arbeit möchte ich nicht missen. Hervorheben möchte ich zudem Peter Iwanek, Marcus Petersen und Vinzent Rudtsch, meine Garanten für eine schöne Zeit, während der Arbeit im Institut und bis heute. Vielen Dank für die Unterstützung, nicht zuletzt durch die vielen wissenschaftlichen Diskussionen in den letzten Monaten.

Ich möchte zudem den Studierenden danken, die mich während der Zeit am Heinz Nixdorf Institut unterstützt haben. Stellvertretend für alle anderen möchte ich mich an dieser Stelle bei Robert Joppen, Joel Schlüssler und Yvonne Ulke bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Dorothea und Siegfried. Ohne ihre großartige Unterstützung wäre mein Werdegang nicht möglich gewesen. Meinem Großvater Theodor († 2002) möchte ich an dieser Stelle ebenfalls meinen Dank aussprechen, er hat mich in vielen Stunden in der Schmiede maßgeblich für Technik begeistert. Meiner Frau Tanja gebührt mein größter Dank. Sie hat mir stets den Rücken freigehalten und mich immer wieder motiviert. Vielen Dank!



## Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [GIK12] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.: Das Produktionssystem der Zukunft denkt mit und lernt. In: *Industrieanzeiger*, Band 30, S. 68-69. Konradin Verlag, 2012
- [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*, 11. - 13. March 2013. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- [BGH+13] BIERMANN, D.; GAUSEMEIER, J.; HESS, S.; KÖCHLING, D.; PETERSEN, M.; WAGNER, T.: Foundations for Considering the Robustness within the CRC TRR 30. In: HEIM, H.-P.; BIERMANN, D.; HOMBERG, W. (Hrsg.): *Functionally graded materials in industrial mass production*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013
- [KGI+13] KESSLER, J. H.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; KRÜGER, M.; TRÄCHTLER, A.: Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen. In: *Internationales Forum Mechatronik 2013*, 30. - 31. Oktober 2013, Winterthur, 2013
- [MGG+14] MITTAG, T.; GAUSEMEIER, J.; GRÄBLER, I.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; PETERSEN, M.: Conceptual Design of a Self-Optimising Production Control System. In: *International Conference on Digital Enterprise Technology*, March 25. - 28. 2014, Stuttgart, Germany, 2014
- [KG14] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.: Approach for the Realization of a Self-Optimizing Production System, In: *BIT's 3rd Annual World Congress of Emerging InfoTech*, June 19. - 21. 2014, Dalian, China, 2014
- [PGK+15] PETERSEN, M.; GAUSEMEIER, J.; KÖCHLING, D.; SCHNEIDER, M.; WELLPOTT, M.: Industrie 4.0 – Dezentralisierung bestehender Produktionssysteme durch kostengünstige Einplatinenrechner. In: *24. Deutscher Materialfluss-Kongress*, 26. - 27. März 2015, Düsseldorf, 2015
- [KGJ+16] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.; MITTAG, T.: Design of a self-optimising production control system. In: *International Design Conference- DESIGN 2016*, May 16 - 19 2016, Dubrovnik, Croatia, 2016
- [KBS+16] KÖCHLING, D.; BERSSENBRÜGGE, J.; SCHLÜSSLER, J.; STÖCKLEIN, J.: Intelligent Production System Planning with Virtual Design Reviews. In: *3rd International Conference on Systemintegrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, Sys-Int 2016*, June 13 - 15 2016, Paderborn, Germany, 2016
- [KGJ18] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.: Verbesserung von Produktionssystemen. In: *Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme - Selbstoptimierung in der Anwendung – Intelligente technische Systeme - Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL*. Springer Verlag, 2018 (in Druck)



## **Zusammenfassung**

Globale und volatile Märkte sowie kürzere Produktlebenszyklen zwingen produzierende Unternehmen in einen globalen Wettbewerb mit steigendem Kostendruck. Aktuell entscheiden eine hohe Flexibilität und eine schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen über den Erfolg dieser Unternehmen. Einen Lösungsansatz den Herausforderungen in der Produktion zu begegnen stellt das Wirkparadigma der Selbstoptimierung dar. Selbstoptimierung erlaubt es der Produktion auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren und das Produktionssystemverhalten autonom anzupassen.

Dem resultierenden Anstieg der Komplexität moderner Erzeugnisse als auch deren Herstellprozesse muss mit einer frühzeitigen integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem entgegengewirkt werden. Gegenstand dieser Arbeit ist daher eine *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme*. Die Systematik gliedert sich in drei Bestandteile: Einem detaillierten Vorgehensmodell, das die einzelnen Arbeitsschritte strukturiert, einer Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells des Produktionssystems sowie Methoden und Werkzeuge zur Lösung von Teilaufgaben wie der Ermittlung von Kunden- und Auftragsprioritäten und der Simulation der selbstoptimierenden Produktion.

## **Summary**

Global and volatile markets as well as shorter product life cycles are forcing companies to enter a global competition with increasing cost pressure. Currently, high flexibility and a fast response to customer requirements determine the success of these companies. One approach to face the challenge of the production is the paradigm of self-optimization. Self-optimization allows to react to unforeseen events in the production and adapt the production system behavior autonomously.

The resulting increase in the complexity of modern products as well as their manufacturing processes must be countered by an early, conceptual design of the product and the production system. The subject of this thesis is therefore a *Design Framework for the Conceptual Design of the Behavior of self-optimizing Production Systems*. The design framework consists of three essential components. A detailed procedure model which defines the structure of the separate work steps, a provision to describe the behavior model of the production system as well as methods and tools for solving partial tasks such as the determination of customer- and order-priorities and the simulation of the self-optimizing production.



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1 Einleitung.....	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise .....	4
2 Problemanalyse.....	5
2.1 Begriffsbestimmung .....	5
2.1.1 System.....	5
2.1.2 Systematik .....	6
2.1.3 Konzipierung und Entwurf.....	6
2.1.4 Produktion, Fertigung und Produktionssystem.....	7
2.1.5 Verhalten.....	9
2.1.6 Ziel .....	9
2.1.7 Modell und Simulation.....	10
2.2 Produktentstehungsprozess nach Gausemeier .....	10
2.3 Integrative Produkt- und Produktionssystemkonzipierung .....	13
2.3.1 Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystemen .....	13
2.3.2 Spezifikationstechnik CONSENS .....	16
2.3.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	20
2.4 Arbeitsplanung .....	21
2.4.1 Arbeitsablaufplanung .....	22
2.4.2 Arbeitsstättenplanung .....	24
2.4.3 Materialflussplanung (Produktionslogistik).....	25
2.4.4 Arbeitsmittelplanung.....	26
2.4.5 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	27
2.5 Digitale Fabrik .....	27
2.5.1 Definition und Nutzen.....	28
2.5.2 Simulationsstudien.....	30
2.5.3 Operativer Einsatz .....	32
2.5.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	33
2.6 Auftragsabwicklungsprozess.....	33
2.6.1 Produktionsplanung und -steuerung (PPS).....	34
2.6.2 Manufacturing Execution System (MES).....	35
2.6.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	36

---

2.7	Selbstoptimierende Systeme .....	37
2.7.1	Grundlagen eines selbstoptimierenden Systems .....	37
2.7.2	Selbstopтимierungsprozess .....	39
2.7.3	Aspekte der S.O. und Struktur der Informationsverarbeitung..	41
2.7.4	Selbstopтимierung im Kontext der Produktion .....	43
2.7.5	Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	45
2.8	Problemabgrenzung.....	46
2.9	Anforderungen .....	50
3	Stand der Technik .....	53
3.1	Integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung .....	53
3.1.1	Systematik zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme nach NORDSIEK .....	53
3.1.2	Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung nach BAUER .....	55
3.2	Ansätze der Verhaltensspezifikation .....	56
3.2.1	Verhaltensspezifikation in CONSENS.....	56
3.2.2	Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS).....	58
3.2.3	Systems Modeling Language.....	60
3.2.4	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse .....	61
3.3	Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion .....	63
3.3.1	Methodik einer selbstoptimierenden Produktionssteuerung nach LAU .....	63
3.3.2	Gestaltungskonzept zur selbstoptimierenden Regelung der Materialdisposition in der Beschaffung nach BAUHOFF.....	64
3.3.3	Leitfaden zur Implementierung der echtzeitfähigen Produktionsplanung und -regelung nach MEIER.....	66
3.4	Definitionen von Zielsystemen .....	67
3.4.1	Betriebswirtschaftliches Zielsystem .....	67
3.4.2	Zielsystem der Produktionslogistik.....	69
3.4.3	Zielsystem der Auftragseinlastung nach KOMPA.....	70
3.4.4	Zielsystem selbstoptimierender Systeme nach POOK .....	72
3.4.5	Zielsystem der Produktion nach KRAMER .....	74
3.5	Anwendungssysteme .....	76
3.5.1	Customer Relationship Management (CRM) .....	76
3.5.2	Plant Simulation (Siemens PLM Software) .....	77
3.6	Bewertung und Handlungsbedarf.....	80
4	Anwendungsbeispiel.....	85

---

5	Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens s.o.	
	Produktionssysteme .....	89
5.1	Vorgehensmodell .....	89
5.2	Statisches Produktionssystem konzipieren .....	92
5.2.1	Planen und Klären der Aufgabe .....	92
5.2.2	Konzipierung der Prozesse .....	94
5.2.3	Konzipierung der Ressourcen .....	97
5.2.4	Detaillierung der Grundstruktur .....	100
5.3	Aktuelle Produktion analysieren .....	101
5.3.1	Produktportfolio analysieren .....	102
5.3.2	Alternative Ressourcen identifizieren .....	103
5.4	Produktionssystemverhalten konzipieren .....	106
5.4.1	Konzipierung der Ablaufprozesse .....	107
5.4.2	Konzipierung des Grundmodells des Verhaltens .....	110
5.4.3	Erweiterung des Verhaltens um Funktionen zur Selbstoptimierung .....	115
5.4.4	Definition und initiale Gewichtung des Zielsystems .....	120
5.5	Kundenbeziehungen und Auftragslage analysieren .....	126
5.5.1	Kundenpriorität ermitteln .....	127
5.5.2	Auftragspriorität ermitteln .....	130
5.5.3	Kunden- und Auftragspriorität ableiten und voraussagen .....	133
5.6	Selbstoptimierendes Produktionssystem modellieren .....	135
5.6.1	Simulationsmodell strukturieren .....	136
5.6.2	Simulationsmodell detaillieren .....	139
5.6.3	Operative Umsetzung definieren .....	142
5.7	Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen .....	144
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	147
7	Abkürzungsverzeichnis .....	151
8	Literaturverzeichnis .....	153

**Anhang**

A1	Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel.....	A-1
A2	Ergänzungen zur statischen P.S.-Konzipierung .....	A-3
A3	Ergänzungen zur Konzipierung des P.S.-Verhalten .....	A-10
A4	Ergänzungen zur Analyse von Kundenbeziehungen und Auftragslage ..	A-18

# 1 Einleitung

*„Nur wenige wissen, wie viel man wissen muss, um zu wissen, wie wenig man weiß!.“*

– JOHANN MARTIN GEHRING

Die vorliegende Arbeit ist im Cluster-Querschnittsprojekt „Selbstoptimierung“ des BMBF-Spitzenclusters „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it’s OWL) entstanden. Im Cluster-Querschnittsprojekt „Selbstoptimierung“ werden Unternehmen unterstützt, Selbstoptimierung in technische Systeme zu integrieren. Das Ziel ist ein Instrumentarium, das Methoden und Verfahren der Selbstoptimierung anwendergerecht bereitstellt. Die enge Kooperation zwischen Forschung und Praxis im BMBF-Spitzencluster it’s OWL ermöglicht es, die Methoden und Verfahren permanent weiterzuentwickeln und parallel auf die Bedürfnisse der Unternehmen anzupassen. Die vorliegende *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme* schließt die Lücke zwischen der Produktkonzipierung und einer selbstoptimierenden Produktion und liefert einen Beitrag zu dem Instrumentarium.

Im Rahmen der Einleitung werden in Kapitel 1.1 und in Kapitel 1.2 die Problematik und die Zielsetzung der Arbeit dargestellt. Kapitel 1.3 gibt einen Überblick zum Aufbau der Arbeit.

## 1.1 Problematik

Produzierende Unternehmen stehen insbesondere durch die Steigerung der Volatilität und der Globalität der Märkte aktuell vor Herausforderungen. Bedingt durch den resultierenden globalen Wettbewerb werden Innovationszyklen verkürzt und der Kostendruck auf produzierende Unternehmen wächst [Bre15, S. 1]. Neue Produkte müssen heute innerhalb einer minimalen Markteintrittszeit kundenindividuell verfügbar sein. Die Folge sind verkürzte Zeiträume zur Entwicklung komplexer Produkte als auch zur Entwicklung der Herstellprozesse [AR11, S. 34]. Zudem müssen kundenindividuelle Produkte zu ähnlichen Herstellkosten produziert werden wie Massenprodukte [Bre15, S. 1]. Vor diesem Hintergrund sowie aufgrund der steigenden Komplexität und Qualitätsanforderungen erhöht sich der Zeit- und Innovationsdruck für Unternehmen insbesondere im Rahmen der Produkt- und Produktionssystementwicklung [GLR+00, S. 12].

Heutige Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus zeichnen sich durch eine Kombination von mechanischen, elektronischen, regelungstechnischen und softwaretechnischen Komponenten aus. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck [GLL12, S.13].

---

<sup>1</sup> vgl. [Geh19, S. 90]

Das Intelligente Technische System<sup>2</sup> (ITS) der Zukunft weist in Ergänzung zur Funktionsweise eines mechatronischen Systems eine inhärente Teilintelligenz auf. Intelligente Systemelemente mit kognitiven Funktionen sind bspw. in der Lage das Verhalten zu koordinieren oder aus ihren Erfahrungen zu lernen. Ein ITS wird durch die vier Eigenschaften adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich charakterisiert [DJG12, S. 24f.]. Basierend auf dieser neuartigen Funktionsweise stehen die Begriffe „*Cyber-Physical Systems*“, „*Industrie 4.0*“, „*Internet der Dinge*“ und „*Selbstoptimierung*“ für Intelligente Technische Systeme [GRS14, S. 4].

Ein Lösungsansatz, der Komplexität in der Produktentstehung mechatronischer Produkte zu begegnen, ist die integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem. Hierbei ergibt sich eine wesentliche Forderungen in der Produktionssystementwicklung. Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem muss bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung erfolgen [VDI2206, S. 41]. Denn der Aufwand und die Kosten für Änderungen im Produktentstehungsprozess steigen mit dem Projektfortschritt exponentiell an [RLH96, S. 71]. Die Beeinflussbarkeit der Produkteigenschaften sinkt zudem von Phase zu Phase [Gau10, S. 39]. Die sich ergebende Komplexität Intelligenter Technischer Systeme führt zu neuen Anforderungen im Entwurf dieser Systeme. Daher sind neue leistungsfähige Entwurfstechniken erforderlich, um diesen entgegenzuwirken [GDS13, S. 17].

In der Betriebsphase der Produktion ist die hohe Flexibilität und insbesondere die schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen ein zentraler Erfolgsfaktor der Produktion von KMU<sup>3</sup> als auch von Großunternehmen [aca16, S. 13f.]. Das Wirkparadigma der Selbstoptimierung stellt insbesondere im Bereich Produktionslogistik ein hohes Nutzenpotential dar [Bre11, S. 797]. Ein konkretes Beispiel für den Einsatz von Selbstoptimierung im Kontext der Produktion ist die Abwägung zwischen Ausführungsgeschwindigkeit und Ressourceneinsatz, bspw. bei einem Eilauftrag. Hierzu muss das Produktionssystem in der Lage sein, die aktuelle Anwendungssituation zu kennen, die Anforderungen zu gewichten und sein Verhalten dementsprechend anzupassen [ADG+09, S. 1]. Um diesem Vorgehen gerecht zu werden, muss der Fokus auf das Verhalten der Produktion gerichtet werden. Neben der Fertigungssteuerung, die maßgeblich das Verhalten der Fertigung (Herstellprozesse) bestimmt, müssen weitere Aspekte betrachtet werden, um korrekte Entscheidungen in der vorliegenden Anwendungssituation der Produktion treffen zu können. Hierzu zählen z. B. die Ziele des Unternehmens oder auch die Relevanz der Kunden für das Unternehmen.

---

<sup>2</sup> Der Begriff Intelligentes Technisches System bezeichnet sowohl Produkte als auch Produktionssysteme.

<sup>3</sup> KMU: kleine und mittlere Unternehmen mit 0 bis 250 Beschäftigten

Die integrative Entwicklung des Produktes und des zugehörigen Produktionssystems zeigt sich als effektives Instrument qualitativ hochwertige Produkte in kurzen Zeitintervallen zu entwickeln und zu produzieren. Der Detaillierungsgrad der Modelle reicht jedoch in einigen Fällen (z. B. Bewertung der Ressourceneffizienz) nicht aus, um notwendige Details einer realen Produktion abzubilden [GLL12, S. 256ff.]. Die Erschließung der Potentiale der Selbstoptimierung im Bereich der Produktion verlangt jedoch die detaillierte Betrachtung der dynamischen Abläufe und der Ziele der Produktion sowie der Gewichtung von Kunden. Dies erfordert ein systematisches Vorgehen, das die Planung dieser Informationen in Form des Verhaltens der Produktion betrachtet und geeignete Modelle bereitstellt.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme. Sie unterstützt den Planer<sup>4</sup> bei der Konzeptionierung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Der Ausgangspunkt der Systematik ist die Prinziplösung des Produktes. Dementsprechend ordnet sich die Systematik in die integrative Produkt- und Produktionssystemkonzipierung mechatronischer Systeme ein. Das Produktionssystem führt hierbei wertschöpfende Prozesse (bspw. Fertigung) und assoziierte Prozesse (bspw. Lagerung) des Fertigungsbetriebs zur Herstellung des Produktes aus. Es unterteilt sich u.a. in Fertigungssysteme, Montagesysteme und Transportsysteme.

Den Kern der Systematik bildet ein Vorgehensmodell, das die durchzuführenden Tätigkeiten bei der Produktionssystemplanung detailliert beschreibt. Es steuert den Einsatz der Methoden und Werkzeuge und beschreibt notwendige Ein- und Ausgangsinformationen im Planungsprozess.

Ein Verhaltensmodell des Produktionssystems ermöglicht die Konzipierung und Spezifikation des Verhaltens des Produktionssystems. Es dient als Basis für die Erstellung von Materialflusssimulationsmodellen zur Abbildung des Verhaltens in Form von Steuerungsmethoden. Ergänzend werden Lösungen zur Berücksichtigung von Unternehmensspezifika erarbeitet. Hierzu gehören Kundendaten, die aktuelle Situation der Produktion und die Gewichtung von Zielen. Auf Basis dieser Datengrundlage wird der Planer in die Lage versetzt, die Konzeption der selbstoptimierenden Produktion unternehmensspezifisch zu erarbeiten.

---

<sup>4</sup> 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 (z. B. Planer) für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weibliche Form wird dabei stets mitgedacht.

### 1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird die aufgezeigte Problematik detailliert beschrieben. Zunächst werden hierzu die wesentlichen Begriffe für diese Arbeit erläutert und im Kontext der Arbeit definiert, falls dies erforderlich ist. Im Folgenden wird das allgemeine Vorgehen zur Entwicklung von Produktionssystemen betrachtet. Hierbei wird die integrative Produktionssystemkonzipierung beschrieben, sowie die Arbeitsplanung mit den zugehörigen Fachgebieten. Des Weiteren wird die Digitale Fabrik zur Unterstützung der Produktionssystementwicklung vom Entwurf bis zur Serienfertigung erläutert. Anschließend wird der Auftragsabwicklungsprozess im Rahmen der Produktion betrachtet und das Wirkparadigma der Selbstoptimierung vorgestellt. Das Kapitel wird mit einer Problemabgrenzung und der Ableitung der Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik abgeschlossen.

Die Beschreibung des Stands der Technik erfolgt in **Kapitel 3**. Es werden Vorgehensweisen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem sowie Beschreibungsformen zur Verhaltensspezifikation in diesem Kontext diskutiert. Des Weiteren werden Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion, mögliche Abbildungsformen von Zielsystemen und Anwendungssysteme analysiert. Abschließend wird der Handlungsbedarf abgeleitet indem die untersuchten Ansätze mit den ermittelten Anforderungen abgeglichen werden.

In **Kapitel 4** wird das Anwendungsbeispiel Taschenlampe sowie der fiktive Leuchtmittelhersteller SPSE-Lights vorgestellt. Die entwickelte Systematik wird am Beispiel dieses Demonstrators vorgestellt.

Gegenstand von **Kapitel 5** ist die detaillierte Beschreibung der *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme*. Einleitend werden die Phasen, Aufgaben und Resultate der Systematik in Form des erarbeiteten Vorgehensmodells vorgestellt. Im Folgenden werden die Phasen Statisches Produktionssystem konzipieren, Aktuelle Produktion analysieren, Produktionssystemverhalten konzipieren, Kundenbeziehungen und Auftragslage analysieren und Selbstoptimierendes Produktionssystem modellieren im Detail erläutert. Der Demonstrator dient hierbei als durchgängiges Beispiel zur besseren Nachvollziehbarkeit der Systematik. Abschließend wird die Systematik gegen die in Kapitel 2 abgeleiteten Anforderungen bewertet.

**Kapitel 6** fasst abschließend die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten. Der **Anhang** umfasst ergänzende Informationen und Abbildungen.

## 2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse ist die Identifikation der Anforderungen an die *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme*. In Kapitel 2.1 werden zunächst die wichtigsten Begriffe dieser Arbeit bestimmt. Nachfolgend wird der Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER in Kapitel 2.2 erläutert und die zu entwickelnde Systematik in diesen eingeordnet. Kapitel 2.3 dient der Erläuterung der integrativen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung. Die Konkretisierung des Produktionssystemkonzeptes wird in Kapitel 2.4 im Rahmen des Begriffes der Arbeitsplanung erläutert. Ein wesentlicher Aspekt der Produktionssystementwicklung ist die Verwendung digitaler Modelle im Kontext der Digitalen Fabrik (Kapitel 2.5). Kapitel 2.6 erläutert das Vorgehen und die eingesetzten Systeme im Auftragsabwicklungsprozess. In Kapitel 2.7 wird das Wirkparadigma der Selbstoptimierung dargestellt und deren Nutzenpotentiale im Bereich der Produktion aufgezeigt. Die Problemabgrenzung wird in Kapitel 2.8 beschrieben. Abschließend werden in Kapitel 2.9 die Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik abgeleitet.

### 2.1 Begriffsbestimmung

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Begriffe für das Verständnis der Arbeit kurz erläutert. Falls erforderlich, werden diese im Kontext der Arbeit definiert.

#### 2.1.1 System

Aufgrund stark ansteigendem Wissen, einer hohen Vielfalt von technischen Produkten und den komplexen Systemen, in denen sie eingebettet sind, entstand die Systemtechnik. EHRENSPIEL und MEERKAMM definieren in diesem Gebiet ein System wie folgt:

*„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)“ [EM13, S. 21].*

Ein System erhält eine Struktur, wenn die Elemente des Systems Beziehungen haben. Bei einer vollständigen Darstellung sind folgende Bestandteile eines Systems sichtbar: Elemente (Teilsysteme), Systemgrenze, Systemumgebung, Beziehungen (Relationen), Ein- und Ausgangsgrößen sowie Eigenschaften. Die abstrakteste Darstellung eines Systems ist eine sog. „Black Box“. Sie stellt lediglich die Ein- und Ausgangsgrößen dar, die Struktur des Systems ist nicht erkennbar. Diese vereinfachte Form der Darstellung kann erforderlich sein, um leichter Alternativlösungen zu finden [EM13, S. 22]. Im Rahmen der Arbeit wird unter dem Begriff System sowohl ein Produkt als auch ein Produktionssystem verstanden.

### 2.1.2 Systematik

Eine **Systematik** ist laut DUDEN im Rahmen der Bildungssprache eine „*planmäßige Darstellung, einheitliche Gestaltung*“ bzw. in der Biologie die „*Wissenschaft von der Vielfalt der Organismen mit ihrer Erfassung in einem System*“ [Dud12, S. 1043], [Dud16-ola].

In der Produktentwicklung wurde der Begriff der **Konstruktionssystematik** erstmals von BISCHOFF, BOCK und HANSEN in den fünfziger Jahren geprägt [PBF+05, S. 23]. Demnach ist dies: „*das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkenntnisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes*“ [Han55, S. 36]. Auf dieser Basis definiert DUMITRESCU eine **Entwicklungssystematik** als:

*„...ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung des Anwenders. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken/Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein“ [Dum11, S. 6].*

Die vorangestellte Definition nach DUMITRESCU wird in der vorliegenden Arbeit verwendet. Dementsprechend umfasst die zu entwickelnde Systematik ein **Vorgehensmodell**, welches den Planungsprozess strukturiert und **dedizierte Hilfsmittel** zur integrativen Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems.

### 2.1.3 Konzipierung und Entwurf

**Konzipierung** und **Entwurf** sind neben **Aufgabe klären** und **Ausarbeiten** die Phasen des Konstruktionsprozesses. Der Prozess der Konstruktion hat ein wesentliches Ziel: Ein qualitativ hochwertiges Produkt zu charakterisieren, das den Wünschen und Forderungen des Nutzers eines Produktes und des Marktes entspricht [EM13, S. 257f.]. PAHL / BEITZ definieren Konzipieren wie folgt:

*„Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der nach Klären der Aufgabenstellung durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in einer Wirkstruktur die prinzipielle Lösung festlegt. Das Konzipieren ist die prinzipielle Festlegung einer Lösung“ [PBF+05, S. 171].*

Die Prinziplösung ist das Ergebnis der Phase der Konzipierung [EM13, S. 263f.], [PBF+05, S. 171f.]. Sie dient als Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung in der

Phase des Entwurfs. Nach VDI 2221 ist dies das „*Erarbeiten graphischer oder schriftlicher Darstellungen von Gestalt und Anordnung der Elemente eines Produktes*“ [VDI2221, S. 39]. Das Ergebnis der Entwurfsprozesse ist die Festlegung der stofflichen und geometrischen Merkmale des Produktes [EM13, S. 265].

#### 2.1.4 Produktion, Fertigung und Produktionssystem

**Produktion** wird nach SPUR als ein von Menschen organisierter Prozess der Wertschöpfung definiert. Der Prozess der Produktion erstreckt sich über verschiedene Funktionsbereiche wie bspw. Produktplanung, Entwicklung/Konstruktion oder Fertigung. Die Produktion hat nach SPUR das Ziel Produkte in der benötigten Qualität, in möglichst kurzer Zeit, zu möglichst geringen Kosten und in ausreichender Menge zu fertigen und zu liefern [Spu79, S.25]. In der Produktionswirtschaft<sup>5</sup> wird das Erzeugen von Gütern jeder Art als Produktion beschrieben. Hierbei werden technische und konzeptionelle Verfahren im Rahmen der Produktion sachzielbezogen angewendet. Die Hauptleistung des betrachteten Systems ist die nutzensteigernde Veränderung der eingesetzten Güter zu einem Produkt<sup>6</sup> [Ker96, S. 1634]. Nach WARNEKE, lässt sich die Produktion in die Bereiche Teilefertigung und Montage unterteilen [War95, S. 1]. Unter Fertigungsverfahren werden die Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern (Stückgütern<sup>7</sup>) zusammengefasst [DIN8580, S. 4]. Die **Fertigung**<sup>8</sup> ist demnach der Tätigkeitsbereich, der mittels der vorhandenen Betriebsmittel Rohteile in die benötigten Endprodukte aus Einzelteilen überführt [Dan03, S. 49f.]. Soweit nicht anders angegeben wird für die Begriffe Fertigung, Teilefertigung und Montage im Rahmen der Arbeit der Oberbegriff Produktion verwendet<sup>9</sup>.

Laut REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. ist der Begriff **komplexe Produktionssysteme** wie folgt definiert:

---

<sup>5</sup> Teilgebiet der Betriebswirtschaftslehre [Ker96]

<sup>6</sup> „Eine vom Unternehmen am Markt angebotene Leistung, die durch ihre spezifischen Funktionen und Eigenschaften geeignet ist, konkrete Bedürfnisse vom Kunden nutzenbringend zu befriedigen“ [Sab96, S. 1439].

<sup>7</sup> Hierzu zählen Halbzeuge, Rohteile, Einzelteile, zusammengesetzte Baugruppen oder Endprodukte aus Einzelteilen [Eve96, S. 1538f.].

<sup>8</sup> Fertigungssysteme bestehen aus mehreren Arbeitssystemen, welche die kleinste wertschöpfende Einheit von Betriebsmitteln und Arbeitskräften darstellen [Dan99, S. 5].

<sup>9</sup> vgl. [War95, S. 1]

„alle Arten von Produktionseinrichtungen, bei denen mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen, sowohl bei der Bearbeitung und Montage als auch im Material- und Informationsfluss, weitgehend selbstständig ablaufen. Ein wesentliches Merkmal komplexer Produktionssysteme ist die informationstechnische Verknüpfung der einzelnen Komponenten des Systems“ [Ref87, S. 15].

Komplexen Produktionssysteme (Bild 2-1) können in drei technische Teilsysteme unterteilt werden [Ref87, S. 41f.]:

- Ein **Informationssystem** beinhaltet alle Einrichtungen, die für den Umgang mit Daten (u. a. Speichern, Verwalten) für die Erfüllung des Fertigungsauftrags notwendig sind. Zu einem Informationssystem zählen die Hardware (Rechner, Terminals, Leitungen) und die Software Programme.
- Ein **Materialflusssystem** setzt sich aus den Hauptkomponenten Fördermittel (z. B. Fahrzeuge, Hebezeuge) und Förderhilfsmittel (z. B. Paletten, Aufnahmeelemente) zusammen. Es beinhaltet dementsprechend alle Einrichtungen zum Lagern, Speichern, Transportieren, Bereitstellen und Handhaben von u. a. Werkstücken, Werkzeugen und Hilfsstoffen.
- **Bearbeitungs- und Montagesysteme** bestehen zum einen aus Betriebsmitteln (z. B. Maschinen, Werkzeuge), die den Produktionsfortschritt am Produkt bewirken. Zum anderen bestehen sie aus Hilfsstoffen wie bspw. Schmiermittel.

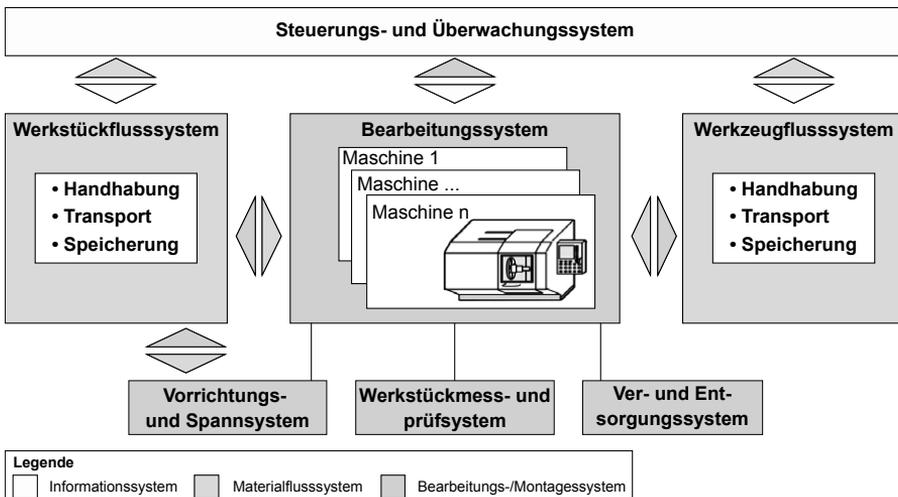


Bild 2-1: Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach [Eve89, S. 55]

### 2.1.5 Verhalten

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff **Verhalten** verstanden, wie jemand oder etwas in einer bestimmten Weise, in einer Situation reagiert [Dud16-olb]. Nach FRANK besteht das Verhalten von technischen Systemen aus dem physikalischen Verhalten (z. B. Festigkeit, dynamisches und kinetisches Verhalten) und logischem Verhalten. Das logische Verhalten eines Systems wird weiter in Ablaufverhalten (stattfindende Aktivitäten) und Anpassungsverhalten (Aktivitäten, die einen Zustandsübergang realisieren) differenziert [Fra06, S. 9f.].

1958 erwähnt MCCARTHY erstmals den Begriff Verhalten im Kontext der Künstlichen Intelligenz („Artificial Intelligence“) [McC58, S. 77ff.]. Er definiert die Programmierung in einer Programmiersprache als gleichwertige Möglichkeit zur Repräsentation von Verhalten [Sta01, S. 107ff.] wie folgt:

*„All behaviors must be representable in the system. Therefore, the system should either be able to construct arbitrary automata or to program in some general-purpose programming language“ [McC68, S. 404].*

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 – Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus, wurde das Verhalten wie folgt definiert. Das Verhalten eines technischen Systems ist die Summe aller Aktionen in einer bestimmten Situation. Das Verhalten eines Systems kann mittels Parameteranpassungen (Anpassen von Systemparametern) bzw. Strukturanpassungen (Änderung der Anordnung und Beziehungen zwischen Systemelementen) verändert werden [ADG+09, S. 8].

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht das Verhalten der logistischen Zusammenhänge von Produktionssystemen. In Anlehnung an die vorgestellte Definition von ADELTA ET AL., wird Verhalten als die Summe aller für den Materialfluss relevanten Aktionen eines Produktionssystems in einer bestimmten Situation verstanden. Detaillierte physikalische, kinematische und kinetische Zusammenhänge eines Produktionssystems oder des zu produzierenden Produktes werden nicht betrachtet. Dies beinhaltet beispielsweise Reibungsverhalten oder Roboterbewegungen [WCP+08, S. 1].

### 2.1.6 Ziel

Im Allgemeinen wird unter einem **Ziel** ein angestrebter zukünftiger Zustand verstanden [HD91, S. 13]. In der betriebswirtschaftlichen Praxis ist ein beispielhaftes Ziel die Maximierung der Wirtschaftlichkeit<sup>10</sup>.

Im *Sonderforschungsbereich 614 – Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus* werden Ziele als geforderte, gewünschte oder vermeidbare Eigenschaften des Systems beschrieben. Unterschieden wird in **externe Ziele**, die von außen auf das System einwirken

---

<sup>10</sup> Wirtschaftlichkeit = Ertrag / Aufwand [TAG+17, S. 47]

(z. B. maximaler Fahrkomfort), **inhärente Ziele**, die dem Entwurfszweck des Systems entsprechen (z. B. minimaler Verschleiß) und **interne Ziele**, die von dem System zu einem bestimmten Zeitpunkt verfolgt werden [FGK+04, S. 19], [ADG+09, S. 20]. Im Rahmen der Arbeit werden unter Zielen, wenn nicht explizit anders erwähnt, interne Ziele verstanden.

In den meisten Problemstellungen sind komplexe **Zielsysteme** zu betrachten, da selten lediglich ein Ziel verfolgt wird [HD91, S. 13]. Dabei wird unter einem Zielsystem eine Menge von Zielen verstanden, die in Beziehung zueinander stehen [FGK+04, S. 19], [ADG+09, S. 20], [Sei79, S. 34]. Die relevanten Zielsysteme für diese Arbeit werden in Kapitel 3.4 detailliert erläutert und bewertet.

### 2.1.7 Modell und Simulation

Ein **Modell** dient der Reduzierung der Komplexität eines Systems. Es wird genutzt, um Untersuchungen durchzuführen, die am originalen System nicht möglich oder zu aufwendig wären. Die VDI Richtlinie 3633 definiert ein Modell wie folgt:

*„Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ [VDI3633, S. 11].*

Das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Modell, dem sog. Simulationsmodell, wird als **Simulation** bezeichnet. Die Simulation ermöglicht es, das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme zu untersuchen [VDI3633, S. 16]. Die hierzu notwendige Durchführung von Simulationsstudien wird in Kapitel 2.5.2 erläutert. Im Rahmen der Arbeit wird der Fokus auf ereignisdiskrete Simulationen gelegt. Diese haben sich heute bereits in der Systemlandschaft zur Planung und Verbesserung von Produktionssystemen etabliert und bewährt [WCP+08, S. 1].

## 2.2 Produktentstehungsprozess nach Gausemeier

Der Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER umfasst die drei Hauptaufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung. Das Vorgehensmodell erstreckt sich von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf. Dabei handelt es sich um ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in drei Zyklen einordnen lassen. Die einzelnen Hauptaufgaben des 3-Zyklen-Modells (Bild 2-2) werden im Folgenden erläutert [GP14, S. 25].

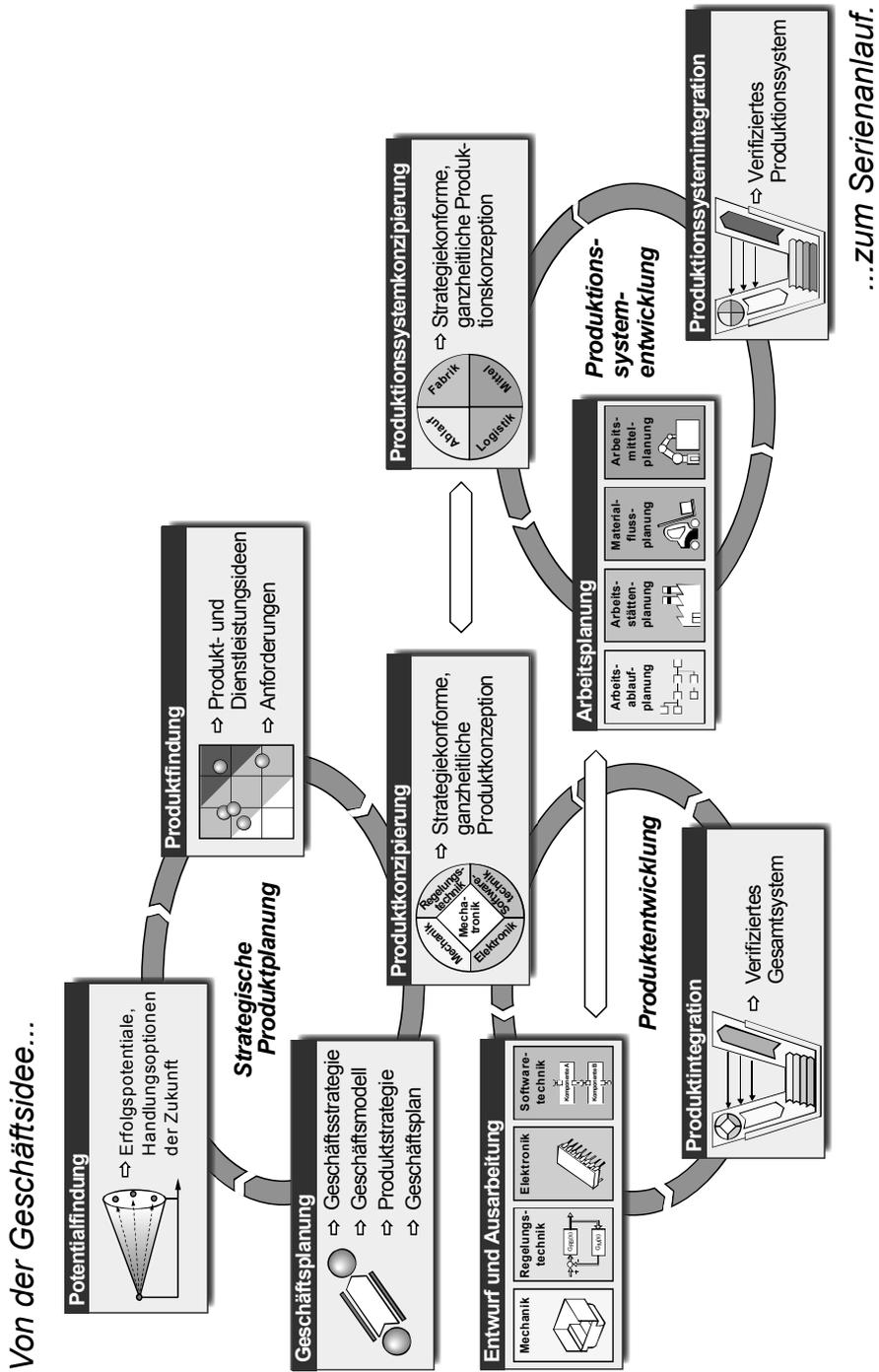


Bild 2-2: 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung [GDS13, S. 43]

### **Erster Zyklus: Strategische Produktplanung**

Der erste Zyklus des Produktentstehungsprozesses umfasst vier Aufgabenbereiche. Das Ziel der **Potentialfindung** ist es, die Erfolgspotentiale der Zukunft zu identifizieren und die entsprechenden Handlungsoptionen zu ermitteln. Hierzu werden verschiedene Methoden angewendet, wie bspw. die Szenario-Technik. Im Rahmen der **Produktfindung** werden Kreativitätstechniken verwendet, um auf Basis der identifizierten Erfolgspotentiale, neue Produkt- oder Dienstleistungsideen zu entdecken. Die Geschäftsstrategie stellt den Ausgangspunkt für die **Geschäftsplanung** dar. In diesem Bereich wird ermittelt, wann und wie die Marktsegmente bearbeitet werden. Die Produktstrategie, welche u. a. Angaben über den Aufbau des Produktprogramms beinhaltet, wird auf dieser Basis erstellt und mündet in einem Geschäftsplan. Dieser liefert Aussagen über den zu erzielenden Return on Investment (RoI) eines neuen Produktes. Die Zusammenarbeit der Fachleute aus Bereichen wie bspw. der Produktplanung, der Entwicklung/Konstruktion und der Fertigung ist für eine erfolgsversprechende Produktkonzeption notwendig. Aus diesem Grund ist die **Produkt-/Produktionssystemkonzipierung** Bestandteil des ersten Zyklus [GP14, S. 25f.].

### **Zweiter Zyklus: Produktentwicklung, Virtuelles Produkt**

Die Produktkonzeption ist die Grundlage für die Aufgaben des zweiten Zyklus. In dem Bereich **Entwurf und Ausarbeitung** wird diese fachgebietsspezifisch konkretisiert. Die Ergebnisse der Fachgebiete werden anschließend in dem Bereich der **Produktintegration** zu einer Gesamtlösung zusammengeführt. Der zweite Zyklus wird sinnvollerweise durch den Einsatz des Virtual Prototyping (Virtuelles Produkt) unterstützt. Hierzu werden rechnerinterne Modelle zu Analysezwecken gebildet [GP14, S. 26].

### **Dritter Zyklus: Produktionssystementwicklung, Digitale Fabrik**

Im Rahmen der Produktionssystementwicklung werden die vier Fachgebiete Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Materialflussplanung bzw. Produktionslogistik und Arbeitsstättenplanung in dem Aufgabenbereich der **Arbeitsplanung** betrachtet. Als Grundlage für diese Fachgebiete dient die Produktionssystemkonzeption, welche im Wechselspiel mit der Produktkonzeption erarbeitet wird. Im dem Bereich der **Produktionssystemintegration** werden die erarbeiteten Ergebnisse der Fachgebiete zusammengeführt. In der Produktionssystementwicklung werden ebenfalls rechnerinterne Modelle aufgebaut und zur Analyse genutzt. Der Begriff Digitale Fabrik (Virtuelle Produktion) bringt dies zum Ausdruck [GP14, S. 26]. Durch den Einsatz der Digitalen Fabrik können Zeit und Kosten eingespart werden, da der Testaufwand am realen Produktionssystem deutlich reduziert wird [GP14, S. 360].

Eine parallele und eng abgestimmte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ist die Voraussetzung zur Gestaltung eines leistungsfähigen und kostengünstigen Erzeugnisses. Gerade eine innovative Produktkonzeption kann die Entwicklung neuer Fertigungsprozessketten des Produktionssystems maßgeblich determinieren. Zudem ist eine enge

Abstimmung zwischen den Aufgabenbereichen Entwurf und Ausarbeitung der Produkte und der Arbeitsplanung des Produktionssystems erforderlich. Die Abstimmungsaufwände dieser beiden Ebenen werden durch die dargestellten Pfeile zwischen der Produkt- und der Produktionssystementwicklung in Bild 2-2 verdeutlicht [GP14, S. 26f.].

### **Fazit und Einordnung in die Arbeit**

Das 3-Zyklen-Modell wird als grundlegendes Vorgehen der Produktentstehung im Rahmen der Arbeit verwendet. Ziel der Arbeit ist eine Systematik, die es ermöglicht, das Verhalten von selbstoptimierenden Produktionssystemen integrativ zu planen. Die Systematik ist in den Aufgabenbereichen der Produktionssystemkonzipierung und der Arbeitsplanung zu verorten. In der Arbeitsplanung sind insbesondere die Bereiche der Materialflussplanung und der Arbeitsablaufplanung relevant. Dementsprechend fokussiert die Arbeit den dritten Zyklus des Produktentstehungsprozesses.

## **2.3 Integrative Produkt- und Produktionssystemkonzipierung**

Gegenstand der Arbeit ist die Planung des Verhaltens von selbstoptimierenden Produktionssystemen. Ein zentraler Gedanke ist der integrative Ansatz (Konzipierung des Produktionssystems im Wechselspiel mit der Produktkonzeption [GLL12, S. 88]), wie er in dem Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER beschrieben wird. Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 2.3.1 die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem betrachtet. Des Weiteren wird in diesem Kontext die Spezifikationstechnik CONSENS<sup>11</sup> in Kapitel 2.3.2 erläutert.

### **2.3.1 Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystemen**

Die Entwicklung eines komplexen Produktes erfordert die Beteiligung verschiedener Fachdisziplinen<sup>12</sup>. Die zur Verfügung stehenden Fertigungstechnologien beeinflussen hierbei stark das Produktkonzept. Dementsprechend ist die Zusammenarbeit von Fachleuten der Produktentwicklung und der Produktion notwendig, die integrativ eine Gesamtlösung entwickeln [GLL12, S. 88]. Das generelle Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER ET AL. wird in Bild 2-3 dargestellt. Die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells sowie die Wechselwirkungen zwischen der Produkt- und der Produktionssystemkonzipierung werden nachfolgend erläutert.

---

<sup>11</sup> CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

<sup>12</sup> Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik [GLL12, S. 88]

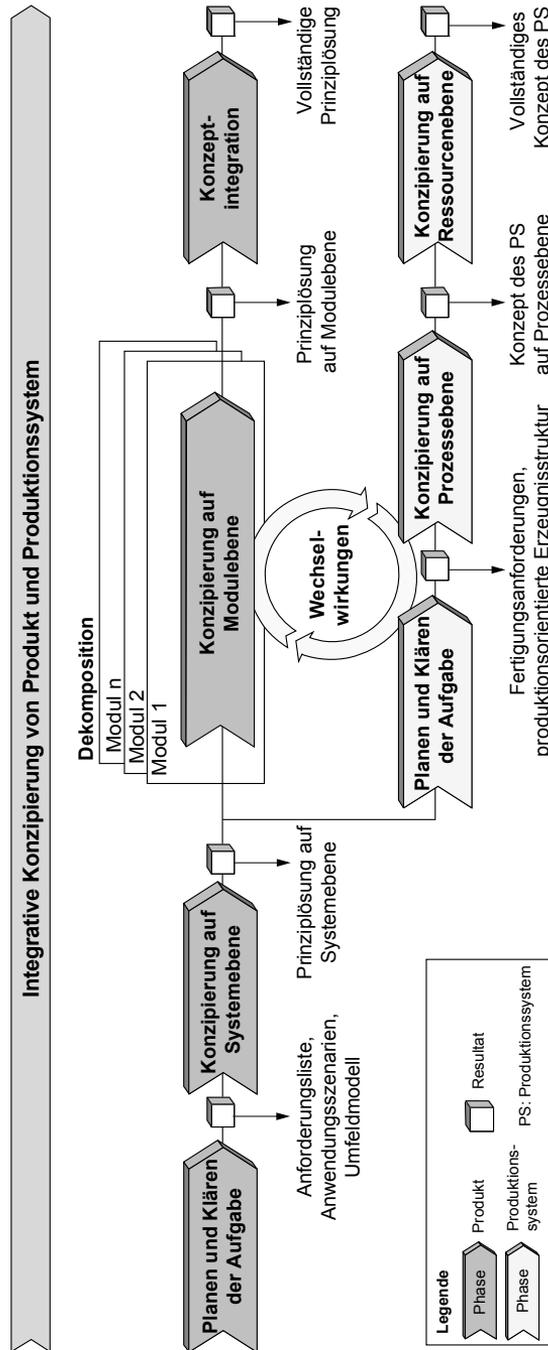


Bild 2-3: Vorgehensmodell zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem [GDK+11, S. 755], [Nor12, S. 99]

## Produktkonzipierung

In der Phase **Planen und Klären der Aufgabe** wird zunächst der Kern der Entwicklungsaufgabe ermittelt. Die Anforderungen, die sich hieraus an das zu entwerfende System ergeben, werden nachfolgend erarbeitet. Das Ergebnis der Phase ist ein Umfeldmodell, definierte Anwendungsszenarien, eine geplante Produktstruktur mit den relevanten Entwurfsregeln und eine Anforderungsliste. Diese Informationen dienen als Ausgangspunkt für die **Konzipierung auf Systemebene**. Für die definierten Anwendungsszenarien werden Lösungsvarianten auf Basis der Anforderungen entwickelt. Die vielversprechendsten Lösungen werden ausgewählt und zu der Prinziplösung des Gesamtsystems auf Systemebene zusammengestellt. In der Phase der **Konzipierung auf Modulebene** wird das System modularisiert, um die Prinziplösung detaillierter zu betrachten, insbesondere hinsichtlich der wirtschaftlichen und technischen Realisierbarkeit. Für jedes Modul werden abermals Prinziplösungen erarbeitet. Das Vorgehen hierbei ist identisch mit der Vorgehensweise bei der Konzipierung auf Systemebene. Das Resultat des Vorgehens ist die Prinziplösung auf Modulebene. Im Rahmen der **Konzeptintegration** werden die entwickelten Lösungen auf Widersprüche untersucht und unter technischen und wirtschaftlichen Kriterien analysiert. Das Ergebnis, die vollständige Prinziplösung des Gesamtsystems, ist der Ausgangspunkt für den fachgebietsspezifischen Entwurf [ADG+09, S. 167f.], [GFD+09, S. 216ff.], [Gau10, S. 61f.].

## Produktionssystemkonzipierung

Ausgehend von der Prinziplösung des Produktes auf Systemebene beginnt die Phase **Planen und Klären der Aufgabe** des Produktionssystems mit der Analyse der Entwicklungsaufgabe. Zunächst wird die aufgestellte Anforderungsliste auf fertigungsrelevante Anforderungen (z. B. geplante Stückzahl, Anzahl der Varianten) untersucht und dementsprechend reduziert. Im nächsten Schritt werden die zu produzierenden Systemelemente identifiziert und die produktionsorientierte Erzeugnisstruktur des Produktes erstellt. Das Ziel der **Konzipierung auf Prozessebene** ist ein Konzept des Produktionssystems auf Prozessebene. Zu den Elementen, die für eine erste Beschreibung der Prozessfolge notwendig sind, gehören z. B. Fertigungs-, Montage- und Fügeprozesse sowie Bauteile, Baugruppen und Zwischenzustände. Die notwendigen Prozesse wie bspw. Fertigungsprozesse werden auf Basis der produktionsorientierten Erzeugnisstruktur identifiziert. Es wird entschieden, welche Systemelemente in Eigenfertigung hergestellt werden. Auf Basis der Eigenschaften der Systemelemente (z. B. Werkstoff, grobe Gestalt) wird die Prozessfolge um die zu verwendende Fertigungstechnologie bzw. Technologiekette und die einhergehenden Zwischenzustände konkretisiert. In der Phase **Konzipierung auf Ressourcenebene** wird die Anordnungsstruktur des Produktionssystems ermittelt. Hierzu werden zunächst den spezifizierten Prozessen Ressourcen zugewiesen, die prinzipiell in der Lage sind, diesen Prozess durchzuführen. Dies können je Prozess (z. B. Drehen) mehrere Ressourcen (z. B. konventionelle Drehmaschine oder Bearbeitungszentrum) sein, wodurch mehrere alternative Kombinationen entstehen. Diese werden in Bezug auf ihre

technische Eignung und Wirtschaftlichkeit analysiert. Nach der Auswahl der zu verwendenden Ressourcen liegt dem Produktionssystemplaner ein Konzept des Produktionssystems auf Ressourcenebene vor und somit die Grundlage für die weitere Konkretisierung in der Arbeitsplanung [BGN+09, S. 7ff.], [GDK+11, S. 756], [Nor12, S. 100f.].

### **Wechselwirkungen**

Zwischen der Produkt- und Produktionssystemkonzipierung bestehen diverse Wechselwirkungen. Insbesondere parallel zu der Phase der Konzipierung auf Modulebene des Produktes besteht erhöhter Abstimmungsbedarf. In enger Abstimmung erfolgt bspw. die Auswahl der Fertigungstechnologie, da dies die Auswahl der verwendbaren Werkstoffe determiniert. Zudem werden weitere Informationen durch die Konkretisierung der Prinziplösung des Produktes für die Produktionssystemkonzipierung bereitgestellt [BGN+09, S. 7ff.], [GDK+11, S. 756], [Nor12, S. 100f.].

### **2.3.2 Spezifikationstechnik CONSENS**

Die Prinziplösung ist der Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung des Produktes als auch des Produktionssystems. Die Spezifikationstechnik CONSENS ermöglicht die fachgebietsübergreifende Beschreibung dieser. Anhand der in Bild 2-4 dargestellten Aspekte werden der grundsätzliche Aufbau und die Wirkungsweise des Systems festgelegt. Die Aspekte stehen zueinander in Beziehung und werden rechnerintern in Form von Partialmodellen abgebildet [GDK+11, S. 756]. Sie sind im Wechselspiel zu erarbeiten, obwohl nach dem Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem (vgl. Kapitel 2.3.1) eine bestimmte Reihenfolge vorgegeben ist [GLL12, S. 89ff.]. Im Folgenden werden die einzelnen Partialmodelle der Spezifikationstechnik erläutert:

### **Umfeld**

Die Elemente des Umfelds des zu entwerfenden Systems werden in ein Strukturdiagramm eingebettet. Das System selbst wird hierbei als Black Box betrachtet. Des Weiteren werden die Einflüsse des Umfelds auf das System identifiziert und in Form von Beziehungen mit diesem vernetzt. Störeinflüsse können zur Verdeutlichung der Wirkung markiert werden [Fra06, S. 105], [GFD+09, S. 210], [GDK+11, S. 754].

## **Anwendungsszenarien**

Zur Identifikation und Aufnahme von Anforderungen und Betriebsmodi werden Anwendungsszenarien beschrieben. Der betrachtete Systemausschnitt, die zu lösende Entwicklungsaufgabe sowie der an einem Betriebszustand beteiligte Systemaufbau und dessen Wirkungsweise werden in Form von Steckbriefen beschrieben. Die erstellten Anwendungsszenarien stellen eine situationsspezifische Sicht des Verhaltens des Systems während eines Zustands bzw. einer bestimmten Situation dar. Indem das Augenmerk auf den aufgabenrelevanten Ausschnitt des Systems gelegt wird, reduziert sich die Komplexität der Entwicklungsaufgabe [Fra06, S. 106f.], [GFD+09, S. 210], [GDK+11, S. 754].

## **Anforderungen**

Das Partialmodell Anforderungen ist sowohl für das Produkt als auch für das Produktionssystem relevant. In einer Liste werden die Anforderungen des zu entwerfenden Systems formuliert. Es wird unterschieden in Fest- und Wunschanforderungen, die als „Messlatte“ im weiteren Entwicklungsprozess dienen. Eine Festanforderung (z. B. zu erfüllende Leistungsdaten) muss unter allen Umständen erfüllt werden. Wunschanforderungen (z. B. größere Wartungsfreiheit) hingegen sind Anforderungen, die nur bei geringen Zugeständnissen erfüllt werden sollten [PBF+05, S. 187ff.], [Fra06, S. 104], [GFD+09, S. 210], [GDK+11, S. 754f.].

## **Funktionen**

Unter einer Funktion wird der gewollte Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems verstanden [PBF+05, S. 214]. Die Hauptfunktion des Systems wird in ihre Teilfunktionen unterteilt und in hierarchisierter Form als Baumstruktur mit logischen Beziehungen zur Angabe des Hierarchisierungskriteriums (z. B. ist Teilfunktion von) dargestellt. Es werden so lange Subfunktionen zu den einzelnen Teilfunktionen gesucht, bis eine weitere Unterteilung nicht mehr sinnvoll wäre. Zur Realisierung der identifizierten Teilfunktionen werden anschließend Lösungen gesucht [Fra06, S. 110f.], [GFD+09, S. 212], [GDK+11, S. 755].

## **Wirkstruktur**

In der Wirkstruktur werden die Elemente des zu entwickelnden Systems in einem Strukturdiagramm abgebildet und mittels Beziehungen verbunden. Hierzu werden die gefundenen Teillösungen zur Realisierung von Teilfunktionen in Form von Systemelementen (z. B. Antriebsmodul, Arbeitspunktsteuerung) abgebildet. Die Beziehungen der Systemelemente untereinander können gerichtet oder ungerichtet in Form von Flussbeziehungen als Informations-, Energie- oder Stoffflüsse vorliegen. Die Beziehungen werden über Schnittstellen mit den Systemelementen verbunden. Mittels logischer Gruppen (z. B. Funktionsmodule) wird das System nach frei wählbaren Kriterien strukturiert [Fra06, S. 111f.], [GFD+09, S. 213], [GDK+11, S. 755].

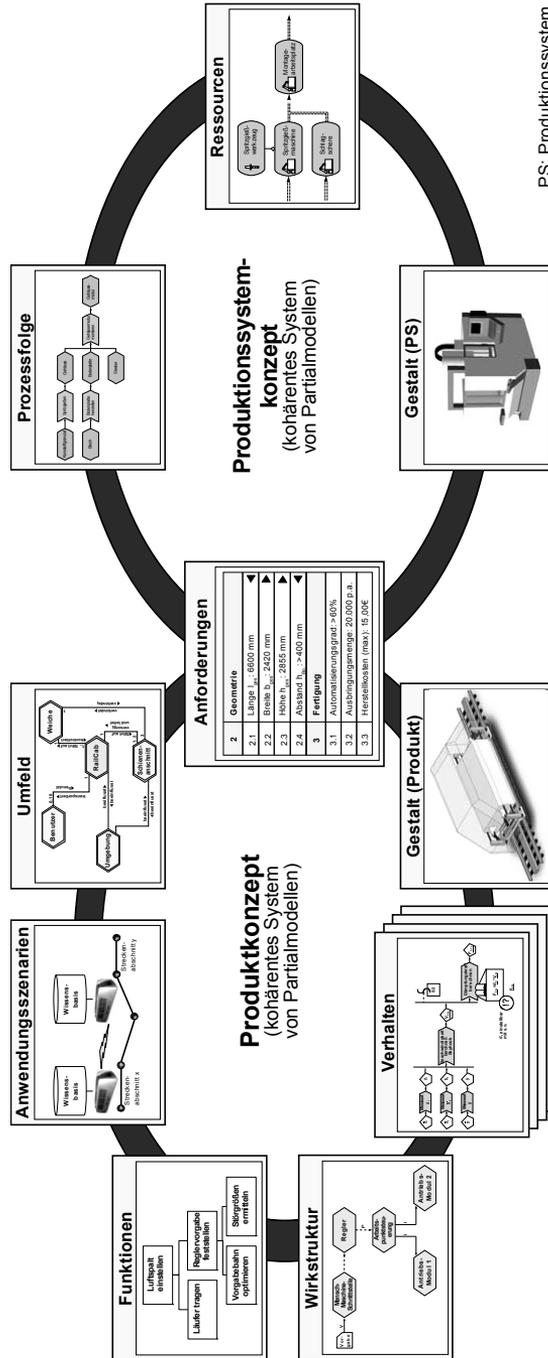


Bild 2-4: Partialmodelle zur fachgebietsübergreifenden Beschreibung der Prinzipiellösung von Produkt und Produktionssystem [GDK+11, S. 755], [GLL12, S. 90]

### **Gestalt (Produkt)**

Auf Basis der Wirkstruktur werden erste Angaben zu Wirkflächen und Wirkorten gemacht, wie u. a. Lage, Form und Anordnung. In weiteren Entwicklungsstufen wird die Gestalt des Produktes mittels Flächen- und Volumenmodellen sukzessive konkretisiert. Zudem wird neben dem detaillierteren Gestaltmodell eine Baustruktur des Produktes abgeleitet [Fra06, S. 115f.], [GFD+09, S. 213], [GDK+11, S. 755].

### **Verhalten**

In der Gruppe Verhalten werden verschiedene Arten des Verhaltens repräsentiert. Die wesentlichen Unterscheidungsformen sind das physikalische Verhalten (z. B. Festigkeit, Temperaturbeständigkeit) und das logische Verhalten (z. B. geregeltes Verhalten, Kooperationsverhalten). In dem Partialmodell Verhalten-Zustände werden die vorausgedachten Zustände und Zustandsübergänge des zu entwickelnden Produktes spezifiziert und in eine zeitliche Reihenfolge gebracht. Die Aktivitäten, die Zustandsübergänge auslösen sowie Aktivitäten eines Systemzustands werden in dem Partialmodell Verhalten-Aktivitäten beschrieben [Fra06, S. 116f.], [GFD+09, S. 213f.], [GDK+11, S. 755].

### **Prozessfolge**

Die Prozessfolge stellt die Arbeitsvorgangsfolge des Produktionssystems dar und bildet das zentrale Element der Produktionssystemkonzeption (vgl. Bild 2-5). Hierzu werden Fertigungs- und Montageprozesse und deren Prozessparameter betriebsmittelunabhängig spezifiziert. Jeder Prozess hat mindestens ein Materialelement als Eingangs- und eines als Ausgangsobjekt. Die Materialelemente bilden zu produzierende Systemelemente des Produktes oder Zwischenzustände eines Werkstückes (z. B. Halbzeuge) ab. Im Laufe des integrativen Entwicklungsprozesses wird die Prozessfolge im Wechselspiel mit der Produktkonzeption sukzessive konkretisiert [BGN+09, S. 5f.], [GDK+11, S. 757], [GLL12, S. 100f.].

### **Ressourcen**

Ressourcen repräsentieren Arbeitsmittel und das nötige Personal zur Ausführung von Arbeitsvorgängen. Sie stellen die betriebsmittelspezifische Konkretisierung der zuvor erstellten Prozessfolge dar. Eine Ressource kann im Stande sein mehrere Prozesse durchzuführen. Unter dieser Voraussetzung wird das Partialmodell Ressourcen aufgebaut. Hierzu werden die identifizierten Ressourcen entsprechend der erstellten Prozessfolge durch Materialflüsse miteinander verknüpft [BGN+09, S. 6], [GDK+11, S. 755], [GLL12, S. 102].

### **Gestalt (Produktionssystem)**

Die Produktionssystemkonzeption wird durch die Gestalt weiter konkretisiert. Es werden erste Aussagen über die Gestalt bzw. Struktur des Produktionssystems getroffen. Zu der Gestalt zählen bspw. Arbeitsbereiche von Handarbeitsplätzen oder Platzbedarfe für Ma-

schinen. Die Gestaltinformationen werden den Ressourcen z. B. in Form von Skizzen oder 3D-CAD-Modellen zugeordnet. Die Gestalt des Produktionssystems ist der Ausgangspunkt für die Konkretisierung in der Arbeitsstättenplanung [BGN+09, S. 7], [GDK+11, S. 755], [GLL12, S. 103].

Das **generelle Vorgehen des Aufbaus der Partialmodelle im Rahmen der Produktionssystemplanung** zeigt Bild 2-5. Zunächst wird die Baustruktur erarbeitet. Diese beschreibt die logische Verbindung der Bauteile zu Baugruppen bzw. zu Gesamtsystemen. Als Ausgangspunkt für eine erste Baustruktur dienen die Informationen der Partialmodelle Anforderungen (1), Wirkstruktur (2), und Gestalt des Produktes (3). Die Anforderungsliste wird hierzu auf die fertigungsrelevanten Anforderungen reduziert wie z. B. die zu verwendenden Materialien. Mittels einer Analyse der Wirkstruktur und der Gestalt des Produktes werden die zu produzierenden Bauteile und deren räumliche Beziehungen identifiziert. Die Informationen werden genutzt um eine erste Prozessfolge mittels des Partialmodells Prozesse zu erstellen (4). Die spezifizierten Produktionsprozesse werden Ressourcen zugeordnet (5). Auf Basis dieser Zuordnung wird ein Gestaltmodell der Produktion erstellt (6) [GBR10, S. 717].

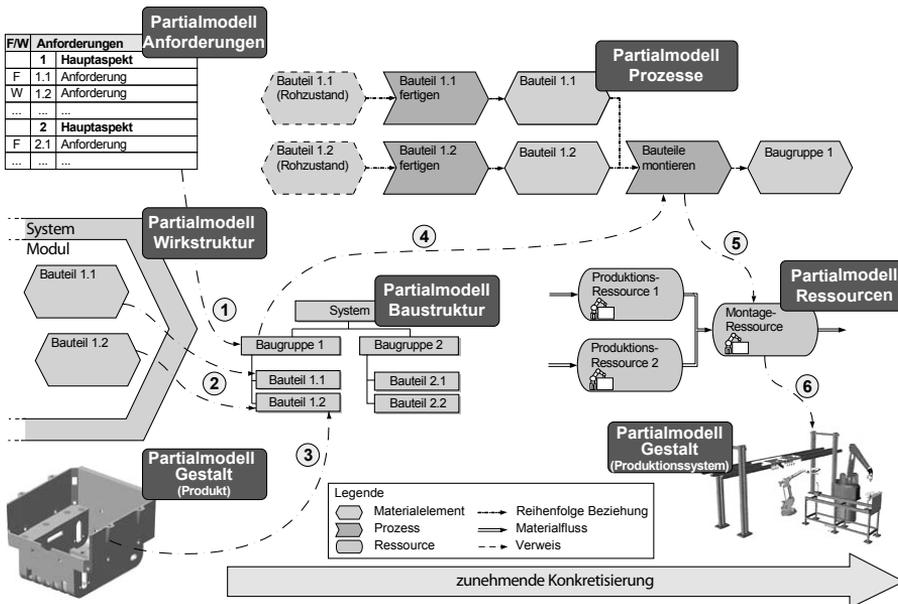


Bild 2-5: Genereller Ablauf bei der Produktionssystemplanung nach [GBR10, S. 716]

### 2.3.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Das Vorgehensmodell zur integrativen Planung von Produkt und Produktionssystem strukturiert die Zusammenarbeit der beteiligten Entwickler und Planer in den Zyklen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung des Produktentstehungsprozess

(vgl. Kapitel 2.2). Der Fokus liegt hierbei auf den Wechselwirkungen zwischen der Phase der Produktmodularisierung und der Konzipierung der Prozesse des Produktionssystems. Die Spezifikationstechnik CONSENS ermöglicht die Beschreibung der wesentlichen Aspekte von mechatronischen Produkten und dem zugehörigen Produktionssystem in Form von Partialmodellen. Die Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme wird die beschriebene Entwicklungsmethodik als Rahmenwerk nutzen. Für die Beschreibung der notwendigen Informationen wird die Spezifikationstechnik verwendet und ggf. bedarfsgerecht erweitert.

## 2.4 Arbeitsplanung

Aufgrund der Komplexität der Produkte haben die Planungsabteilungen die Aufgabe, die mit der Produktion eines Produktes einhergehenden Arbeiten vorauszudenken. Dies beinhaltet die Festlegung der Fertigung und Montage der Produkte sowie die zeitliche Planung und Überwachung der Arbeitsschritte. Die Arbeitsplanung umfasst dabei alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen [Eve97, S. 1f.].

Nach GAUSEMEIER gliedert sich die Produktionssystementwicklung im Rahmen der Arbeitsplanung in die Fachgebiete Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Materialflussplanung und Arbeitsmittelplanung (vgl. Kapitel 2.2). Die Arbeiten innerhalb dieser Fachgebiete sind nicht streng sequentiell zu bearbeiten, sondern zeichnen sich durch einen gemeinsamen Abstimmungsbedarf aus. Durch den Einsatz von IT-Systemen zur Bildung und Analyse von rechnerinternen Modellen wird der Planungsprozess in allen Bereichen der Arbeitsplanung unterstützt [GP14, S. 360]. Die sog. Digitale Fabrik (vgl. Kapitel 2.5) oder auch Virtuelle Produktion ermöglicht dem Produktionssystemplaner eine ganzheitliche Planung, Evaluierung und stetige Verbesserung der Produktion [VDI4499, S. 3]. Die einzelnen Fachgebiete der Arbeitsplanung werden in den Kapiteln 2.4.1 bis 2.4.4 erläutert (vgl. Bild 2-6).

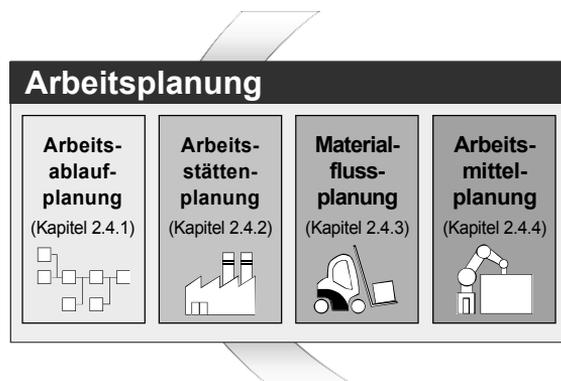
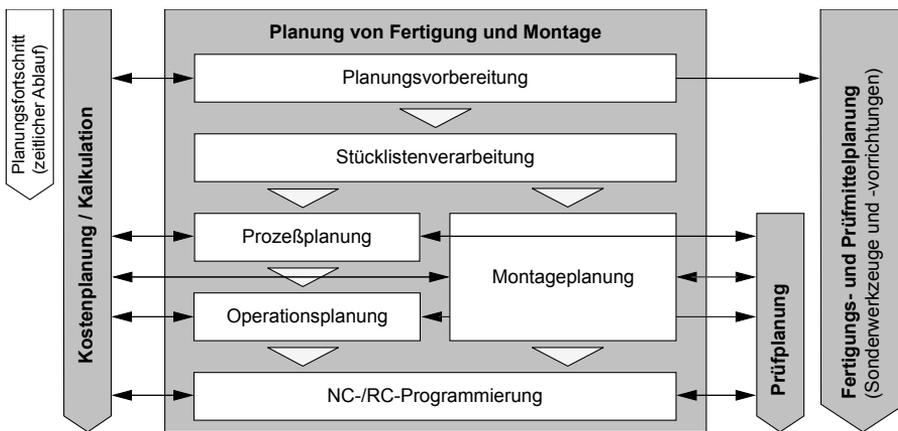


Bild 2-6: Fachgebiete der Arbeitsplanung nach [GP14, S. 26]

### 2.4.1 Arbeitsablaufplanung

Der Arbeitsplan ist das Ziel der Arbeitsablaufplanung. Er beschreibt alle notwendigen Arbeitsschritte zur Fertigung der Einzelteile und zur Montage eines Produktes. Die Aufgaben der Arbeitsablaufplanung sind eng mit den anderen Bereichen der Arbeitsplanung verknüpft, da das Aufgabenspektrum sehr umfangreich ist und der Arbeitsplan ein zentrales Dokument in der Produktionssystementwicklung darstellt [GP14, S. 31]. Nach EVERSHEIM zeichnet sich die Arbeitsablaufplanung durch kurz- bis mittelfristige Aufgaben aus. Wie in Bild 2-7 dargestellt, werden hierbei vier parallele Aufgabenbereiche (Stränge) unterschieden [Eve97, S. 17].



#### Legende

↔ Informationsaustausch und Abstimmung

Bild 2-7: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten der Arbeitsablaufplanung [Eve97, S. 18]

Im Zentrum der Betrachtung steht die **Planung von Fertigung und Montage**, welche sich in sechs Schritte gliedert. Der Strang **Kostenplanung / Kalkulation** bezieht sich auf die begleitenden wirtschaftlichen Planungskriterien wie bspw. die Ermittlung von Beschaffungskosten oder Bearbeitungskosten. Im Rahmen der **Prüfplanung** werden Abläufe, Umfänge, Methoden und Hilfsmittel für die Prüfungen definiert. Der Strang stellt die Verbindung zwischen der Arbeitsablaufplanung und dem Qualitätsmanagement dar. Die Planung von notwendigen Sonderwerkzeugen und Vorrichtungen erfolgt in der **Fertigungs- und Prüfmittelplanung** [Eve97, S. 17ff.].

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Planung von Fertigung und Montage vorgestellt. Im ersten Schritt, der **Planungsvorbereitung**, werden die vorhandenen Informationen aus Konstruktion und Arbeitsplanung aggregiert. Darüber hinaus wird der

Neuheitsgrad der Planungsaufgabe analysiert. Es wird unterscheiden in die Arbeitsplanungsarten<sup>13</sup> Neuplanung, Anpassungsplanung, Variantenplanung und Wiederholplanung. In der **Stücklistenverarbeitung** werden die Stücklisten der Konstruktion aus fertigungstechnischer Sicht korrigiert bzw. erweitert. Die so erstellte Fertigungsstückliste dient zur Vorbereitung und Abwicklung von Fertigungsaufträgen. Parallel zur Montageplanung wird die **Prozessplanung** angestoßen. Das Hauptergebnis dieses Schrittes ist der Arbeitsplan. Bild 2-8 stellt die Einordnung der Aufgaben des Planers zur Erstellung eines Arbeitsplanes in den jeweiligen Arbeitsplanbereich dar. Zur Auswahl der erforderlichen Fertigungsmittel ist die Prozessplanung eng mit der Arbeitsmittelplanung verbunden. Der Arbeitsplan dient zur Dokumentation der notwendigen Bearbeitungsschritte und gibt somit den Weg des Werkstückes durch die Fertigung vor. In der **Operationsplanung** wird die detaillierte Bearbeitungsplanung auf einer Maschine festgelegt. Das Ziel sind Bearbeitungsoperationen, welche die maschinenspezifische Bearbeitung des Werkstückes mit einem Werkzeug beschreiben (z. B. Vordrehen der Stirnseite). Parallel zur Prozess- und Operationsplanung wird die **Montageplanung** durchgeführt. In diesem Schritt wird u. a. die Montagereihenfolge von einzelnen Baugruppen, Modulen und des gesamten Produktes festgelegt. Der Montageplan ist das wesentliche Ergebnis dieses Schrittes. Er beinhaltet die Reihenfolge der Montagevorgänge inklusive der Vorgabezeiten sowie alle notwendigen Angaben zu dem Erzeugnis und die zu verwendenden Betriebsmittel. Auf Basis dieser Informationen und den Ergebnissen der Operationsplanung werden im Rahmen der **NC-/RC-Programmierung**<sup>14</sup> Steuerungsprogramme<sup>15</sup> für Werkzeugmaschinen, Roboter und Messmaschinen erstellt [Eve97, S. 20ff.].

---

<sup>13</sup> „Je nach Neuheitsgrad der vorliegenden Aufgabe besitzen die Tätigkeiten der Arbeitsablaufplanung unterschiedlich hohe Arbeitsumfänge. ... In Abhängigkeit vom Erstellungsaufwand, Neuheitsgrad und fertigungstechnischer Ähnlichkeit lassen sich analog zu den Konstruktionsarten vier Arbeitsplanungsarten unterscheiden“ [Eve97, S. 18].

<sup>14</sup> NC = Numerical Control (Steuerung von Werkzeugmaschinen), RC = Robot Control (Steuerung von Industrierobotern)

<sup>15</sup> Weiterführende Informationen zur Programmierung von Steuerungsprogrammen siehe [KRS15]

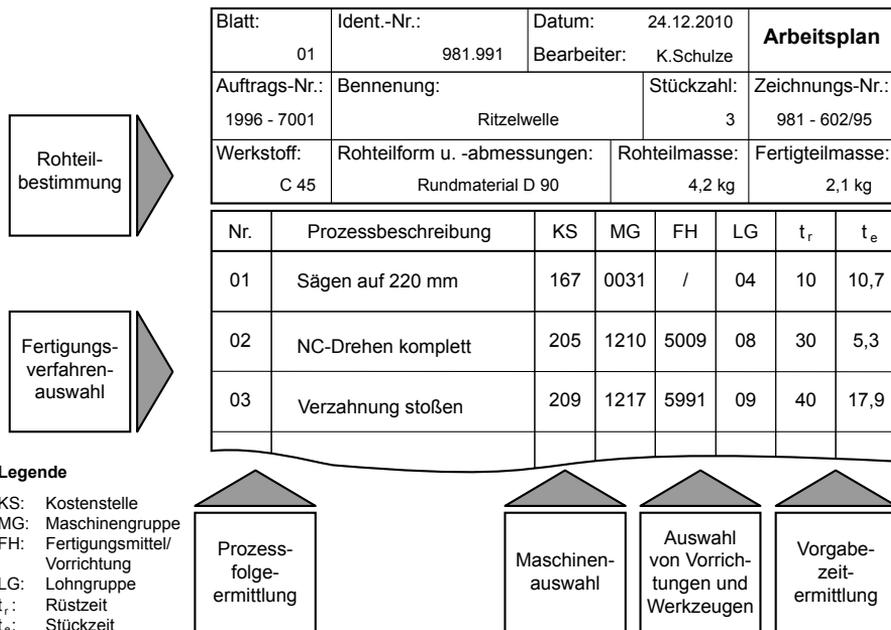


Bild 2-8: Aufgaben der Arbeitsplanerstellung nach [Eve97, S. 24]

## 2.4.2 Arbeitsstättenplanung

Das Ziel der Arbeitsstättenplanung ist eine auf den Materialfluss des Fertigungssystems abgestimmte bauliche Struktur des Fertigungsbetriebes. Die Arbeitsstättenplanung kann weiter in Bebauungs- und Anordnungsplanung, Planung der Produktionslinien und Gestaltung der Arbeitsplätze unterteilt werden [GP14, S. 364]:

### Bebauungs- und Anordnungsplanung

Im Rahmen der Anordnungsplanung werden die innerbetrieblichen Beziehungen und Strukturen zwischen den Funktionsbereichen der Produktion definiert. Unter Berücksichtigung der funktionalen und wirtschaftlichen Anforderungen der Fabrik wird der Bebauungsplan erstellt. Dieser beschreibt die Nutzung und die Anordnung der Gebäude auf dem Betriebsgelände. Die Gestaltung von u. a. Produktions-, Lager- und Bürogebäuden ist eine weitere Aufgabe der Bebauungsplanung. Im Rahmen der architektonischen Planung sind die Komponenten Tragwerk, Hülle, Medien und Ausbau gestaltprägend. Das *Tragwerk* lässt sich nur schwer verändern und ist für die Standsicherheit des Gebäudes maßgeblich. Die *Hülle* grenzt den Innenraum des Gebäudes gegenüber dem Umfeld (Außenraum) ab. Zentrale Leitungswege und Anschlüsse, bspw. zur Versorgung der Produktionsprozesse, werden unter dem Begriff *Medien* zusammengefasst. Der Begriff *Ausbau* umfasst alle Bauteile, die nicht für die Statik relevant sind [Dan99, S. 245ff.], [GP14, S. 364], [WRN09, S. 317ff.].

## Planung der Produktionslinien

Neben der gestalterorientierten Planung werden im Rahmen der Planung von Produktionslinien Kapazitäten, Durchlaufzeiten und Puffergrößen betrachtet. Im Fokus stehen komplexe Produktionssysteme, welche über Materialflusssysteme und Informationssysteme verbunden sind (vgl. Kapitel 2.1.4). Das Ziel der Produktionslinienplanung ist ein effizienter Fertigungsablauf. Dementsprechend werden die Komponenten des Produktionssystems angeordnet und die Materialflusssysteme ausgelegt [GP14, 33ff.], [Gru00, S. 65ff.].

## Gestaltung der Arbeitsplätze

Die Ergebnisse der Bebauungs- und Anordnungsplanung sowie Informationen aus den Bereichen Betriebsorganisation, Arbeitspsychologie und Ergonomie bilden die Ausgangsbasis für die durchzuführenden Aufgaben. Die Gestaltung der Arbeitsplätze umfasst u. a. die Festlegung der Arbeitsplatzflächen, die Definition der Betriebsmittelanordnung sowie die Materialbereitstellung und Werkzeugversorgung. Ein wesentlicher Aspekt aus der Sicht der Arbeitssicherheit ist die Vermeidung gesundheitsschädlicher Einflüsse auf den Werker [Eve97, S. 112ff.], [GP14, S. 33], [WRN09, S. 237].

### 2.4.3 Materialflussplanung (Produktionslogistik)

Die Planung der Materialflüsse<sup>16</sup> vom Wareneingang bis zum Versand sowie die Erstellung der Steuerungssoftware der beteiligten Systeme werden unter dem Begriff Produktionslogistik zusammengefasst [GP14, S. 32]. Die Materialflusssysteme (Materialflussstrukturen) werden primär in Bezug auf die folgenden Teilziele geplant: kurze Durchlaufzeiten, minimieren der Materialflusskosten, vereinfachte Arbeitsabläufe sowie wirtschaftliche Transport-, Handhabungs-, Lager- und Kommissioniersysteme. Hierbei werden technische, quantitative und organisatorische Komponenten des Materialflusses betrachtet [Mar99, S. 6f.]. Nach GAUSEMEIER werden vier Hauptaufgaben der Materialflussplanung (Produktionslogistik) unterschieden, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden [GP14, S. 32f.].

#### Erstellen der Logistikkonzeption

Aus der Strategie des Unternehmens wird die Logistikkonzeption abgeleitet. Diese beschreibt die Logistikstrategie des Unternehmens unter Berücksichtigung der Logistikziele (bspw. Lieferzeiten, Verfügbarkeiten). Des Weiteren werden die Logistikorganisation sowie die Logistikprozesse mit dessen logistischen Gestaltungsmitteln charakterisiert [GP14, S. 32], [Mar00, S. 2f.].

---

<sup>16</sup> „Materialfluss (nach VDI-Richtlinie 3300): Materialfluss ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinn, Be- und Verarbeiten, sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Zum Materialfluss gehören alle Vorgänge während des Durchlaufs von Gütern (z. B. Material, Stoffmengen, Abfall, Datenträger usw.) durch ein System, wie Bearbeiten, Handhaben, Transportieren, Prüfen, Aufenthalte und Lagerungen“ [Dan99, S. 47].

### Projektierung des Materialflusssystems

Der Materialfluss lässt sich in vier Stufen unterteilen, wobei die erste Stufe des Materialflusses der Logistik zugeordnet wird und somit im Rahmen der Produktentstehung nicht relevant ist [GP14, S. 32]. Innerhalb der *ersten Stufe* werden die Transportprozesse zwischen Lieferanten, Fertigungsunternehmen und deren Kunden betrachtet. Die *zweite Stufe* des Materialflusses umfasst bspw. die Transporte zwischen Werkhallen oder Funktionsbereichen innerhalb eines Betriebsgeländes. Der Bebauungsplan ist das Ergebnis der Planungsprozesse im Kontext dieser Materialflusstufe (vgl. Kapitel 2.4.2). Der Materialfluss der *dritten Stufe* kennzeichnet sich durch die Betrachtung der Bewegungen zwischen den einzelnen Arbeitsmitteln (z. B. Arbeitsplätze, Maschinengruppen, Lager) eines Funktionsbereiches (Betriebsbereiches). Die Bewegungen des Materials an einzelnen Arbeitsplätzen werden in der *vierten Stufe* des Materialflusses betrachtet [Dan99, S. 49].

### Projektierung der Handhabungssysteme

Der Begriff Handhaben beschreibt die Schaffung, die Veränderung oder die vorübergehende Aufrechterhaltung einer definierten Lage eines Körpers im Bezugskoordinatensystem [VDI2860, S. 2]. Handhabungssysteme (z. B. Magazin, Greifer, Industrieroboter) werden zur Einleitung oder zum Beenden von Bewegungsvorgängen im Rahmen der Fertigung, des Transportierens und des Lagerns eingesetzt. Im Rahmen der Projektierung dieser Systeme werden Handhabungsaufgaben und Handhabungsmittel klassifiziert [GP14, S. 33], [VDI2860, S. 14].

### Projektierung der Lagersysteme

Ein Lager erfüllt die Funktion des Ausgleichens auf zwei Arten. Es werden sowohl zeitliche als auch mengenmäßige Unterschiede bei Zu- und Abgängen von Gütern kompensiert [Dan99, S. 698]. Somit dient es der Stabilisierung eines un stetigen Materialflusses zwischen zwei Fertigungsmitteln [GP14, S. 33]. Auf Basis der vorliegenden Materialflüsse werden die Lageraufgaben des Lagersystems festgelegt. Das Ergebnis dieser Tätigkeit sind Aussagen über den Lagerort, das Lagergut und die Lagerfunktion (z. B. Zwischenlagerung, Bereitstellungslagern) [Eve97, S. 106f.].

## 2.4.4 Arbeitsmittelplanung

Im Rahmen der Arbeitsmittelplanung werden die erforderlichen Betriebsmittel<sup>17</sup> (Fertigung-, Mess- und Prüfmittel) für eine wirtschaftliche Ausführung der Arbeitsvorgänge geplant. Hierzu gehören u. a. Maschinen, Werkzeuge oder Vorrichtungen. Die Arbeitsmittelplanung wird nach EVERSHEIM in zwei Bereiche unterteilt [Eve97, S. 70f.]:

---

<sup>17</sup> Die Begriffe Arbeitsmittel und Betriebsmittel können synonym verwendet werden [Gru00, S. 73].

### **Auftrags- bzw. produktbezogene Arbeitsmittelplanung**

Bestehende bzw. neu zu entwickelnde Betriebsmittel werden den Arbeitsvorgängen in Bezug auf das herzustellende Produkt zugeordnet. Im Rahmen dieser Tätigkeit dient die Arbeitsmittelplanung als Schnittstelle zwischen der Arbeitsablaufplanung (vgl. Kapitel 2.4.1) und dem Betriebsmittelbau. Dieser ist für die Konstruktion, Herstellung und Erprobung neuer Betriebsmittel zuständig [Eve97, S. 69ff.].

### **Produktionsprogrammbezogene Arbeitsmittelplanung**

Der Ausgangspunkt der Planung ist das herzustellende bzw. zu montierende Teilespektrum, das Produktionsprogramm oder auch Leistungsprogramm. Es wird aus wirtschaftlichen und strategischen Gründen festgelegt und definiert Kapazitätsbedarfe, Ausrüstungszahlen, Personalumfang, Flächen- und Medienbedarfe. Zudem determinieren die angestrebte Fertigungstiefe, Variantenvielfalt und Stückzahl die Planung. Das Ziel der produktionsprogrammbezogenen Arbeitsmittelplanung ist eine anforderungsgerechte Anordnungsstruktur der erforderlichen Betriebsmittel [Gru00, S. 73], [Eve97, S. 100ff.].

## **2.4.5 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik**

Den Ausgangspunkt der Arbeitsplanung bilden Stücklisten und Konstruktionszeichnungen des zu fertigenden Produktes. In dem Fachbereich der Arbeitsablaufplanung werden die Arbeitsschritte zur Fertigung der Einzelteile und zur Montage eines Produktes in Form des Arbeitsplanes festgelegt. Der Arbeitsplan enthält u. a. Angaben zur Arbeitsvorgangsfolge und den ausgewählten Fertigungsverfahren und bildet die Basis für die Arbeitsstätten-, Arbeitsmittel- und Materialflussplanung. Im Rahmen der Arbeit soll die integrative Konzipierung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme betrachtet werden. Die hierzu notwendigen Arbeitsschritte sollen in die Phase der Produkt- und Produktionssystemkonzipierung verschoben werden, um eine frühzeitige Rückspiegelung produktionstechnischer Restriktionen und Freiheitsgrade in das Produktkonzept zu realisieren.

## **2.5 Digitale Fabrik**

Für die Wirtschaftlichkeit und Rationalität von Fabriken ist eine effiziente Arbeitsvorbereitung eine Schlüsselkompetenz. Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik können die Arbeitsvorbereitung wirksam unterstützen [BSW+09, S. 528]. Der sich ergebende Nutzen als auch die Definition der Digitalen Fabrik nach VDI-Richtlinie 4499 werden in Kapitel 2.5.1 beschrieben. Die Digitale Fabrik unterstützt die Produktionssystementwicklung vom Entwurf bis zur Serienfertigung, u. a. mit 3D-CAD-, Mehrkörper- oder Materialfluss-Simulationen. Hierbei liegt der wesentliche Vorteil in der Evaluation der Lösungsalternativen bereits in der Planungsphase, welche in Kapitel 2.5.2 erläutert werden. Bild 2-9 zeigt die Unterstützung der Digitalen Fabrik in den einzelnen Konkretisierungsstufen der Planung eines Produktionssystems im V-Modell der VDI 2206. In der Regel sind mehrere Durchläufe des V-Modell-Makrozyklus notwendig und somit ein

iteratives Vorgehen für die Entwicklung des komplexen Produktionssystems [VDI2206, S. 30ff.]. Der operative Einsatz der Digitalen Fabrik wird in Kapitel 2.5.3 dargestellt.

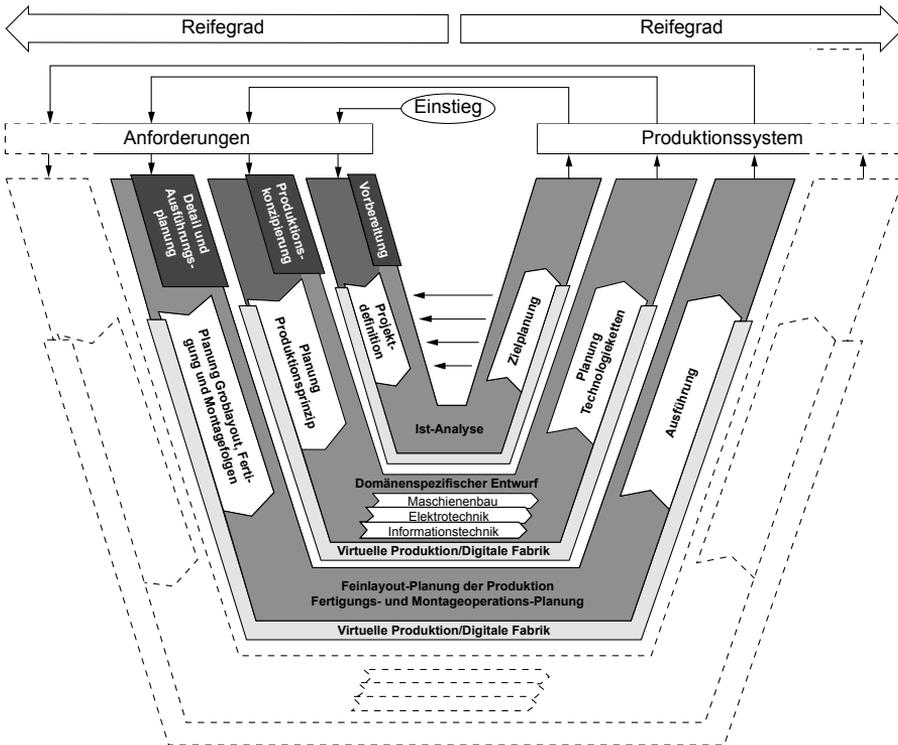


Bild 2-9: Iteratives Vorgehen bei der Produktionssystementwicklung [VDI2206, S. 44]

### 2.5.1 Definition und Nutzen

Die frühe Produktionssystemplanung und Gestaltung der Fabrik in Abstimmung mit allen Prozessen des Unternehmens ist das Hauptaugenmerk der Digitalen Fabrik [VDI4499, S. 3]. Verschiedene Ansätze führten jedoch zu einem unterschiedlichen Begriffsverständnis in der Praxis [BGW11, S. 9]. In Tabelle 2-1 werden die Haupt- und Nebenaspekte ausgewählter Ansätze nach ihrem Erscheinungszeitpunkt aufgelistet.

Tabelle 2-1: Begriffsverständnisse der Digitalen Fabrik nach [BGW11, S.10]

Autor	Hauptaspekte	Nebenaspekte
BLEY und FRANKE	Modellmanagement, Datenaustausch und Wissensmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mitarbeiterwissen</li> <li>▪ Produktmodell</li> <li>▪ Prozessmodell</li> <li>▪ Simulationssoftware</li> </ul>
DOMBROWSKI	Virtuell zu betreibendes Modell der realen Fabrik sowie rechnergestützte Abbildung aller Gestaltungsmerkmale und Prozesse der Fabrik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organisationsstruktur</li> <li>▪ Technische und bauliche Infrastruktur</li> <li>▪ Wissen</li> <li>▪ Geschäftsprozesse</li> </ul>
BRACHT	Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simulation und Visualisierung</li> <li>▪ Prozesse und Produktion</li> <li>▪ Virtuelle Inbetriebnahme</li> </ul>
WIENDAHL	Rechnermodell	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organisationsstrukturen</li> <li>▪ Logistische Prozesse</li> <li>▪ Gebäude / Technik / Betriebsmittel</li> <li>▪ Geschäftsprozesse</li> </ul>
WESTKÄMPER	Datenmodell	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organisation und Planungsworkflow</li> <li>▪ Datenbasis und -management</li> <li>▪ Visualisierung und Simulation</li> </ul>
WENZEL	Vernetzte digitale Modelle sowie Methoden und Werkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fabrikplanung und -betrieb</li> <li>▪ Prozesse und Arbeitsabläufe</li> <li>▪ Produkt- und Produktionsentstehungsprozess</li> </ul>
MARCZINSKI	Rechnergestützte Engineeringwerkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Methodenplanung</li> <li>▪ Fabrikplanung (Struktur, Werk)</li> <li>▪ Logistikplanung und Materialfluss</li> </ul>

Zur Einführung und Umsetzung der Methoden und Instrumente der Digitalen Fabrik wurde auf Basis der aufgezeigten Ansätze die VDI-Richtlinie 4499 entwickelt. Diese wendet sich an Entwickler, Entscheider, Anwender sowie Betreiber und definiert den Begriff Digitale Fabrik wie folgt:

*„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*

*Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ [VDI4499, S. 3].*

Der **Nutzen der Digitalen Fabrik** für Unternehmen liegt in der Planung, in der Anfertigung und Inbetriebnahme von Ressourcen sowie im Betrieb des Produktionssystems. Im Bereich der **Planung** ermöglicht die Digitale Fabrik bspw. eine ganzheitliche Planung von Produkt, Prozess und Ressourcen sowie den Einsatz neuer Planungsprozesse, die es

ermöglichen, die Planungskosten der Einzelprojekte zu senken. Der Aufbau von Modellen zur Simulation des kinematischen Anlagenverhaltens ermöglicht u. a. die Analyse von geplanten Steuerungsprogrammen in Form einer **virtuellen Inbetriebnahme**. In der **Betriebsphase** des Produktionssystems wird ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess bspw. mittels regelmäßiger Ablaufsimulationen realisiert. Aus **Gesamtunternehmenssicht** liegt der primäre Nutzen in einer beschleunigten Produkteinführung und den sich somit ergebenden Marktvorteilen [BGW11, S. 51ff.]. Zur Realisierung dieser Nutzenpotentiale werden organisatorische, technische und betriebswirtschaftliche Ziele verfolgt. Nach KÜHN und VDI 4499 sind dies: Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Verbesserung der Planungsqualität, Verkürzung der Produkteinführungszeit, transparente Kommunikation, Standardisierung von Planungsprozessen und kompetentes Wissensmanagement [Küh06, S. 5], [VDI4499, S. 9ff.].

## 2.5.2 Simulationsstudien

Im Rahmen der Digitalen Fabrik werden Simulationen zur Evaluierung der Planung und zur laufenden Verbesserung genutzt. Das prinzipielle Vorgehen der hierzu erforderlichen Simulationsstudien zeigt Bild 2-10. Aufgrund der teilweise überschneidenden Tätigkeiten der einzelnen Phasen sind diese eng miteinander verknüpft. Des Weiteren zeichnet sich das Vorgehen durch einen iterativen Prozess aus. Die jeweiligen Phasen können dementsprechend mehrfach durchlaufen werden [Küh06, S. 100]. Im Folgenden wird das Vorgehen sukzessive anhand der in Bild 2-10 dargestellten Bereiche erläutert.

### Vorbereiten

Der erste Schritt ist in jedem Fall die **Festlegung der zu erreichenden Ziele**. Diese müssen so konkret dargestellt werden, dass der Interpretationsspielraum möglichst gering ist und allen Projektbeteiligten die Zielstellung klar ist. Bei der Formulierung ist ein besonderer Fokus auf die Balance zwischen dem Aufwand der Datenerhebung und der Modellierung sowie dem zu erzielenden Mehrwert der Simulation zu legen. Das zu betrachtende System wird im Rahmen der ersten Überlegungen durch Systemgrenzen definiert. Die **Definition der Systemgrenzen** wird durch die Zielsetzung der Simulationsstudie determiniert. Hierdurch ergeben sich die Eingangs- und Ausgangsdaten, die für die Simulation notwendig sind. Aus den getroffenen Entscheidungen ergeben sich ein **Lastenheft** sowie ein Projektplan. Die **Datenbeschaffung** ist die abschließende Phase der Vorbereitung und erfolgt in dem zuvor definierten Umfang. Beispiele für zu beschaffende Daten sind: Geometriedaten, Bearbeitungszeiten, Störzeiten, Bearbeitungsreihenfolgen, Ablaufregeln, etc. [Küh06, S. 101ff.].

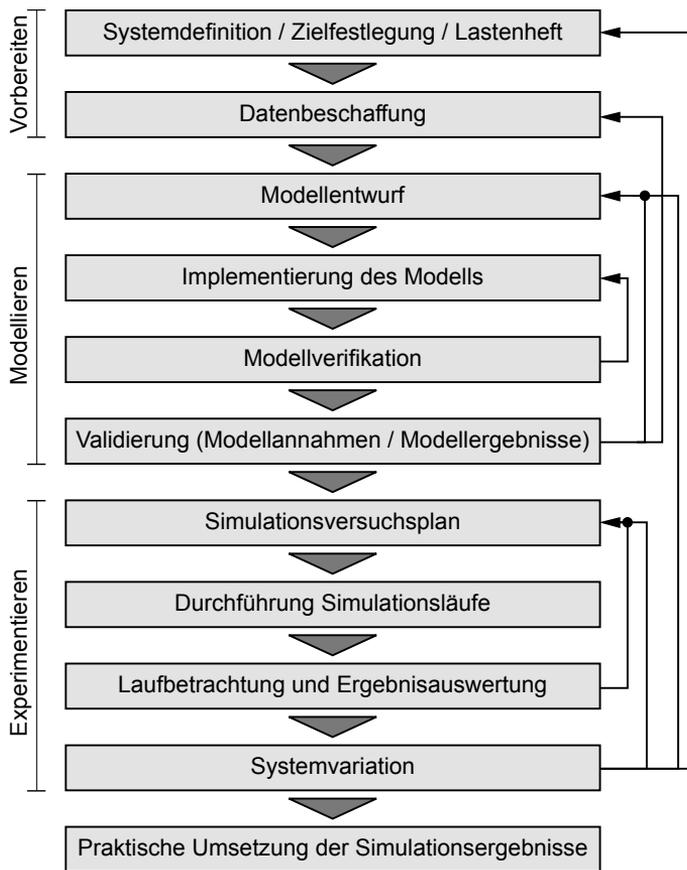


Bild 2-10: Genereller Ablauf von Simulationsstudien [Küh06, S. 100]

### Modellieren

Im Rahmen des **Modellentwurfes** wird zunächst ein konzeptionelles Modell erstellt. In dieser Phase werden die relevanten Systemzusammenhänge identifiziert und abgebildet. Des Weiteren wird ein anforderungsgerechter Detaillierungsgrad<sup>18</sup> des Modells ausgewählt und eine sinnvolle Separation in Teilmodelle vorgenommen. In der nächsten Phase wird das konzeptionelle Modell mittels der gewählten Simulationssoftware **implementiert**. Je nach eingesetzter Simulationssoftware kann sich der Aufwand dieser Phase stark unterscheiden. Die Phasen der **Verifikation** und **Validierung** dienen der Sicherstellung

<sup>18</sup> Detaillierungsgrad (Detaillierungstiefe): Maß für die Abbildungsgenauigkeit bei der Umsetzung des Systems in ein Modell [VDI3633, S. 6].

der korrekten Abbildung des realen Systems. Hierzu gehören neben der logischen Funktionalität auch die hinreichende Erfüllung der gestellten Anforderungen [Küh06, S. 104ff.].

### Experimentieren

Der Bereich Experimentieren unterteilt sich in vier Phasen. Zunächst werden in der **Simulationsversuchsplanung** Simulationsszenarien und eine sinnvolle Anzahl von Parametrisierungsvarianten definiert. Die notwendigen Simulationsläufe ergeben sich aus diesen Festlegungen und den zu wählenden Optimierungskriterien. Während und nach den **Simulationsläufen** werden der Prozessfortschritt und die Ergebnisse der Simulation betrachtet. Dies wird in der Phase **Laufbetrachtung und Ergebnisauswertung** subsumiert. Hierzu werden Animationen, Listen oder andere grafische Darstellungsformen genutzt. Zur Verbesserung des Systemverhaltens wird abschließend das betrachtete **System variiert**. Diese Verbesserungen betreffen bspw. Parameter oder Steuerungen des Systemmodells. In einem iterativen Prozess wird das Modell über die Schritte Simulationsversuchsplan, Simulationsläufe und Ergebnisauswertung verändert, bis das gewünschte Ergebnis erzielt wurde [Küh06, S. 111ff.].

### Realisieren

Ausgangspunkt dieser Phase sind die erzielten Simulationsergebnisse. Diese werden interpretiert und Änderungsbedarfe an Parametern, Steuerungen oder Strukturen des realen Systems identifiziert. Die Maßnahmen zur **praktischen Umsetzung** der Verbesserung des Systems werden definiert [Küh06, S. 120].

## 2.5.3 Operativer Einsatz

Die in der modernen Produktionssystemplanung verwendeten **Softwaresysteme der Digitalen Fabrik** lassen sich aufgrund ihres hohen Funktionsumfanges nicht trennscharf den in Kapitel 2.4 genannten Hauptaufgaben der Arbeitsplanung zuordnen [GP14, S. 364]. Ein gutes Beispiel stellt hier die *Siemens PLM Software*<sup>19</sup> dar. Diese beinhaltet bspw. die Bereiche Ergonomiesimulation und Layout-Planung (Arbeitsstättenplanung), Materialflusssimulation (Materialflussplanung) sowie Simulation von Zerspanungsprozessen (Arbeitsablaufplanung).

Die Digitale Fabrik ermöglicht u. a. die Simulation und Analyse des dynamischen Verhaltens im Rahmen der **operativen Produktionssystemplanung**. Hierzu wird die Simulationstechnik über Schnittstellen zu den ERP-, BDE- und MES-Systemen<sup>20</sup> in die ope-

---

<sup>19</sup> Weiterführende Informationen unter: <http://www.plm.automation.siemens.com>

<sup>20</sup> ERP = Enterprise Resource Planning, BDE = Betriebsdatenerfassung, MES = Manufacturing Execution System

rativen Prozesse des Unternehmens eingebunden. Das Ziel ist bspw. ein verbessertes Produktionsprogramm und somit eine bessere Feinplanung. Als Basis für die Simulation wird die aktuelle Situation des Produktionssystems verwendet. Im Rahmen der Simulationsläufe wird eine sinnvolle Reihenfolge der Auftragsbearbeitung festgelegt (*Sequencing*), eine Maschinenreihenfolge, die das Produkt durchlaufen soll, definiert (*Routing*) und ein zeitlicher und örtlicher Belegungsplan erstellt (*Scheduling*). Bild 2-11 zeigt die Beziehungen zwischen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) mit den Daten des realen Produktionssystems und den Simulationsmodellen [Küh06, S. 89ff.].

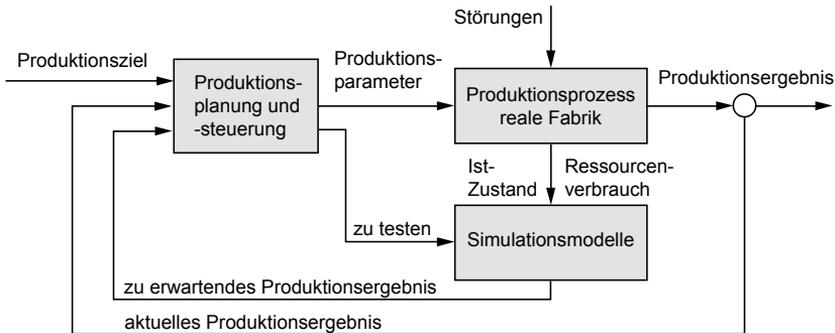


Bild 2-11: Einsatz von Simulation zur Unterstützung der operativen Produktionsplanung [Küh06, S. 90]

### 2.5.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Die Digitale Fabrik ist durch die Beschleunigung der Entwicklungs- und Planungszeiten ein potentieller Treiber der Verbesserung für Unternehmen. Die Grundvoraussetzung ist eine durchgängige Anwendung der Methoden und Softwarewerkzeuge der Digitalen Fabrik. Aktuelle Softwaresysteme bieten hierzu einen breiten Funktionsumfang in den verschiedenen Bereichen der Arbeitsplanung. Hohe Nutzenpotentiale der Digitalen Fabrik liegen insbesondere im operativen Bereich durch eine iterative Verbesserung von Produktionsprogrammen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Simulationswerkzeug zur dynamischen Materialflussanalyse genutzt werden, um ausgehend von den Produkt- und Produktionssystemdaten das Verhalten des Produktionssystems im operativen Bereich zu optimieren. Hierbei ist insbesondere auf die Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse in operative ERP-, BDE- und MES-Systeme des Unternehmens zu achten.

## 2.6 Auftragsabwicklungsprozess

Sämtliche Prozesse von der Angebotserstellung bis zum Versand hergestellter Produkte werden unter dem Begriff der Auftragsabwicklung zusammengefasst. Die Begriffe **Produktionsplanung und -steuerung (PPS)** sowie **Enterprise Resource Planning (ERP)** (vgl. Kapitel 2.6.1) sind oft synonym verwendete Überbegriffe für Methoden, Prozesse und Techniken, die mit diesem Aufgabenfeld einhergehen [GP14, S. 33f.]. Das Ziel ist

eine effektive Planung und Steuerung der Ressourcen innerhalb des Auftragsabwicklungsprozesses über alle beteiligten Fachabteilungen. Der Auftragsabwicklungsprozess wird durch Systeme zur Fertigungssteuerung auf Prozessebene unterstützt wie bspw. **Manufacturing Execution Systeme (MES)** (vgl. Kapitel 2.6.2).

### 2.6.1 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

PPS-Systeme bzw. ERP-Systeme bieten eine softwaretechnische Unterstützung für die folgenden fünf Aufgabenbereiche: Produktionsprogrammplanung, Mengenplanung, Termin- und Kapazitätsplanung, Auftragsveranlassung sowie Auftragsüberwachung. Dabei liegt der Fokus der Produktionsplanung auf der Festlegung, welches Produkt in welchem Zeitraum gefertigt werden soll. Grundlage für diese Entscheidung sind die vorhandenen Produktionskapazitäten. Die Produktionssteuerung veranlasst Aufträge periodengenau und steuert somit die Freigabe von Fertigungs- und Bestellaufträgen. Zudem überwacht sie den Status der Fertigungsaufträge anhand von konsolidierten Informationen aus BDE und MDE-Systemen, wie z. B. Bearbeitungsstände, Mengen und Zeiten [GP14, S. 34].

Der Übergang von der Produktionssteuerung und der damit verbundenen Aufgabe der Auftragsüberwachung und der Fertigungssteuerung ist fließend. Als Fertigungssteuerung wird der herstellprozessnahe Regelkreis verstanden, welcher der Produktionssteuerung unterlagert ist. Die Fertigungssteuerung ordnet die Aufträge vom PPS-System den Ressourcen zu und steuert die Herstellprozesse direkt im Detail. Dementsprechend agiert sie als Zwischenebene zwischen der planungsorientierten PPS und dem echtzeitabhängigen Herstellprozessen (Bild 2-12). Eine wichtige Fähigkeit der Fertigungssteuerung ist die Kompensation von Störungen im Fertigungsprozess. Ist die Fertigungssteuerung nicht in der Lage auf eine Störung zu reagieren, muss im Rahmen der PPS eine geeignete Lösung ermittelt werden [GP14, S. 35].

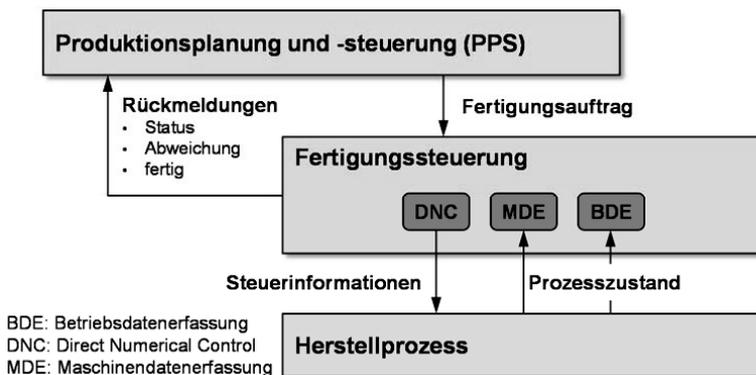


Bild 2-12: Hierarchischer Aufbau in der Auftragsabwicklung nach [GP14, S. 36]

Das verbindende Element zwischen der PPS und der Fertigungssteuerung sind Schnittstellen der Informationen, die den Status der Fertigungsaufträge an die PPS zurückmelden. Als Verknüpfung zwischen der Fertigungssteuerung und den Herstellprozessen werden verschiedene Systeme eingesetzt. Eine Direct Numerical Control versorgt die Fertigungseinrichtungen mit den benötigten NC-Programmen und verwaltet diese in einer zentralen Datenbank. Die relevanten Prozesszustände werden über die Maschinendatenerfassung und die Betriebsdatenerfassung in die Fertigungssteuerung zurückgeführt. Sie übermitteln Störungen und bilden die Grundlage für eventuell notwendige Reaktionen der Fertigungssteuerung [GP14, S.35].

### 2.6.2 Manufacturing Execution System (MES)

Manufacturing Execution Systeme sind in der Lage, direkt und indirekt wertschöpfende Geschäftsprozesse der Fertigung zu überwachen und zu regeln. Ein MES ist ein prozessnahes Fertigungsmanagementsystem und verbindet den Bereich der lang- und mittelfristigen Produktionsplanung und -steuerung und die Echtzeitanforderungen der Fertigung (Bild 2-13) [KD12, S. 17ff.], [GP14, S. 379f.].

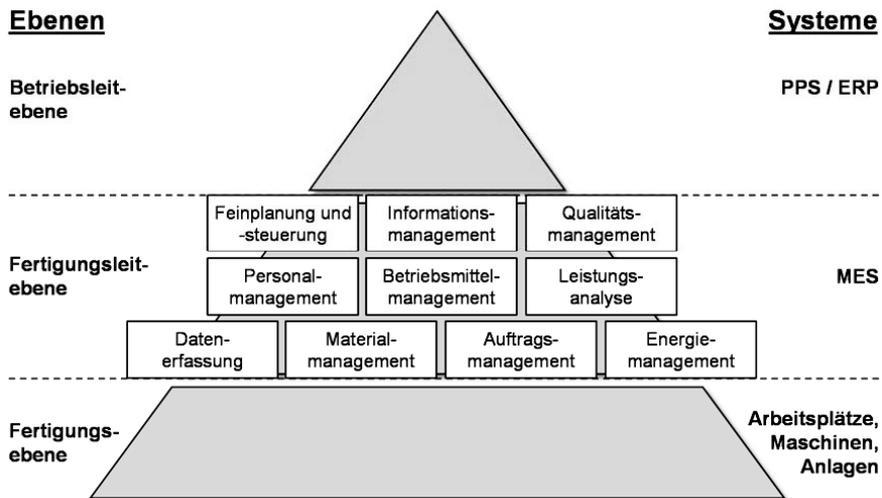


Bild 2-13: Aufgaben des Manufacturing Execution System nach [VDI5600, S. 8]

Verwendet werden Manufacturing Execution Systeme zur unmittelbaren Produktionsdurchführung, zur flexiblen Erfüllung der Kundenanforderungen sowie zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Fertigung durch gezielte Einflussnahme auf den Produktionsprozess. Dies erfordert die Aufnahme von Informationen wie bspw. die Materialverfügbarkeit, die Auslastung der Ressourcen oder die erreichte Produkt- bzw. Prozessqualität.

Auf Basis aller Informationen kann ein MES Reaktionen vorschlagen, die über Abweichungen zwischen Planvorgaben und Istzustand informieren. Darüber hinaus wirken sie sich aktiv auf den Prozess aus und verringern somit diese Abweichungen. Die erforderliche Geschwindigkeit, in denen ein MES agieren bzw. einen Informationsaustausch realisieren muss, ergibt sich aus den unterschiedlichen Zeithorizonten der Unternehmensebenen (Tabelle 2-2) und den Anforderungen der Anwendung [KD12, S. 19]. Der Nutzen von MES liegt in der präventiven Beeinflussung von Bedingungen im Produktionsprozess. Dies führt z. B. zu kürzeren Durchlaufzeiten, der Erhöhung der Termintreue oder der Senkung der Arbeitsvorbereitungsaufwände. Zudem unterstützt es die komplexen Operationen, die mit einem hohen Automatisierungsgrad der Produktionsanlagen einhergehen und schafft eine hohe Transparenz der Produktion [VDI5600, S. 4ff.].

*Tabelle 2-2: Zeithorizonte und Betrachtungsgegenstände in den Unternehmensebenen [VDI5600, S. 12]*

	<b>Zeit</b>	<b>Fristigkeit</b>	<b>Gegenstand</b>
<b>Betriebsleitebene</b>	Mehrere Tage bzw. Schichten	Mehrere Wochen bis Monate	Gesamtheit aller Aufträge
<b>Fertigungsleitebene</b>	Einige Sekunden bis eine Schicht	Eine bis mehrere Schichten	Ein bis mehrere Aufträge
<b>Fertigungsebene</b>	Millisekunden bis Sekunden	Sekunden bis einige Minuten	Einzelne Arbeitsgänge, Schritte

### 2.6.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Die Auftragsabwicklung in produzierenden Unternehmen wird durch Softwaresysteme wie PPS bzw. ERP und MES unterstützt. Diese Systeme ermöglichen die Planung und Steuerung der Produktion von der Betriebsleitebene bis hin zur Fertigungsebene. Sie sind jedoch nur begrenzt in der Lage, auf Störungen im Herstellprozess zu reagieren. Eine selbständige Reaktion auf zuvor unbekannte Störfälle oder ändernde Randbedingungen ist nicht möglich. Dies resultiert zum einen aus dem Mangel an entscheidungsrelevanten Informationen. Zum anderen lässt die aktuelle reaktive Planungslogik der Softwaresysteme dies nicht zu. Aktuell müssen solche Sonderfälle vom Produktionsplaner berücksichtigt, eine Lösungsstrategie entwickelt und in das Softwaresystem implementiert werden. Im Rahmen der Arbeit wird eine Systematik erarbeitet, die eine integrative Entwicklung einer selbstoptimierenden Produktionssystems ermöglicht. Die Steuerung des Produktionssystems ist in der Lage eigenständig auf sich ändernde Randbedingungen und unbekannte Störungen zu reagieren. Hierzu müssen u. a. die Zielvorgaben des Unternehmens klar definiert und strukturiert beschrieben werden. Die sich aus den Anforderungen

der Auftragseinlastung ergebenden notwendigen Arbeitsschritte werden in das Vorgehensmodell der zu erarbeitenden Systematik integriert.

## 2.7 Selbstoptimierende Systeme

**Selbstoptimierende Systeme** sind intelligente technische Systeme, die ihre internen Ziele selbstständig verändern und ihr Verhalten dementsprechend anpassen können. Dies wird durch intelligente Teilkomponenten der Informations- und Kommunikationstechnik ermöglicht [ADG+09, S. 5]. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn wurde folgende Definition für Selbstoptimierung erarbeitet:

*„Unter Selbstoptimierung (self-optimization) eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieses Systems verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren“ [ADG+09, S. 5]*

Gegenstand dieses Kapitels ist die Erläuterung des Wirkparadigmas der Selbstoptimierung. Im Folgenden werden hierzu zunächst in Kapitel 2.7.1 die Grundlagen eines selbstoptimierenden Systems beschrieben. In Kapitel 2.7.2 wird nachfolgend der Selbstoptimierungsprozess erläutert. Die Aspekte und die Struktur der Informationsverarbeitung eines selbstoptimierenden Systems werden in Kapitel 2.7.3 beschrieben. Kapitel 2.7.4 stellt den Nutzen der Selbstoptimierung im Kontext der Produktion dar.

### 2.7.1 Grundlagen eines selbstoptimierenden Systems

Im Sonderforschungsbereich 614 wurden selbstoptimierende Systeme als eine Weiterentwicklung mechatronischer Systeme definiert. Die Voraussetzung für ein **selbstoptimierendes System** ist eine Systemarchitektur, die eine Implementierung einer inhärenten Teilintelligenz ermöglicht. **Mechatronische Systeme** bieten diese Möglichkeit, da sie sich durch eine synergetische Kombination von mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden Elementen auszeichnen (Bild 2-14) [ADG+09, S. 2]. Sie bestehen aus einem **Grundsystem**, bspw. einer mechanischen oder elektromechanischen Struktur, **Sensoren**, die ausgewählte Zustandsgrößen des Grundsystems erfassen, der **Informationsverarbeitung**, welche die notwendigen Einwirkungen auf das Grundsystem ermittelt, um ein gewünschtes Verhalten zu realisieren und **Aktoren** zur Umsetzung der Einwir-

kungen auf das Grundsystem [VDI2206, S. 14f.]. Im Folgenden werden die Entwicklungsstufen von mechatronischen Systemen über adaptive Systeme hin zu Intelligenten Technischen Systemen erläutert.

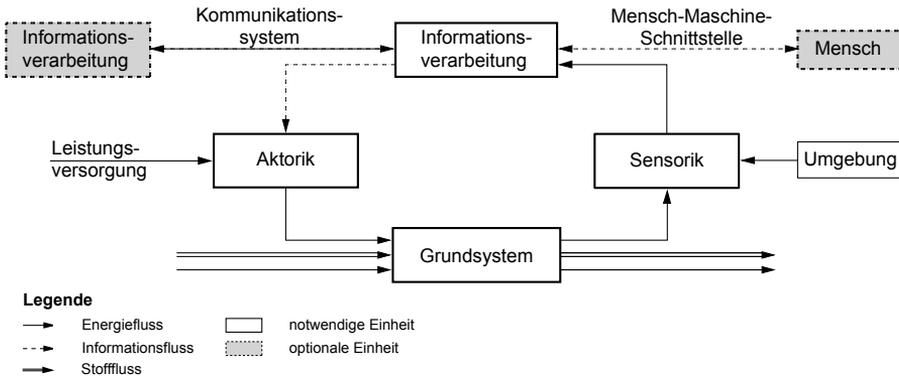


Bild 2-14: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206, S. 14]

**Mechatronische Systeme** zeichnen sich durch eine klassische Regelung zwischen der Sensorik und der Aktorik aus. Das gewünschte Verhalten des Systems wird bei der Entwicklung vorgedacht und in der Informationsverarbeitung implementiert. Hierzu werden die Einwirkungen der Aktorik (z. B. Ausfahren eines Pneumatikkolbens) unter bestimmten Bedingungen der erfassten Zustandsgrößen (z. B. Lichtschrankensignal = true und Luftdruck > 6 bar) definiert [GRS14, S. 3f.], [ADG+09, S. 27].

**Adaptive Systeme** basieren auf der grundsätzlichen Systemarchitektur eines mechatronischen Systems, nutzen jedoch **adaptive Algorithmen** im Rahmen der Informationsverarbeitung. Diese ermöglichen die Anpassung des Reglers in Abhängigkeit zu den vorliegenden Einflüssen oder der Strecke<sup>21</sup> und somit ein optimiertes Verhalten des Systems bezüglich eines festen Zieles (Bild 2-15). Hierzu ist ein Adaptionsverfahren für das angestrebte Ziel (z. B. minimaler Verbrauch) zu definieren, das die möglichen Systemsituationen berücksichtigt [GRS14, S. 4], [ADG+09, S. 27].

<sup>21</sup> Strecke: System, das durch gezielte Beeinflussung zu einem gewünschten Verhalten geführt wird [ADG+09, S. 27].

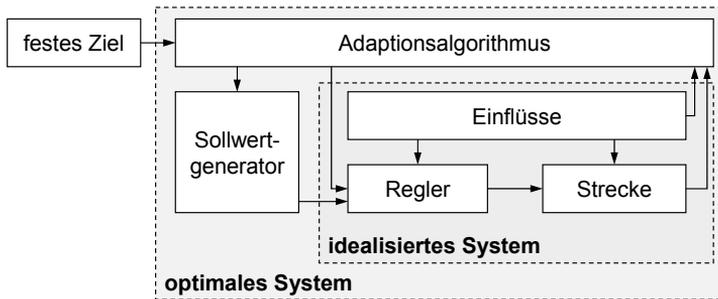


Bild 2-15: Adaptive Regelung eines Systems in Anlehnung an [BSK+06, S. 4674]

**Intelligente technische Systeme** besitzen Systemelemente mit einer inhärenten Teilintelligenz. Diese erfüllen kognitive Teilfunktionen wie bspw. erfahrungsbasiertes Lernen. Dementsprechend sind diese Systeme in der Lage ein selbstoptimierendes Verhalten zu realisieren. Die folgenden vier zentralen Eigenschaften charakterisieren Intelligente technische Systeme [DJG12, S. 24]:

#### Adaptiv

Systeme, die autonom handeln, sind in der Lage zu lernen und ihr Verhalten während der Laufzeit zu verändern. Dies ermöglicht ihnen autonom und flexibel auf sich ändernde Bedingungen zu reagieren [DJG12, S. 24f.].

#### Robust

Ein robustes System verhält sich auch in Situation, die nicht im Entwicklungsprozess berücksichtigt wurden, akzeptabel. Es kann in einem bestimmten Maße mit Unsicherheiten oder fehlenden Informationen umgehen [DJG12, S. 25].

#### Vorausschauend

Das Verhalten von vorausschauenden Systemen wird auf Basis von Erfahrungswerten angepasst. Sollte sich eine potentiell gefährdende Situation abzeichnen, kann das System dementsprechend adäquat reagieren [DJG12, S. 25].

#### Benutzungsfreundlich

Benutzungsfreundliche Systeme passen sich dem aktuellen Benutzer an. Im Fokus steht hierbei die Interaktion des Systems mit dem Benutzer zur Steigerung der Verständlichkeit des Systemverhaltens [DJG12, S. 25].

### 2.7.2 Selbstoptimierungsprozess

Der **Selbstoptimierungsprozess** erfolgt in drei Schritten: **1. Analyse der Ist-Situation**, **2. Bestimmung der Systemziele** und **3. Anpassung des Systemverhaltens**.

- 1) Zunächst wird die aktuelle Situation des Systems und der Umwelt des Systems erfasst. Die Erfassung der notwendigen Daten kann sowohl direkt als auch indirekt erfolgen. Beispielsweise können Daten indirekt über die Kommunikation mit anderen Systemen erfasst werden. Ein wesentlicher Schritt dieser Phase ist die Analyse des Erfüllungsgrades der Ziele des Systems [ADG+09, S. 6].
- 2) Die Systemziele werden ausgewählt, angepasst oder generiert. Die **Auswahl von Zielen** erfolgt aus einer endlichen Menge von inhärenten oder externen Zielen. Bei der **Anpassung von Zielen** werden die Ausprägungen bzw. die Gewichtungen von Zielen verändert. In dem Fall, dass Ziele unabhängig von bereits vorhandenen Zielen erzeugt werden, handelt es sich um eine **Generierung von Zielen** [ADG+09, S. 6].
- 3) In Folge einer Zielanpassung wird die **Verhaltensanpassung** eines selbstoptimierenden Systems durch eine **Anpassung der Parameter** bzw. falls notwendig, durch eine **Strukturanpassung** der unterliegenden Hierarchieebene des Systems realisiert (Bild 2-16). Im Fall der Strukturanpassung kann des Weiteren in **kompositionale Anpassung** und in **Rekonfiguration** unterschieden werden. Bei einer kompositionalen Anpassung werden Systemelemente ergänzt bzw. aktiviert und entfernt bzw. deaktiviert. Im Gegensatz dazu, wird bei einer Rekonfiguration eine neue Kombination der vorhandenen Systemelemente erzeugt. Damit einher geht die Modifikation der Beziehungen zwischen den verfügbaren Systemelementen [ADG+09, S. 6ff.].

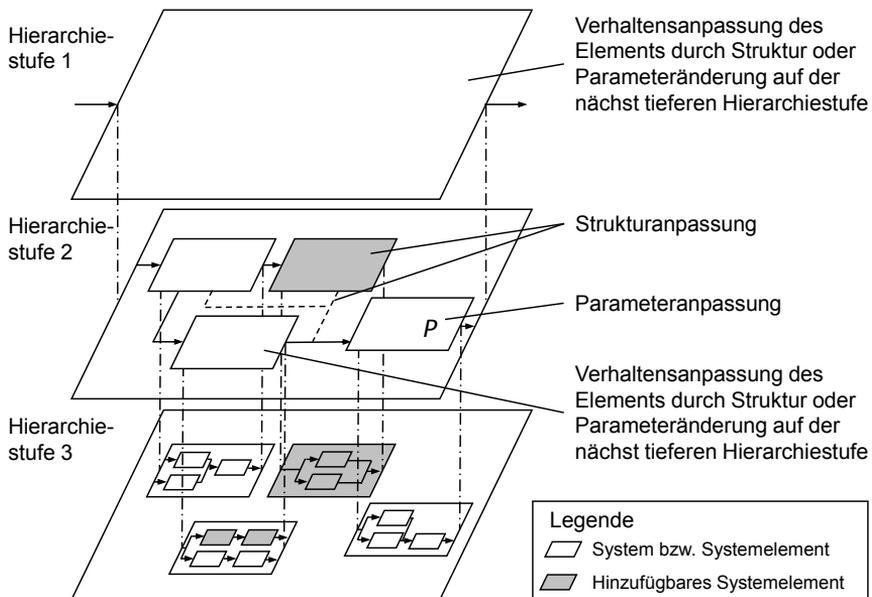


Bild 2-16: Verhaltensanpassung eines selbstoptimierenden Systems nach [ADG+09, S. 7]

### 2.7.3 Aspekte der Selbstoptimierung und Struktur der Informationsverarbeitung

Selbstoptimierende Systeme zeichnen sich durch verschiedene Aspekte aus. Diese Aspekte sowie die Struktur der Informationsverarbeitung werden im Folgenden erläutert. Die Zusammenhänge der Aspekte werden durch das Bild 2-17 am Beispiel eines Fahrwerks verdeutlicht. Ein **System** besteht aus Elementen, die wiederum selbst als System angesehen werden können (vgl. Kapitel 2.1.1). Die einwirkenden **Einflüsse auf das System** können ihren Ursprung im **Umfeld** des Systems, im **Benutzerverhalten** und dem **System** selbst haben. Einflüsse, die das System ungewollt behindern, werden als Störgrößen bezeichnet. Zudem werden nicht vorhersehbare bzw. unstrukturierte Einflüsse und geplante bzw. gezielte Einflüsse unterschieden [ADG+09, S. 8f.].

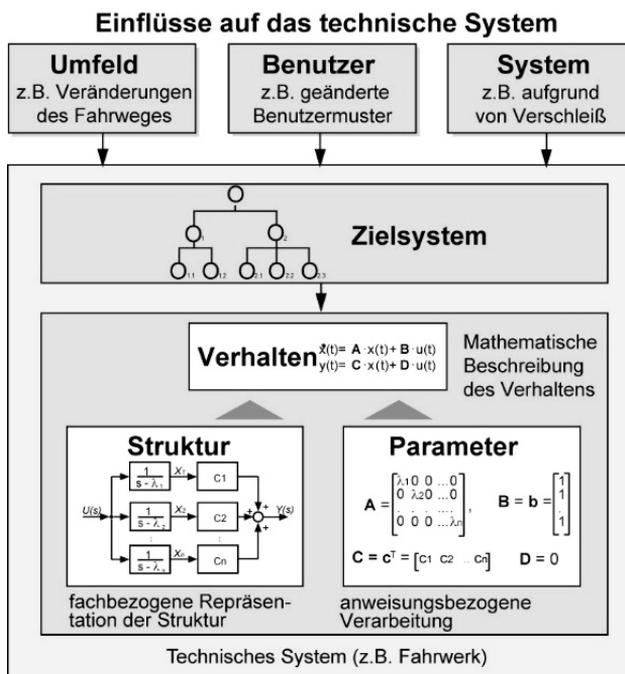


Bild 2-17: Aspekte eines selbstoptimierenden Systems nach [FGK+04, S. 18]

Im Allgemeinen ist ein **Zielsystem** eine Menge von miteinander in Beziehung stehenden Zielen. Dabei können Ziele in intern, extern und inhärent unterschieden werden. Falls in einem Zielsystem Ordnungsbeziehungen (Priorisierung von Zielen, Dekomposition in Teilziele) existieren, handelt es sich um eine Zielhierarchie, andernfalls um einen Zielvektor aus einer einfachen Menge von Zielen. Mittels eines Zielgraphen lassen sich komplexe Zusammenhänge von Zielen darstellen [FGK+04, S. 29f.]. Das **Verhalten** eines Systems umfasst alle Aktionen des betrachteten Systems in einer bestimmten Situation und wird

durch das interne Zielsystem bestimmt. Anpassungen des Verhaltens können mittels **Struktur- oder Parameteranpassungen** realisiert werden [ADG+09, S. 8f.].

### Struktur der Informationsverarbeitung

Das sogenannte **Operator-Controller-Modul (OCM)** (Bild 2-18) wurde von NAUMANN [Nau00] zur übersichtlichen Aufbereitung der Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme eingeführt. Es bietet die Möglichkeit die Aufgaben der Informationsverarbeitung sinnvoll zu strukturieren. Zu den Aufgaben gehören bspw. ein quasi-kontinuierlich arbeitender Regelungscode zur Regelung der Strecke oder Adaptionalgorithmen zur Anpassung der Regelung an veränderte Umgebungszustände [ADG+09, S. 13].

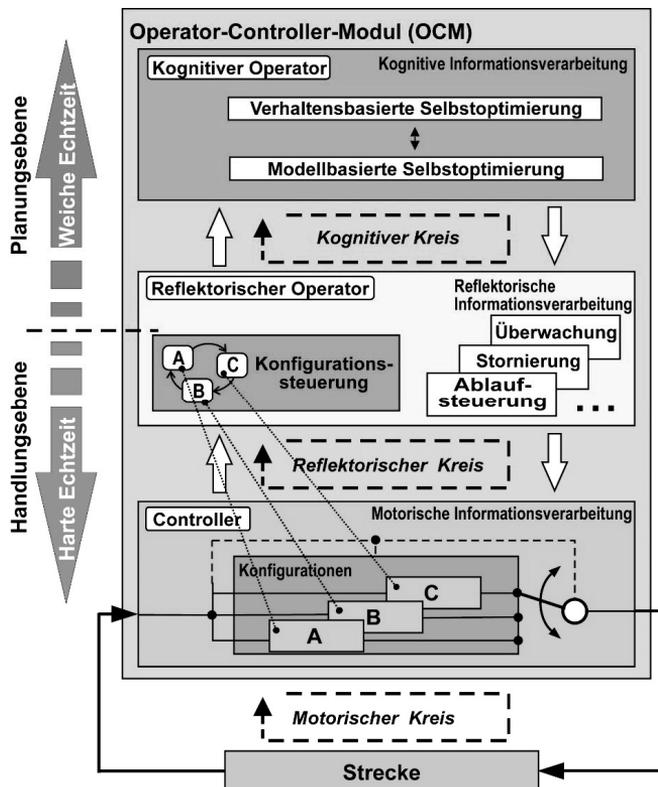


Bild 2-18: Struktur des Operator-Controller-Moduls nach [FGK+04, S. 46]

Das OCM teilt sich in drei Ebenen, den Controller, den reflektorischen Operator und den kognitiven Operator. Der **Controller** liest und verarbeitet Messsignale kontinuierlich und gibt diese unter Echtzeitbedingungen aus (motorischer Kreis). Zudem beeinflusst er gezielt das Verhalten des Systems, um die gewünschte Dynamik einzustellen. Der **reflektorische Operator** hat die Aufgabe, den Controller zu überwachen und zu steuern (reflektorischer Kreis). Zudem liefert er Messwerte an den kognitiven Operator und nimmt

Ergebnisse von diesem entgegen (kognitiver Kreis), um sie in die Controller Ebene einzubringen. Er initiiert Parameter- oder Strukturänderungen, indem er Konfigurationen an den Controller weitergibt und passt das Verhalten des Systems dementsprechend nicht direkt über die Sensorik oder Aktorik des Systems an. Des Weiteren ist der reflektorische Operator das Verbindungselement zwischen den Echtzeit erforderndem Controller und den nicht echtzeitfähigen Elementen. Kognitive Fähigkeiten, die eine individuelle Selbstoptimierung erlauben, sind der Fokus des **kognitiven Operators**. Hier kommen bspw. Planungs- und Lernverfahren, modellbasierte Optimierungsverfahren oder wissensbasierte Systeme zum Einsatz. Lediglich der kognitive Operator hat die Möglichkeit, im Rahmen des Operator-Controller-Modul unter weicher Echtzeit zu agieren [ADG+09, S. 14ff.].

Im Rahmen der Produktion stellt das OCM die Basis einer neuartigen Struktur der Informationsverarbeitung einer Fertigungssteuerung dar. Innerhalb eines Produktionssystems kann auf der Ebene des **Controllers** die Auswahl geeigneter Wege des Produktes durch die Bearbeitungsmaschinen der Fertigung durchgeführt werden. Die aktuelle Auftragslage und der Zustand des aktuellen Produktionssystems bilden hierbei die Entscheidungsgrundlage. Der **reflektorische Operator** erfüllt Funktionen der Ablaufsteuerung, Stornierung und Überwachungsprozesse. Somit steuert und überwacht der reflektorische Operator den Controller und modifiziert diesen anhand von Parameter- und Struktur Anpassungen (vgl. Kapitel 2.7.4). Die kognitive Informationsverarbeitung der relevanten Informationen des Produktionssystems findet im **kognitiven Operator** statt und realisiert die Selbstoptimierung [GIK12, S. 63].

#### 2.7.4 Selbstoptimierung im Kontext der Produktion

Im Kontext der Produktion wird in der Praxis oftmals der Begriff der Optimierung fälschlicherweise gleichgesetzt mit einer klassischen Regelung oder Steuerung des Produktionssystems. Dabei werden lediglich Systeme zur Regelung bzw. Steuerung des Systemverhaltens durch externe Zielparameter verwendet. **Selbstoptimierung** geht weit über diese klassischen Regelkreise hinaus. SCHMITT ET AL. und BRECHER [SB07], [SLW+10], [Bre11] definieren auf Basis der Vorarbeiten von GAUSEMEIER ET AL. [FGK+04], [ADG+09] den Begriff „Selbstoptimierende Produktionssysteme“ wie folgt:

*„Unter dem Begriff „Selbstoptimierende Produktionssysteme“ wird ein Konzept verstanden, das wertstromorientierte Maßnahmen bei gleichzeitig steigender Planungseffizienz umsetzt und dabei die Qualität der Prozesse und Produkte verbessert. Dabei wird bereits erworbenes Wissen wieder verwendet und auf ähnliche, neue Produktionsfälle übertragen. Selbstoptimierung bietet neue Sichten auf Fertigungs- und Montagesysteme, indem sowohl in technologische als auch in organisatorischen Bereichen eine dynamische Anpassung des Systemverhaltens an veränderliche Ziele ermöglicht wird“ [SB07, S. 520].*

Zur Realisierung der selbstständigen Ziel- und Verhaltensanpassung ist eine interne Produktionssystemstruktur erforderlich, die eine **Erfassung der Ist-Situation**, die **Bestimmung der Ziele** und die **Anpassung des Verhaltes** ermöglicht. Als Kern eines solchen Produktionssystems werden kognitive Mechanismen auf Computersystemen verwendet, die in der Lage sind, auf Basis von erfassten Informationen, selbstständig Entscheidungen zu treffen und aus ihrem eigenen Verhalten zu lernen. Diese Systeme sind in der Lage, die vielschichtigen Abhängigkeiten von komplexen Prozessen in der Produktion zu interpretieren und analysieren [Bre11, S.750].

Die endogene Anpassung des Zielsystems eines Produktionssystems verursacht eine autonome Anpassung des Verhaltens des Produktionssystems. Ein zweidimensionales Zielsystem könnte aus den Zielen maximiere Ausbringungsmenge und minimiere Energieverbrauch bestehen. Der Auslöser für eine endogene Anpassung des Zielsystems ist die Veränderung der Einflüsse, die auf das Produktionssystem wirken. Beispiele für Einflüsse sind hierbei der Energiepreis oder die aktuelle Auftragslage. So könnte bspw. die Erhöhung des Energiepreises dazu führen, dass innerhalb des Zielsystems das Ziel minimiere Energieverbrauch priorisiert wird. Die Verhaltensanpassung wird innerhalb eines Produktionssystems über Parameter- und Strukturanpassungen realisiert. Eine Parameteranpassung erfolgt über das gezielte verwenden von Bearbeitungsprogrammvarianten. Die Bearbeitungsprogramme beinhalten bspw. Varianten mit einem geringen Energieverbrauch durch geringe Prozessgeschwindigkeiten (z. B. Vorschub und Drehzahl). Eine Strukturanpassung geht mit der Änderung der Bearbeitungsabfolge durch die Ressourcen der Produktion einher [GIK12, S. 62].

### **Nutzenpotential**

Der **Nutzen einer situationsabhängigen Ziel- und Verhaltensanpassung** lässt sich an dem Polylemma der Fertigungssteuerung darstellen. Bild 2-19 zeigt die Zielkonflikte des Polylemmas zwischen Leistung, Durchlaufzeiten, Kosten und Termintreue in Abhängigkeit vom Bestand. Es ist nicht möglich einen gemeinsamen optimalen Betriebspunkt für alle dargestellten Verläufe zu definieren. Vielmehr ist es notwendig, den aktuellen Betriebszustand je Situation zu erfassen, die Priorisierung der Ziele dementsprechend anzupassen und somit ein optimiertes Verhalten des Produktionssystems zu gewährleisten [Wie14, S. 266 f.].

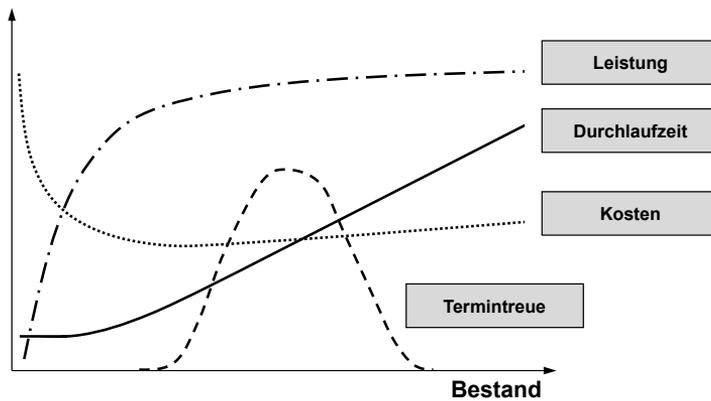


Bild 2-19: Zielkonflikte in der Produktion nach [Wie14, S. 266]

Die situationsabhängige Anpassung der Ziele beeinflusst das Verhalten des Produktionssystems und somit wiederum den Erfüllungsgrad der Ziele. Es entsteht eine komplexe Kette von Wirkzusammenhängen. Die Realisierung eines optimierten Produktionssystemverhaltens setzt dementsprechend Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen selbst und dem Verhalten des Produktionssystems voraus. Dies bedingt zum einen eine detaillierte Planung des beabsichtigten Verhaltens in Abstimmung mit den Zielen. Zum anderen sind Simulationsmodelle zur Absicherung des geplanten Verhaltens im Rahmen der Produktionssystementwicklung erforderlich. Des Weiteren werden situationsabhängige Analysen benötigt zur Bewertung von Verhaltensmodifikationen in der Betriebsphase des Produktionssystems [Wie14, S. 250ff.], [Bre15, S. 3ff.].

Eine Kombination von planungsorientierten und wertstromorientierten Ansätzen lässt es zu, Entscheidungen situationsabhängig zu treffen. Planungsorientierte Vorgehen ermöglichen Aussagen anhand von detaillierten Modellen der aktuellen Produktion. Wertstromorientierte Ansätze hingegen verlagern spezifische Planungsinhalte in den situationsabhängigen wertschöpfenden Prozess. Die Voraussetzungen für eine autonome Entscheidungsfindung sind die Identifikation der zu beeinflussenden Parameter und exakte Modelle der Produktionsprozesse [Bre11, S. 748f.].

### 2.7.5 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Selbstop Optimierung bietet die Möglichkeit, lernende Produktionssysteme mit einer inhärenten Intelligenz zu realisieren, die in der Lage sind, selbstständig auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren. Das Nutzenpotential in der Produktion liegt in der situationsabhängigen Anpassung des Verhaltens und somit in dem Umgang mit schwer vorherzusehenden Einflüssen, Störungen und Ähnliches. In verschiedenen Arbeiten steht die Umsetzung selbstop optimierender Systeme in der Produktion im Vordergrund. Ein durch-

gängiges Vorgehen, das es Unternehmen ermöglicht, ein selbstoptimierendes Produktionssystem auf Basis einer konkreten Neuentwicklung eines Produktes zu realisieren, besteht jedoch nicht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Wirkparadigma der Selbstoptimierung als zentraler Aspekt zur Planung intelligenter Produktionssysteme genutzt. Mit Hilfe der zu entwickelnden Systematik soll ein Planer in die Lage versetzt werden, ein selbstoptimierendes Produktionssystem zu entwickeln. Im Fokus steht hierbei ein Vorgehensmodell, das eine schrittweise Anleitung bereitstellt, um auf Basis der Prinziplösung eines herzustellenden Produktes, ein Produktionssystem mit selbstoptimierenden Verhalten zu entwickeln.

## 2.8 Problemabgrenzung

Produzierende Unternehmen müssen sich heute kürzer werdenden Produktlebenszyklen, volatilen Märkten und einem steigenden Kostendruck stellen [Bre15, S. 1]. Als Folge werden die Zeiträume für die Entwicklung komplexer Produkte und der zugehörigen Herstellprozesse immer geringer [AR11, S. 34]. Der Faktor Flexibilität gewinnt stetig an Bedeutung, da Unternehmen immer mehr auf spezifische Kundenwünsche eingehen müssen, um am Markt zu bestehen [Wie14, S.15]. Der Zeit- und Innovationsdruck steigt vor diesem Hintergrund im Bereich der Produkt- und Produktionssystementwicklung im hohen Maße an [GLR+00, S.12].

Ein selbstoptimierendes Produktionssystem ist in der Lage, seine aktuelle Situation zu ermitteln, seine Ziele selbständig anzupassen und sein Verhalten dementsprechend anzupassen. Insbesondere im Rahmen der Produktionslogistik stellt das Wirkparadigma der Selbstoptimierung daher ein hohes Nutzenpotential dar [Bre15, S. 797]. Zur Erschließung dieses Potentials bedarf es jedoch eines systematischen Vorgehens, das die Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystems ermöglicht.

Der Lösungsansatz für die erläuterte Problematik besteht in der **integrativen Entwicklung von Produkt und selbstoptimierendem Produktionssystem**. Dies bedarf einer systematischen Beschreibung der Entwicklungs- und Planungsprozesse, die Methoden und Arbeitstechniken strukturiert. Das grundlegende Vorgehen hierzu bildet das 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER (vgl. Kapitel 2.2). Die integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung (vgl. Kapitel 2.3) wird als Rahmenwerk verwendet und um notwendige Inhalte zur Entwicklung eines selbstoptimierenden Produktionssystems erweitert. Dies bietet folgende **Nutzenpotentiale**:

- Die **Beeinflussung des Produktkonzepts durch Produktionsrestriktionen und Eigenschaften der Produktionstechnologien wird frühzeitig berücksichtigt**. Produktionsrestriktionen werden maßgeblich von Fakten wie z. B. dem Bauraum einzelner Fertigungsmittel als auch von dem Verhalten des gesamten Produktionssystems determiniert. Hierzu zählt bspw. die erreichbare Stückzahl des geplanten Produktionssystems je Schicht oder die minimale Losgröße. Innovative Pro-

duktionstechnologien ermöglichen neuartige Produktkonzepte und erweitern somit die Freiheitsgrade in der Produktentwicklung. Zudem werden die Freiheitsgrade der Entwicklung kundenindividueller Produkte durch die Flexibilität der Produktion bestimmt. Die frühzeitige Berücksichtigung neuer Freiheitsgrade als auch der Produktionsrestriktionen vermeidet zeit- und kostenintensive Iterationen in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses.

- Die **Berücksichtigung des Verhaltens des Produktionssystems ermöglicht die Absicherung des Produktionssystemkonzeptes**. Durch die frühzeitige Beschreibung des beabsichtigten Verhaltens des Produktionssystems werden Wirkzusammenhänge der Fertigungssteuerung sichtbar und Grenzen des Produktionssystemkonzeptes analysierbar. Die Verwendung eines Simulationstools zur dynamischen Materialflussanalyse ermöglicht die Abbildung und Analyse des geplanten Verhaltens des Produktionssystemkonzeptes im Sinne der Digitalen Fabrik. Es ermöglicht bspw. Aussagen zu erreichbaren Stückzahlen des geplanten Produktionssystems bereits in einer frühen Phase der Produktentstehung.
- Eine **selbstoptimierende Produktion**<sup>22</sup> ermöglicht die **eigenständige Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse** sowie das Lernen identifizierter Reaktionsstrategien. Als Entscheidungsgrundlage für eine Optimierung werden Produktionssystemdaten, Kunden- und Auftragsprioritäten ebenso wie das Zielsystem des Unternehmens berücksichtigt. Somit ist das System in der Lage, auch langfristig die bestmögliche Lösung aus Sicht der Unternehmensstrategie zu treffen. Diese Fähigkeit steigert die Flexibilität der Produktion, da das selbstoptimierende Produktionssystem zu dem robusten Umgang mit Störungen ebenfalls auf die Volatilität der Märkte reagieren kann.

Basierend auf der potentiellen Erweiterung der Freiheitsgrade in der Produkt- und Produktionssystementwicklung durch ein selbstoptimierendes Produktionssystems, muss die Planung des Verhaltens der Produktion in der frühen Phase der Produktentstehung erfolgen. Zur Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems reicht der Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle in der integrativen Produktionssystemplanung aktuell nicht aus. Es ergibt sich das in Bild 2-20 dargestellte Handlungsfeld. Eine geeignete Ausgangslage für eine integrative Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme stellen die Informationen der Prinziplösung des Produktes dar.

---

<sup>22</sup> An dieser Stelle wird der Begriff Produktion verwendet, da der Ansatz der Selbstoptimierung nicht lediglich auf die Steuerung der Herstellungsprozesse (Fertigung) beschränkt, sondern weitere Aspekte wie bspw. die Ziele des Unternehmens oder die Kundenpriorität berücksichtigt. Die Optimierung betrifft dementsprechend Aspekte in weiteren Funktionsbereichen wie bspw. der Produktplanung oder der Arbeitsvorbereitung. Aus diesem Grund wird übergreifend der Begriff selbstoptimierendes Produktionssystem verwendet, wenn es sich nicht explizit um die selbstoptimierende Fertigungssteuerung handelt.

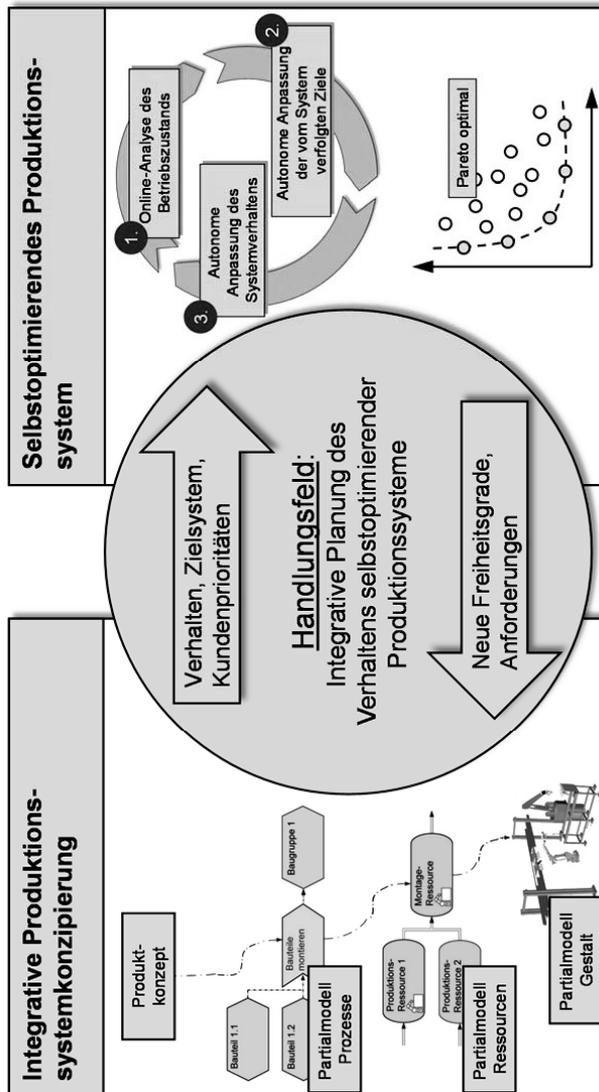


Bild 2-20: Handlungsfeld integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme

Die Partialmodelle des Produktionssystemkonzeptes Prozesse, Ressourcen und Gestalt werden im Wechselspiel mit dem Produktkonzept entwickelt. Sie enthalten Informationen wie die grundsätzliche Prozessfolge, Prozessparameter oder die Ausprägung der Produktionsstruktur. Das Produktionssystemkonzept beinhaltet jedoch nicht alle notwendigen Informationen zur Entwicklung eines selbstoptimierenden Produktionssystems, es bestehen aktuell folgende **Defizite**:

- **Verhalten:** Die Beschreibung des Verhaltens eines Produktionssystems wird im Rahmen der integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nicht betrachtet. Somit ist es nicht möglich, die Steuerung eines Produktionssystems zu konzipieren. Des Weiteren ist eine simulative Absicherung des Produktionssystemkonzeptes lediglich rudimentär möglich, da die dynamischen Zusammenhänge, die sich aus dem Gesamtverhalten des Produktionssystems ergeben, nicht abbildbar sind.
- **Ziele:** Ein selbstoptimierendes Produktionssystem agiert im Hinblick auf ein Zielsystem, welches situationsabhängig angepasst werden kann. Die initiale Definition eines Zielsystems und der Zielgewichtung des Unternehmens wird im Rahmen der integrativen Produktionssystemkonzipierung jedoch nicht adressiert.
- **Kundenbeziehung:** Die Analyse von Kundenprioritäten und Auftragsprioritäten ist aktuell nicht Gegenstand der integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Für eine selbstoptimierende Produktion ist eine strategische Betrachtung der Kundenbeziehungen jedoch notwendig zur langfristig bestmöglichen Bedienung der Auftragsanfragen.

Es stellen sich folgende **Forschungsfragen** vor diesem Hintergrund:

- **Wie kann ein selbstoptimierendes Produktionssystem integrativ entwickelt werden?** Es ist zu klären, welche Informationen des Produktionssystemkonzeptes zu verwenden sind und welche zusätzlichen Informationen benötigt werden. Zudem sind die Synchronisierungspunkte im integrativen Entwicklungsprozess zu definieren.
- **Wie kann das Verhalten der Produktion spezifiziert werden?** Das Verhalten der Produktion beschreibt die Steuerung der Fertigung und weitere Aspekte. Es ist festzulegen, wie die notwendigen Inhalte spezifiziert werden. Hierbei ist insbesondere auf die Anforderungen der Modellbildung zu achten.
- **Wie können Zielvorgaben der Produktion im Entwicklungsprozess beschrieben werden?** Selbstoptimierende Systeme unterscheiden zwischen internen, externen und inhärenten Zielen. Die Beschreibung eines Zielsystems erfordert zudem die Definition von Zieldimensionen und Zielbeziehungen.
- **Wie können Kundenbeziehungen ganzheitlich berücksichtigt werden?** Die Unternehmenssicht ist maßgeblich für die Priorisierung von Kunden und besonders profitablen Aufträgen, sowohl lang- als auch kurzfristige Auswirkungen kommen hier zum Tragen. Es ist festzulegen, wie die Priorisierung von Kunden und Aufträgen durchzuführen ist.

Aus der beschriebenen Problemstellung wird deutlich, dass der **Bedarf** für eine *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens von selbstoptimierenden Produktionssystemen* besteht. Die Systematik soll Unternehmen bei der Entwicklung eines selbstoptimierenden Produktionssystems unterstützen und sich in das Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem einordnen. Gemäß der Definition in Kapitel 2.1.2 sollte eine Systematik aus einem Vorgehensmodell sowie dedizierten Hilfsmitteln bestehen.

## 2.9 Anforderungen

Auf Basis der Problemanalyse werden die im Folgenden dargestellten Anforderungen an die *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens von selbstoptimierenden Produktionssystemen* gestellt.

### A1) Einordnung in die integrative Produktionssystemplanung

Zur integrativen Planung von Produktionssystemen (vgl. Kapitel 2.3) existiert eine etablierte Methodik. Diese basiert auf dem 3-Zyklen-Modell von GAUSEMEIER ET AL. (vgl. Kapitel 2.2) und wurde von NORDSIEK in Form einer Systematik [Nor12] definiert. Insbesondere ist der integrative Charakter der Produkt- und Produktionssystementwicklung zu berücksichtigen, dies schließt ein iteratives Vorgehen mit ein.

### A2) Prinziplösung als Ausgangspunkt

Der Aufwand und die Kosten für Änderungen im Produktentstehungsprozess steigen in dessen Verlauf exponentiell an. Zugleich sinkt die Beeinflussbarkeit der Produkteigenschaften (vgl. Kapitel 1.1, Kapitel 2.2). Daher muss der Ausgangspunkt der Systematik und somit der Startpunkt der Entwicklung des Produktionssystems das Produktkonzept in der Form der Prinziplösung sein.

### A3) Verhaltensbeschreibung in der Produktionssystemkonzipierung

Die Abhängigkeiten zwischen dem Produktionssystemkonzept und der Steuerung des Produktionssystems müssen für den Planer erkennbar sein. Die Grundlage für die Programmierung einer Steuerung ist das Verhalten des Produktionssystems. Hier sind in der Konzipierungsphase Zusammenhänge zu beschreiben, die definieren, unter welchen Bedingungen die Produkte oder Halbzeuge auf den geplanten Ressourcen gefertigt werden (vgl. Kapitel 2.5.2). Das Verhalten des Produktionssystems soll mit einem bedarfsgerechten Beschreibungsmittel allgemeinverständlich spezifiziert werden.

### A4) Abbildung der Zielvorgaben der Produktion

Mögliche Zielkonflikte in der Produktion ergeben sich aus konkurrierenden Zielvorgaben, wie bspw. minimiere Kosten und maximiere Leistung (vgl. Kapitel 2.7.4). Zur Lösung solcher Konflikte durch ein selbstoptimierendes System müssen die Ziele der Produktion in einem Zielsystem beschrieben werden (vgl. Kapitel 2.7.3). Die Beschreibung

des Zielsystems muss hierarchisch erfolgen und logische Verknüpfungen aufweisen. Ein bedarfsgerechtes Beschreibungsmittel soll genutzt werden, um die Ziele der Produktion in einem Zielsystem allgemeinverständlich zu spezifizieren.

#### **A5) Unternehmerische Rahmenbedingungen berücksichtigen**

Ein selbstoptimierendes Verhalten des Produktionssystems setzt voraus, dass alle notwendigen Zusammenhänge bekannt sind, um selbstständige Entscheidungen treffen zu können (vgl. Kapitel 2.7.4). Hierzu zählen neben Produktionsdaten und den Zielvorgaben der Produktion insbesondere die Kundenbeziehungen des Unternehmens und Relevanz der aktuellen Aufträge. Diese Informationen müssen analysiert und in einer Form abgebildet werden, die es ermöglicht, einzelne Kunden und Aufträge in einem Entscheidungsfall zu priorisieren.

#### **A6) Absicherung des Produktionssystemkonzeptes**

Das gesamte Produktionssystemkonzept muss analysierbar abgebildet werden. Hierzu ist ein Simulationswerkzeug zu verwenden, das es ermöglicht, das Produktionssystemkonzept in der frühen Phase der Produktentstehung zu evaluieren. Dies ermöglicht erste Aussagen über die Leistungsfähigkeit des geplanten Produktionssystems und deckt frühzeitig eventuelle Fehler auf (vgl. Kapitel 2.5.1).

#### **A7) Systematische Vorgehensweise**

Ein Vorgehensmodell muss sicherstellen, dass Entwickler und Planer die Entwicklungsschritte entsprechend der Vorgaben der Systematik durchlaufen (vgl. Kapitel 2.1.2). Dies gewährleistet ein systematisches Vorgehen im Produktentstehungsprozess, obwohl dieser durch Iterationen geprägt ist.

#### **A8) Systemtechnische Umsetzung**

Die Systematik soll die Planung und die Umsetzung eines selbstoptimierenden Produktionssystems in heterogenen Unternehmensstrukturen ermöglichen. Aktuell steuern die meisten Unternehmen ihre Fertigung mittels Manufacturing Execution Systems (MES) oder anderen automatisierten Systemen (vgl. Kapitel 2.6.2). Viele kleine und mittlere Unternehmen steuern die Fertigung jedoch weitestgehend manuell. Vor diesem Hintergrund ist eine Lösung erforderlich, die gleichermaßen auf die Bedürfnisse von manuell- und automatisiert-steuernden Unternehmen zutrifft.



### 3 Stand der Technik

Im Rahmen der Problemanalyse wurden die Rahmenbedingungen für eine Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme beschrieben. In diesem Kapitel werden die bestehenden Ansätze für die in Kapitel 2.9 definierten Anforderungen analysiert. Hierzu wird zunächst in Kapitel 3.1 die integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung näher betrachtet. In Kapitel 3.2 werden Ansätze beschrieben, die sich zur Verhaltensspezifikation eignen. Anschließend wird in Kapitel 3.3 verschiedene Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion dargestellt. Kapitel 3.4 fasst die verschiedenen Definitionen von Zielsystemen zusammen. Die Anwendungssysteme Customer Relationship Management System und Plant Simulation werden in Kapitel 3.5 erläutert. Abschließend werden die Ansätze in Kapitel 3.6 anhand der Anforderungen aus Kapitel 2.9 analysiert und bewertet.

#### 3.1 Integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung

Die integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem muss bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung erfolgen, da der Aufwand und die Kosten für Änderungen im Produktentstehungsprozess mit dem Projektvorschritt exponentiell ansteigen [VDI2206, S. 41], [RLH96, S. 71]. Im Folgenden werden Ansätze betrachtet, die dieses Vorgehen unterstützen.

##### 3.1.1 Systematik zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme nach NORDSIEK

NORDSIEK erweitert die Prinziplösung des Produktes um den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des zugehörigen Produktionssystems. Diese integrative Betrachtung ermöglicht eine frühzeitige Analyse von Produkt- und Produktionssystemkonzept [GLL12, S. 88]. Die Systematik von NORDSIEK ermöglicht es, die Lücke zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung zu schließen. Als Bindeglied dient hierbei das Konzept des Produktionssystems, siehe Bild 3-1. Um dieses zu konzipieren, definiert Nordsiek drei Hauptphasen, die iterativ durchlaufen werden [Nor12, S. 96ff.].

Die erste Phase ist das **Planen und Klären der Aufgabe** des Produktionssystems, auf Basis der Anforderungsliste, der Wirkstruktur sowie der Gestalt des Produktes werden die Resultate Fertigungsanforderungen und produktionsorientierte Erzeugnisstruktur erarbeitet. Die **Konzipierung auf Prozessebene** setzt hier an, mit dem Ziel ein erstes Konzept des Produktionssystems in Form einer Prozessfolge aufzustellen. Hierzu wird im ersten Schritt auf Basis der produktionsorientierten Erzeugnisstruktur eine erste Montagefolge abgeleitet. Anschließend werden die Eigen- und Fremdfertigungsteile bestimmt.

Auf Basis einer Analyse der bestehenden Fertigungsunterlagen und der Eigenschaften der Eigenfertigungsteile wie bspw. des Materials oder der Grobgestalt werden in den nächsten Schritten Fertigungstechnologien ausgewählt. Abschließend wird die Prozessfolge mittels der Spezifikationstechnik CONSENS beschrieben und iterativ vervollständigt. In der Phase der **Konzipierung auf Ressourcenebene** werden die Grundlagen für die Arbeitsstättenplanung und die Planung der Materialflüsse des Produktionssystems gebildet. Im ersten Schritt werden die notwendigen Eingangsinformationen in den Kategorien Bauteil, Produktionsaufgabe und Produktionsumgebung zusammengestellt. Anschließend wird eine Morphologie von Ressourcen in Anlehnung an TROMMER [Tro01] aufgestellt. Den notwendigen Produktionsprozessen werden hierdurch geeignete alternative Ressourcen zugeordnet. Im vierten Schritt werden alternative Ressourcenfolgen analog zu der konzipierten Prozessfolge verknüpft. Ein Kriterium für die Bildung gültiger Ressourcenfolgen ist bspw. die Einhaltung des kürzesten Materialflusses. Abschließend wird das Ressourcendiagramm mittels der Spezifikationstechnik CONSENS erstellt. Somit liegt das Konzept des Produktionssystems als Basis für weitere Konkretisierungsschritte vor [Nor12, S. 107ff.].

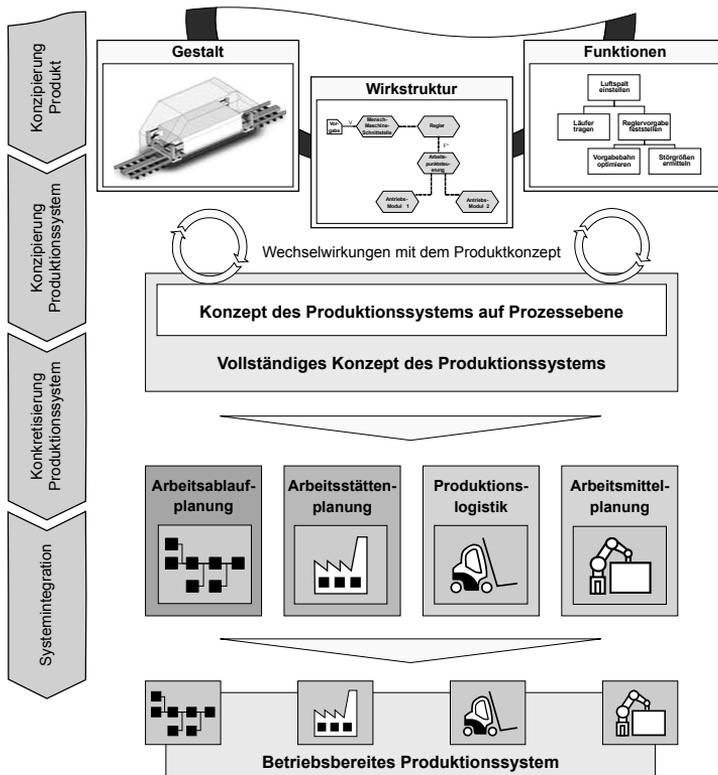


Bild 3-1: Produktionssystemkonzept als Bindeglied zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung [Nor12, S. 98]

### Bewertung:

Die Systematik von NORDSIEK stellt ein Vorgehensmodell bereit, das die notwendigen Schritte zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem strukturiert und Methoden für die erforderlichen Schritte bereitstellt. Die Arbeit bildet ein sehr gutes Rahmenwerk zur Planung von Produktionssystemen im Wechselspiel mit der Produktentwicklung. Jedoch werden die Planung des Verhaltens von Produktionssystemen und die Beschreibung von Zielen bei der Konzipierung nicht berücksichtigt.

### 3.1.2 Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung nach BAUER

Die Kernelemente der Arbeit von BAUER sind ein Vorgehensmodell, eine graphische Modellierungsmethode und eine semantische Repräsentation von Fachwissen. Das Ziel ist die Unterstützung des Planers in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung mit Fach- und Lösungswissen. Es wurden Modellierungsregeln definiert, die es ermöglichen, das vollständige Produktionssystemkonzept in einer Modellierungssoftware (Bild 3-2) zu erstellen. Dies ermöglicht die automatisierte Generierung eines grundsätzlichen Simulationsmodells des Produktionssystemkonzeptes in die Simulationssoftware Plant Simulation [Bau15, S. 2ff.].

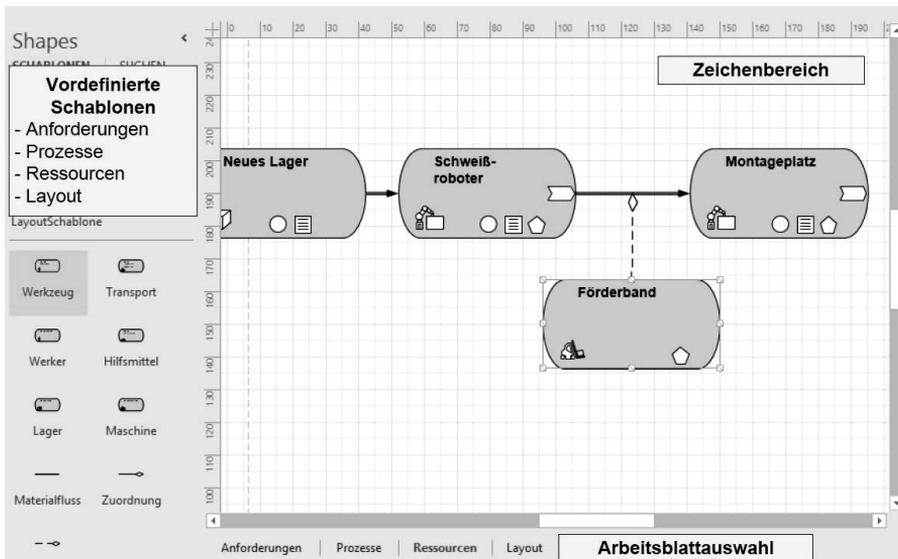


Bild 3-2: Screenshot der Benutzeroberfläche des ProductionSystemModeler (Microsoft Visio Add-In) [Bau15, S. 120]

Die Detaillierung der Grundstruktur ist eine der Hauptphasen der Arbeit und hat einen besonderen Fokus auf die Materialflussbeziehungen des Produktionssystem. Im ersten Schritt werden die **Lagermittel des Produktionssystem spezifiziert**. Definiert werden

hierbei Lager und notwendige Zwischenlager sowie deren Kennzahlen wie die benötigte Kapazität, die Beschaffenheit des Lagergutes und die Größe der Lagerfläche. Des Weiteren wird die Vorgehensweise bei der Ein- und Auslagerung der Materialelemente definiert. Die Spezifikation der Lagermittel erfolgt u. a. auf Basis der zuvor definierten Bearbeitungszeiten der Ressourcen und dem definierten Layout bzw. der Gestalt des Produktionssystems. Die definierten Lager werden in Form einer Ressource in dem bestehenden Ressourcendiagramm ergänzt und somit in den Materialfluss eingebunden. Der nächste Schritt ist die Parametrisierung der Materialflussbeziehungen und die Auswahl der zu verwendenden Transportmittel. Maßgeblich für die Auswahl der Transportmittel sind Kenngrößen wie bspw. der Automatisierungsgrad, die Anordnung der Ressourcen oder die Stau- und Pufferfähigkeit. Die **Spezifikation der Transportmittel** wird durch die Modellierungssoftware unterstützt, indem vorkonfigurierte Transportressourcen oder Templates zur Verfügung gestellt werden. Im abschließenden Schritt erfolgt die **Anpassung der Ressourcenstruktur** an die Erfordernisse der gesamten Produktion. In diesem Schritt werden umliegende Produktionsbereiche in die Planung mit einbezogen und erforderliche Änderungen durchgeführt [Bau15, S. 138f.].

#### **Bewertung:**

BAUER stellt einen wissensbasierten Ansatz zur Unterstützung des Produktionssystemplaners in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung bereit. Die definierten Modellierungsregeln, bieten eine gute Ausgangslage zur strukturierten und eindeutigen Abbildung eines Produktionssystemkonzeptes in Microsoft Visio. Die Möglichkeit, das Produktionssystemkonzept automatisiert in ein Simulationstool zu übertragen und somit den Aufwand bei der Modellerstellung zu minimieren, ist von hoher Relevanz für diese Arbeit.

## **3.2 Ansätze der Verhaltensspezifikation**

Im Rahmen der Verhaltensspezifikation für Produktionssysteme ist es erforderlich, einen Ansatz zu identifizieren, der einen intuitiven Aufbau durch den Planer erlaubt und gleichzeitig eine ausreichend detaillierte Informationsbasis bietet für weiterführende Schritte. In diesem Kapitel werden hierzu Ansätze der Verhaltensspezifikation diskutiert, die sich zur Beschreibung des Verhaltens des Produktionssystems eignen könnten.

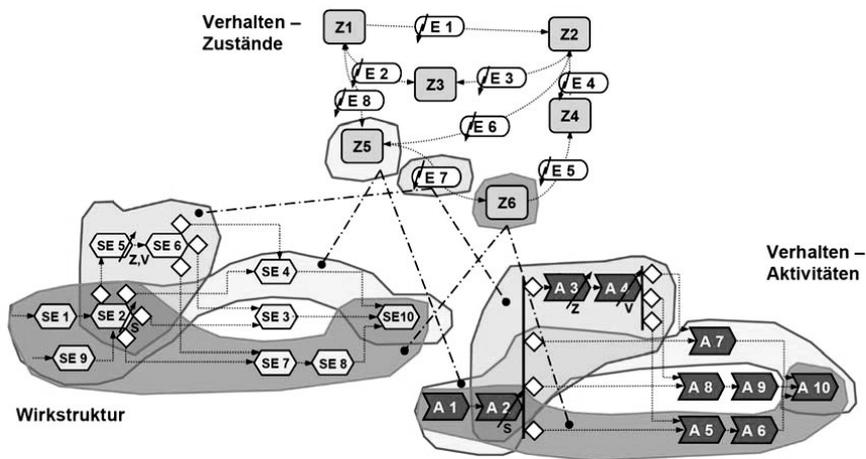
### **3.2.1 Verhaltensspezifikation in CONSENS**

Zur Beschreibung des Verhaltens eines Produktes in der Spezifikationstechnik CONSENS existieren zwei unterschiedliche Partialmodelle. Im Partialmodell **Verhalten-Zustände** werden die diskreten Zustände eines Systems und die Zustandsübergänge beschrieben. Es werden dementsprechend alle in der Konzipierung vorausgedachten und berücksichtigten Systemzustände beschrieben. Zudem werden die durch Ereignisse ausgelösten Zustandsübergänge als verbindendes Element der Zustände spezifiziert. Logische Beziehungen kennzeichnen hierbei die Wirkrichtung der Zustandsübergänge. Somit

entsteht ein Zustandsdiagramm, welches das diskrete Verhalten des Systems widerspiegelt. Jedem Zustand können dabei Verweise sowohl für Aktivitäten als auch für Systemelemente der Wirkstruktur<sup>23</sup> ergänzt werden. Des Weiteren ist es möglich, die Aktivzeiten der Zustände in einem Zeitdiagramm abzubilden [Fra06, S. 116ff.].

Der logische Ablauf der Aktivitäten des Systems wird durch das Partialmodell **Verhalten-Aktivitäten** beschrieben. Nach FRANK ET AL. ist eine Aktivität in diesem Kontext ein Prozessschritt, der von einem konkreten Systemelement ausgeführt wird [FGK+04, S. 17]. Alle Ablauf- und Anpassungsprozesse, die im Rahmen der Konzipierung vorausgedacht wurden, werden in Form von Aktivitäten abgebildet. Die spezifizierten Aktivitäten können in logischen Gruppen zusammengefasst und mit Flussbeziehungen verbunden werden. Zudem ist es möglich, Verweise zu anderen Partialmodellen zu hinterlegen [Fra06, S. 116f.].

Das Zusammenwirken der Partialmodelle Verhalten-Zustände, Verhalten-Aktivitäten und Wirkstruktur ist in Bild 3-3 dargestellt. Prinzipiell ist jedem Zustand eine Aktivität oder eine logische Gruppe von Aktivitäten zugeordnet, die während des Zustandes aktiv ist. Des Weiteren ist jedem Zustand die aktive Konfiguration des Systems zugeordnet, die durch die Wirkstruktur repräsentiert wird [ADG+09, S. 166].



**Legende**

SE	Systemelement	E	Ereignis	zugeordnet zu	<b>S</b>	Situationsanalyse
A	Aktivität	Logische Gruppe	Logische Gruppe	alternative Beziehung	<b>Z</b>	Zielbestimmung
Z	Zustand	Beziehung	Beziehung		<b>V</b>	Verhaltensanpassung

Bild 3-3: Zusammenwirken der Verhaltensspezifikation in CONSENS [ADG+09, S. 166]

<sup>23</sup> vgl. Kapitel 2.3.2

**Bewertung:**

Die Partialmodelle-Verhalten der Spezifikationstechnik CONSENS bietet eine gute Basis für die Beschreibung des Verhaltens eines klar abgegrenzten Systems. Insbesondere das Partialmodell Verhalten-Aktivitäten eignet sich gut für die intuitive Spezifikation der Ablaufprozesse eines Systems. Für den detaillierten Entwurf des Verhaltens eines Produktionssystems fehlt es jedoch an der Berücksichtigung des Lesens und Schreibens von Daten und Informationen, wie es bspw. in einer Fertigungssteuerung notwendig ist. Daher ist es nicht möglich, Abfragen einer Steuerung mit den notwendigen Daten zu verknüpfen. Die Beschreibung der Steuerung eines Produktionssystems würde zudem schnell äußerst unübersichtlich werden aufgrund der hohen Menge an Anfragen, die in hoher Frequenz ablaufen.

**3.2.2 Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS)**

Die Architektur Integrierter Informationssysteme dient der Geschäftsprozessmodellierung mit einem starken Fokus auf Datenflüssen. Die Methode unterteilt sich in vier unterschiedliche ARIS-Sichten: Funktionen, Organisation, Daten und Steuerung. Innerhalb der verschiedenen Sichten werden sehr viele unterschiedliche Konstrukte verwendet, die es erlauben, die Informationsverarbeitung eines Unternehmens im Detail zu modellieren. Die **Funktionssicht** erlaubt es, die Funktionen des Unternehmens hierarchisch zu strukturieren. Hierbei kann unter dem Begriff Funktion ein Vorgang, eine Aktivität oder eine Aufgabe verstanden werden. Die Aufbauorganisation des Unternehmens wird in der **Organisationssicht** beschrieben. Die Organisationseinheiten werden hierzu mit Weisungs- und Kommunikationsbeziehungen verbunden. Zudem werden Rollenkonzepte zu jeder Organisationseinheit definiert. Das Ergebnis ist ein detailliertes Organigramm der Aufbauorganisation. In der **Datensicht** werden Datenobjekte in unterschiedlichem Detailgrad beschrieben. In der Makrobeschreibung werden die Makrodaten dargestellt, die in weitere Elemente zerlegt werden können. Dies ist meist anschaulicher und ausreichend zur Visualisierung der Datenobjekte. Die fachliche Detaillierung erfolgt in der Mikrobeschreibung z. B. in Form von Entity-Relationship-Modellen (ERM) [Gad01, S.110ff.]. Die Beziehungen zwischen den bereits erläuterten Sichten werden in der **Steuerungssicht** abgebildet. Bild 3-4 stellt die Steuerungssicht in Form eines Vorgangskettendiagramms dar [Sch01, S. 21ff.].

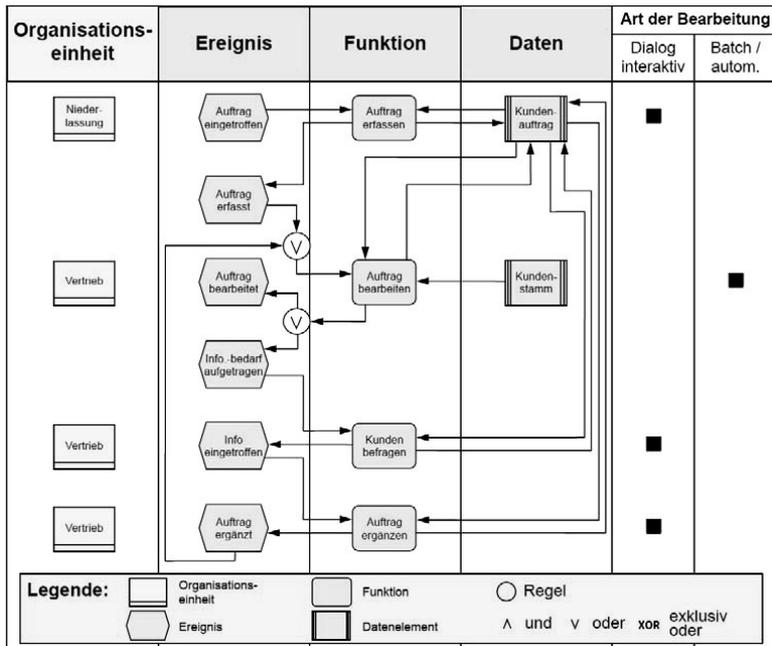


Bild 3-4: ARIS Vorgangskettendiagramm (VKD) [GP14, S. 252]

Die tabellarische Darstellung eines Vorgangskettendiagramms (VKD) bedingt eine schrittweise Ergänzung der Konstrukte und somit einen systematischen Aufbau des Modells. Gegenüber der Freiformdarstellung einer ereignisgesteuerten Prozesskette (EPK) sind VKD übersichtlicher, jedoch sind Schleifen schwerer darstellbar [Sch01, S. 15f.]. Analog zu den erläuterten ARIS-Sichten werden die folgenden Konstrukte in einem VKD verwendet. Die **Organisationseinheit** repräsentiert eine Abteilung bzw. eine Stelle in der Aufbauorganisation. Die Umwandlung von einem Eingangszustand in einen Ausgangszustand wird durch eine **Funktion** beschrieben. Diese sind meist komplexe Aktivitäten und können in weitere Sub-Funktionen untergliedert werden. **Ereignisse** sind eingetretene Zustände, die Funktionen auslösen oder aus einer Funktion resultieren. Ein **Datenelement** beschreibt sowohl materielle als auch immaterielle Objekte. Die Konstrukte werden mit gerichteten logischen Konnektoren verknüpft die Regeln („und“, „oder“ bzw. „exklusiv-oder“) enthalten können [Gad01, S. 93ff.].

**Bewertung:**

Die Interaktion der Geschäftsprozesse innerhalb eines Unternehmens im Rahmen der Steuerungssicht von ARIS kann als Verhalten des Unternehmens interpretiert werden. Aus diesem Grund ist die Architektur Integrierter Informationssysteme für die Spezifikation des Verhaltens eines Produktionssystems sehr interessant. Zudem ermöglicht ARIS die Beschreibung der gesamten Informationsverarbeitung eines Unternehmens. Die Ver-

wendung von vielen unterschiedlichen Symbolen sowie der komplexe Aufbau, insbesondere in der Darstellung als ereignisgesteuerte Prozesskette, lässt die erzeugten Modelle jedoch schnell unübersichtlich werden.

### 3.2.3 Systems Modeling Language

Die Systems Modeling Language (SysML) basiert auf der Softwaremodellierungssprache Unified Modeling Language<sup>24</sup> (UML). SysML ist eine objektorientierte Sprache und dient der Modellierung des Verhaltens, der Strukturen und der Anforderungen von technischen Systemen. Zudem können die einzelnen Diagramme miteinander in Beziehung gesetzt werden. Bild 3-5 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Arten der Diagramme der SysML. Die Diagrammart bilden die Sicht des Anwenders auf das Modell ab [Alt12, S. 29ff.].

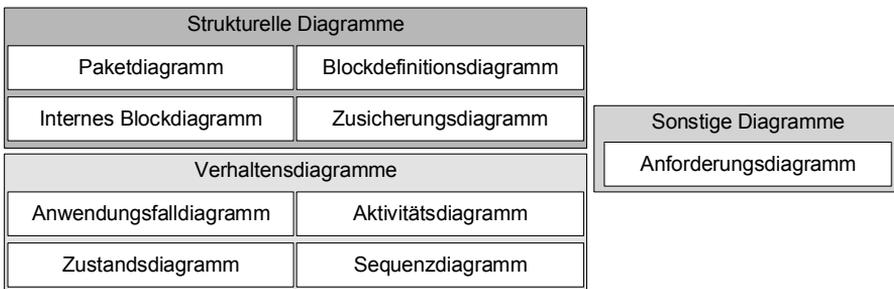


Bild 3-5: Diagrammarten der SysML nach [Alt12, S. 40]

Im Folgenden werden die **Verhaltensdiagramme** der SysML näher erläutert. Die Strukturellen Diagramme werden nicht detailliert betrachtet, da sie für die Modellierung der Systemarchitektur verwendet werden und lediglich statische Aspekte des Systems darstellen.

- **Anwendungsfalldiagramme** beschreiben Anwendungsfälle in Form einer simplen Übersicht. Es dient als Einstieg in die Verhaltensmodellierung. Dazu werden die Interaktionen von Akteuren und Anwendungsfällen mittels geraden Linien Verbunden und somit visualisiert [Alt12, S. 49f.].
- **Sequenzdiagramme** ermöglichen es, die Kommunikationsabläufe zwischen den Systemkomponenten und den Akteuren abzubilden. Zudem können die Interaktionen in einem zeitlichen Zusammenhang dargestellt werden. Hierzu werden die Komponenten nebeneinander vertikal angeordnet, mit Pfeilen verbunden und somit in einen zeitlichen Bezug gebracht [Alt12, S. 53].

<sup>24</sup> vgl. Object Management Group Spezifikation: <http://www.omg.org/spec/UML>

- **Aktivitätendiagramme** verwenden die Abfolge von Aktivitäten und Aktionen, um das Verhalten eines Systems abzubilden. Aktivitäten sind Verhaltenselemente, die mehrfach verwendet werden können. Eine Aktion ist eine Instanz einer Aktivität, bzw. das Ausführen einer Aktivität. Der Aufbau des Aktivitätendiagramms basiert auf Flussdiagrammen. Kontrollflüsse werden dabei als gestrichelte Pfeile und Objektflüsse als durchgezogene Pfeile dargestellt. Die Verbindung zwischen zwei Aktionen kann dabei von Entscheidungsknoten detailliert werden [Alt12, S. 54ff.].
- **Zustandsdiagramme** zeigen die möglichen Zustände und Zustandsübergänge (Transitionen) eines Systems. Zur Abbildung der Zusammenhänge werden die Zustände durch gerichtete Transitionen miteinander verbunden. Diese Transitionen können Bedingungen enthalten wie z. B., dass ein Ereignis eintreten muss, um einen Zustandsübergang auszulösen [Alt12, S. 59].

#### **Bewertung:**

Die SysML dient der Modellierung des Systemmodells eines technischen Systems. Es ist offensichtlich, dass starke Überschneidungen zu der in der Softwareentwicklung verbreiteten UML vorhanden sind. Die Diagramme und somit die aufgebauten Modelle sind nur mit einem hohen Einarbeitungsaufwand interpretierbar. Ein Entwicklungsprozess wird nicht durch die SysML vorgegeben, diese ist je Anwendungsfall zu definieren.

### **3.2.4 Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse**

Die Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse (OMEGA) wurde am Heinz Nixdorf Institut [Fah95] entwickelt. OMEGA bietet die Möglichkeit, Geschäftsprozesse graphisch zu modellieren und somit zu visualisieren. Bild 3-6 zeigt einen exemplarisch aufgebauten Geschäftsprozess sowie die wesentlichen Konstrukte von OMEGA. Diese Konstrukte werden verwendet, um die Geschäftsprozesse vollständig zu beschreiben. Anhand der vollständigen Visualisierung können Analysen des Geschäftsprozesses durchgeführt und ggf. Verbesserungspotentiale identifiziert werden [GP14, S.254].

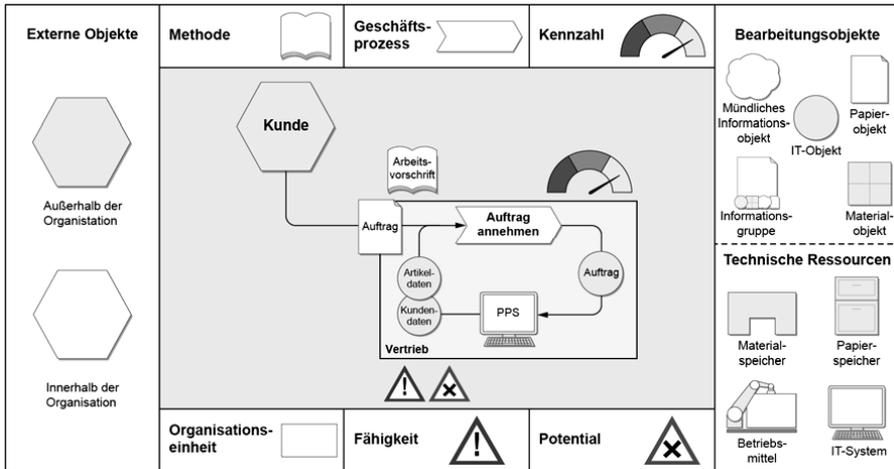


Bild 3-6: Konstrukte der Methode OMEGA [GP14, S. 254]

Die wesentlichen Konstrukte von OMEGA werden im Folgenden prägnant erläutert. **Geschäftsprozesse** sind Aktivitäten, die ein Ergebnis erzielen mit definierten Inputs und Outputs. **Organisationseinheiten** führen Geschäftsprozesse aus und stellen Abteilungen, Teams usw. dar. **Potentiale** werden genutzt, um Schwachstellen im Prozess aufzeigen zu können. Das Konstrukt **Fähigkeit** wird verwendet, um vorhandene oder benötigte Fähigkeiten des Unternehmens in einem bestimmten Prozess zu kennzeichnen. Bewährte oder vordefinierte Abläufe wie bspw. Arbeitsvorschriften werden in Form des Konstrukts **Methoden** ergänzt. **Kennzahlen** werden zur Steuerung von Geschäftsprozessen verwendet und können ein Indikator für die Leistungsfähigkeit dieser sein. **Externe Objekte** sind Elemente, die keiner Organisationseinheit des betrachteten Geschäftsprozesses zugeordnet werden. Sie stellen bspw. Zulieferer oder unternehmensinterne Kunden dar. Die **Bearbeitungsobjekte** werden zur Beschreibung der Ein- und Ausgangsmengen eines Geschäftsprozesses genutzt. Sie definieren die Art des Ergebnisses eines Geschäftsprozesses. **Technische Ressourcen** sind die Mittel, durch die ein Geschäftsprozess durchgeführt wird. Es wird unterschieden in Betriebsmittel, IT-Systeme, Papierspeicher und Materialspeicher [GP14, S. 254ff.].

### Bewertung:

Die Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse (OMEGA) ermöglicht eine vollständige Beschreibung der Aufbauorganisation in einem Modell. Zudem ist es anhand einer einfachen Visualisierung möglich, Analysen durchzuführen und Leistungserstellungsprozesse zu planen. Die Vielzahl der Konstrukte und die Modellierungsrichtlinien machen OMEGA zu einer umfangreichen Methode für die detaillierte Modellierung von Geschäftsprozessen. Für die Beschreibung des Verhaltens der Produktion in Form von intuitiv verständlichen Abläufen in einer stark iterativen Form ist die Methode OMEGA aufgrund dieser Komplexität und dem Fokus auf Organisationseinheiten jedoch nicht geeignet.

### 3.3 Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion

Der Planer soll mittels der Systematik in die Lage versetzt werden, ein selbstoptimierendes Produktionssystem zu konzeptionieren. Ein wesentlicher Schritt hierbei ist die Implementierung und die Berücksichtigung der unternehmerischen Rahmenbedingungen in diesem Kontext. Vor dem Hintergrund werden in diesem Kapitel Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion diskutiert.

#### 3.3.1 Methodik einer selbstoptimierenden Produktionssteuerung nach LAU

Die Methodik einer selbstoptimierenden Produktionssteuerung nach LAU umfasst sechs Kernelemente, ein Modell der Produktionsabläufe, ein Modell der Betriebsmittelfähigkeiten, ein Modell der Transportwege, die Betriebsmittelzuordnung, die antizipatorische Transportplanung und die lokale Ablaufoptimierung. Zum Aufbau der Kernelemente definiert Lau ein dreistufiges Verfahren [Lau10, S. 59ff.].

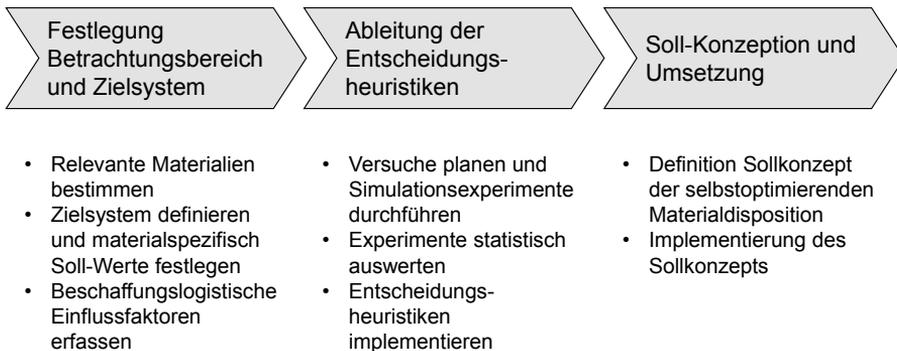
- In der **Planungsphase - Vorbereitende Maßnahmen** wird die CAD Zeichnung des Produktes ausgewertet und interpretiert. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in einen Vorranggraph ein, den sog. Produktgraph. Auf Basis dieser Informationen werden die möglichen Produktionsschritte festgelegt. Für die Ausführung der Produktionsprozesse werden nachfolgend Steuerungsmakros auf Betriebsmittelebene erstellt [Lau10, S. 67ff.].
- In der **Produktionsbetriebsphase - Systemebene** werden zunächst die Produktionsschritte auf mögliche Betriebsmittel zugeordnet und der sog. Betriebsmittelgraph erstellt. Die Reihenfolgeoptimierung auf lokaler Betriebsmittelebene erfolgt anschließend mittels Graphensucheverfahren wie bspw. dem Algorithmus von Dijkstra zu Ermittlung des kürzesten Pfades. Im Rahmen der antizipatorischen Transportplanung werden zunächst die Transportwege in Transportnetzen modelliert. Diese bestehen aus Betriebsmitteln, Lagern, Kreuzungspunkten und Wegen. Es werden die erwarteten Materialabrufe und Transportzeiten berechnet und mittels einer Kosten- und Nutzenfunktion bewertet [Lau10, S. 81ff.].
- In der **Produktionsbetriebsphase - Betriebsmittelebene** werden der antizipatorischen Transportplanung aus der vorherigen Stufe neben den Vergangenheitsdaten zusätzlich aktuelle Daten der Produktion zugeführt. Hierzu verweist LAU auf eine Anbindung an die Betriebsdatenerfassung bzw. das Manufacturing Execution System. Die optimierte Transportdauer wird durch eine Regressionsformel geschätzt [Lau10, S. 109f.].

**Bewertung:**

LAU definiert eine Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung. Diese beginnt mit der Ausgestaltung der Produktgestalt als CAD Modell, eine frühzeitige integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem wird nicht betrachtet. LAU verwendet für die Modellierung der Informationen von Prozessen und Maschinen Vorgangsgraphen, dies abstrahiert die Sachverhalte der Produktionssystementwicklung stark. Die Optimierung der Produktionssteuerung agiert ohne ein klar definiertes Zielsystem.

### 3.3.2 Gestaltungskonzept zur selbstoptimierenden Regelung der Materialdisposition in der Beschaffung nach BAUHOFF

Das Ziel des Gestaltungskonzeptes zur selbstoptimierenden Regelung der Materialdisposition in der Beschaffung ist es, Unternehmen, Werkzeuge und ein Organisationsmodell bereitzustellen. In dynamischen Rahmenbedingungen sollen diese die Effizienz der Materialdisposition verbessern. Dabei bildet eine Entscheidungsheuristik den Kern des Gestaltungskonzeptes. Diese ermöglicht die Auswahl der ziel- und situationsgerechten Dispositionslogik sowie der Optimierung der Dispositionsschnittstellen. Zur unternehmensspezifischen Konzeption einer selbstoptimierenden Materialdisposition definiert BAUHOFF die in Bild 3-7 dargestellte Vorgehensweise [Bau13, S. 5ff.]



*Bild 3-7: Vorgehensweise zur unternehmensspezifischen Konzeption einer selbstoptimierenden Materialdisposition nach [Bau13, S. 153]*

Die Phasen des definierten Vorgehens von BAUHOFF sowie die verwendeten Methoden und Hilfsmittel der einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert.

- Im der ersten Phase wird zunächst der **Betrachtungsbereich** festgelegt. Hierzu wird im ersten Schritt definiert, welche Materialien durch die selbstoptimierende Materialdisposition betrachtet werden. Als Methode wird hierzu die ABC/XYZ Analyse verwendet, um die Materialien nach ihrem Umsatzanteil und der Prognostizierbarkeit des Verbrauchs zu segmentieren. Im zweiten Schritt wird das

**Zielsystem**<sup>25</sup> unternehmensspezifisch ausgeprägt. Hierzu werden die Soll-Zielgrößen und die Gewichtung der Ziele initial materialspezifisch definiert. Im abschließenden Schritt dieser Phase werden die materialspezifischen Werte der beschaffungslogistischen Einflussfaktoren ermittelt. Hierzu wurde von BAUHOFF ein Katalog relevanter Einflussgrößen erstellt. Innerhalb der so definierten Wertebereiche wird nachfolgend die Entscheidungsheuristik abgeleitet [Bau13, S. 154].

- In der zweiten Phase erfolgt die **Ableitung der Entscheidungsheuristiken**. Der erste Schritt ist die Erstellung von Versuchsplänen und die Durchführung der Simulationsexperimente. Hierzu wird als Simulationsumgebung die Software VENSIM<sup>26</sup> verwendet. Im Zweiten Schritt werden zum einen die Faktoren ermittelt, die einen großen Einfluss auf die Zielgrößendifferenz haben. Zum anderen werden funktionale Zusammenhänge zwischen Zielgrößendifferenzen und Einflussfaktoren identifiziert. Abschließend wird die Entscheidungsunterstützung um die funktionalen Zusammenhänge in Form von einfachen Polynomen ergänzt [Bau13, S. 111ff.].
- Die dritte Phase ist die **Soll-Konzeption und Umsetzung**. Im ersten Schritt wird hierzu die verantwortliche Person für die mit der selbstoptimierenden Materialdisposition einhergehenden Aufgaben bestimmt. Des Weiteren werden die Informationslieferanten und das Abrufintervall für Informationen definiert. Das Ergebnis ist ein Katalog mit Maßnahmen zur Verbesserung der Dispositionsschnittstellen. Im letzten Schritt wird die selbstoptimierende Materialdisposition implementiert. BAUHOFF verweist hierzu auf Methoden des Change Managements sowie die bewusste Förderung der Mitarbeiterakzeptanz [Bau13, S. 155].

#### **Bewertung:**

BAUHOFF definiert im Rahmen des Gestaltungskonzeptes zur selbstoptimierenden Regelung der Materialdisposition in der Beschaffung eine Vorgehensweise zur unternehmensspezifischen Gestaltung einer selbstoptimierenden Materialdisposition. Anhand der initialen Gewichtung der Ziele werden unternehmerische Rahmenbedingungen berücksichtigt. Entwicklungsaspekte im Rahmen der Produktionssystementwicklung fließen lediglich rudimentär in das entwickelte Gestaltungskonzept ein.

---

<sup>25</sup> Das Zielsystem von BAUHOFF findet im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Anwendung, da es auf die Materialdisposition ausgerichtet ist.

<sup>26</sup> vgl. <http://vensim.com/>

### 3.3.3 Leitfaden zur Implementierung der echtzeitfähigen Produktionsplanung und -regelung nach MEIER

MEIER definiert einen Leitfaden zur Implementierung des von ihm entwickelten Gestaltungsmodells für eine echtzeitfähige Produktionsplanung und -regelung in der Auftragsabwicklung des Maschinen- und Anlagenbaus. Der zentrale Aspekt des Gestaltungsmodells ist ein kaskadiertes Regelkreismodell zur Angebotsabwicklung. Hierzu definiert MEIER Prozesse, Strukturen sowie Lenk- und Synchronisationsmechanismen zur Abbildung der Zusammenhänge der Produktionsplanung und -steuerung im Rahmen eines kybernetischen Produktionsmanagementsystems [Mei13, S. 125ff].

Die einzelnen Phasen des Leitfadens werden im Folgenden kurz erläutert. Bild 3-8 zeigt den Leitfaden in Form eines Phasen-Meilenstein-Diagramms.

- Der Leitfaden beginnt mit der Phase der **Analyse**. Es werden zwei wesentliche Aufgaben von MEIER definiert, die Projekteinrichtung sowie die Prozess- und Strukturanalyse. Im Rahmen Projekteinrichtung wird zunächst der Betrachtungsbereich des Projekts abgegrenzt. Dieser muss sich im Betrachtungsbereich der Produktionsplanung und -regelung befinden. Die Prozess- und Strukturanalyse beginnt mit der Analyse der Prozesse der Auftragsabwicklung. Zur Dokumentation schlägt Meier die Verwendung von methodischen Hilfsmitteln zur Darstellung von Prozessen, Strukturen, Wertstrom und IT-Beziehungen vor. Das Ergebnis soll eine Prozesslandkarte der Abläufe bei der Kundenauftragsabwicklung darstellen. Anhand dieser werden die Schwachstellen der einzelnen Prozessschritte identifiziert [Mei13, S. 174].

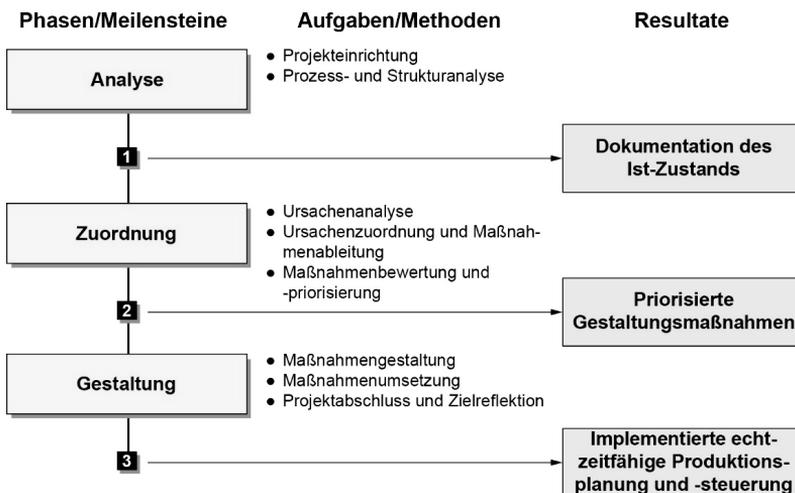


Bild 3-8: Leitfaden zur Implementierung der echtzeitfähigen Produktionsplanung und -regelung nach [Mei13, S. 173ff.]

- Den Ausgangspunkt für die Phase der **Zuordnung** stellen die identifizierten Schwachstellen der vorhergehenden Analyse dar. Diese werden hingehend ihrer Ursachen untersucht und in Cluster zusammengefasst. Anschließend werden die gebildeten Cluster den problemlösenden Elementen der Produktionsplanung und -regelung zugeordnet. Zur Maßnahmenbewertung und -priorisierung wird nachfolgend eine Nutzwertanalyse verwendet. Somit liegt eine definierte Reihenfolge von Gestaltungsmaßnahmen vor, die in der nächsten Phase konkret ausgestaltet werden [Mei13, S. 175f.].
- In der dritten Phase wird die **Gestaltung** der Maßnahmen zur Implementierung der echtzeitfähigen Produktionsplanung und -regelung durchgeführt. Die Maßnahmen umfassen Anpassungen im Rahmen von Prozessreorganisationen auf Basis von Lenkungs- und Steuerungsmechanismen, welche MEIER im Rahmen des Gestaltungsmodells definiert. Zudem werden Leistungsbeschreibungen für IT-Systeme beschrieben, die mit der vorherrschenden IT-Landschaft abzugleichen sind. Abschließend werden die Maßnahmen in Form von Teilprojekten umgesetzt [Mei13, S. 176f.].

#### **Bewertung:**

Der Leitfaden unterstützt den Planungsverantwortlichen bei einer Implementierung eines Gestaltmodells der echtzeitfähigen Produktionsplanung und -regelung in die Praxis des Maschinen- und Anlagenbaus. MEIER stellt im Rahmen der Analysephase die Forderung nach Methoden zur Beschreibung der Abläufe bei der Kundenauftragsabwicklung. Aspekte der integrativen Produkt- und Produktionssystemplanung sowie Analysen des Verhaltens des Produktionssystems mittels Simulationsmodellen werden nicht betrachtet.

### **3.4 Definitionen von Zielsystemen**

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit relevanten Definitionen von Zielsystemen erläutert. Unter einem Zielsystem wird eine Menge von Zielen (vgl. Kapitel 2.1.6) verstanden, die in Beziehung zueinander stehen [ADG+09, S. 20], [Sei79, S. 34]. Zunächst wird auf die betriebswirtschaftliche Sicht der Zielsystemdefinition eingegangen. Das Zielsystem der Produktionslogistik und die Definition des Zielsystems zur Auftrags-einlastung nach KOMPA fokussieren den Aspekt der Fertigungssteuerung in den darauf folgenden Kapiteln. Die Zielsystementwicklung nach POOK für selbstoptimierende mechatronische Systeme wird vorgestellt sowie abschließend das Zielsystem der Produktion nach KRAMER.

#### **3.4.1 Betriebswirtschaftliches Zielsystem**

In der Betriebswirtschaft wird die Gestaltung von Zielsystemen im Rahmen der Zielsetzungslehre behandelt. Hierbei liegt der Fokus auf der Definition des Zielsystems einer Unternehmung, dessen Zielelemente geordnet und strukturiert miteinander verbunden

sind. Bei dem Aufbau eines betriebswirtschaftlichen Zielsystems (Bild 3-9) wird zunächst unterschieden in Zieldimension und die Zielbeziehung. Weiterhin wird die **Zieldimension** in drei Merkmale differenziert, der Inhalt eines Zieles (z. B. Erhöhung der Ausbringung), ein angestrebtes Zielausmaß (Extremwert oder explizites Anspruchsniveau) und der zeitliche Bezug eines Zieles. Die **Zielbeziehungen** werden zunächst unterschieden in komplementär, konkurrierend und indifferent. Diese Unterscheidung setzt voraus, dass die Handlungsmöglichkeiten und deren Auswirkungen zwischen den einzelnen Zielelementen bekannt sind oder analysiert werden können. Als **komplementär** werden Ziele bezeichnet, die sich in der gleichen Weise verhalten. Das bedeutet, dass bei der Erhöhung des Wertes von *Ziel A* auch der Wert des *Ziel B* ansteigt und umgekehrt. Ziele die in einer, wenn auch nur teilweise komplementären Beziehung zueinander stehen, werden in *Ober- und Unterziele* unterteilt. Durch dieses Vorgehen ergibt sich eine Zielhierarchie. Im Gegensatz zu komplementären Zielen stehen **konkurrierende** Ziele. Eine Erhöhung des Wertes von *Ziel A* führt hierbei zu einer Minderung des Wertes von *Ziel B*. Da es hierbei zu Zielkonflikten kommt, muss eine Priorisierung der konkurrierenden Ziele vorgenommen werden. Aus dieser Priorisierung ergeben sich *Haupt- und Nebenziele*. Die Priorisierung ist dabei stark von der Situation abhängig und somit zeitlich veränderlich. **Indifferente** Ziele stehen zueinander in keinem Abhängigkeitsverhältnis. Eine Änderung des Wertes von *Ziel A* führt zu keiner Veränderung des Wertes von *Ziel B*. Zu beachten ist, dass sich die Zielbeziehungen abhängig von dem Zielausmaß ändern können. Ein Beispiel hierfür ist die Beziehung der Ziele *maximaler Gewinn* und *maximaler Umsatz*. Zunächst wächst der Gewinn mit dem Umsatz, dementsprechend stehen die Ziele in einer komplementären Beziehung. Ab einem bestimmten Grad der Umsatzmaximierung wird der Gewinn jedoch nicht weiter zunehmen und es tritt eine indifferente Zielbeziehung ein. Eine weitere Erhöhung des Umsatzes über diesen Umsatzwert würde in der Folge dazu führen, dass die Kosten überproportional ansteigen und ein Zielkonflikt (konkurrierende Ziele) eintritt [Sei79, S. 33ff.], [HD91, S. 13ff.].

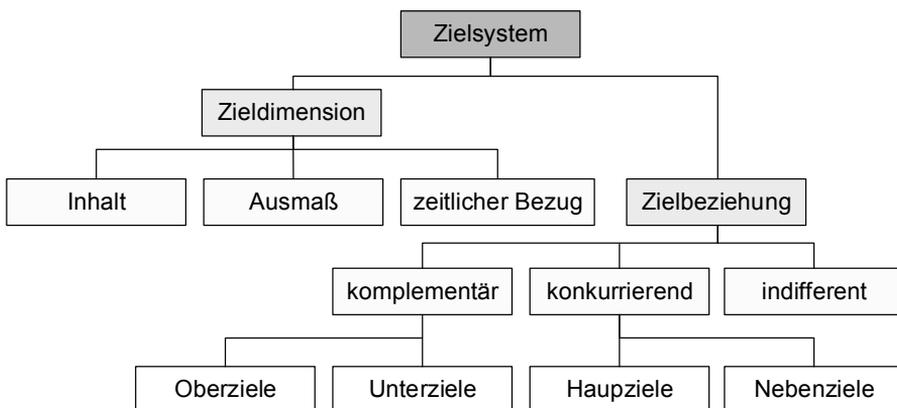


Bild 3-9: Formale Struktur eines betriebswirtschaftlichen Zielsystems [HD91, S. 16]

**Bewertung:**

Das betriebswirtschaftliche Zielsystem bildet die Basis für den grundsätzlichen Aufbau von Zielsystemen. Es differenziert und strukturiert eine Menge von betriebswirtschaftlichen Zielelementen anhand ihrer Zielbeziehungen. Zudem werden die Zieldimensionen festgelegt, die eine konkrete Beschreibung eines Zieles ermöglichen.

**3.4.2 Zielesystem der Produktionslogistik**

Das Zielsystem der Produktionslogistik lässt sich nach WIENDAHL über die Hauptbegriffe Logistikleistung und Logistikkosten darstellen (Bild 3-10). Das übergeordnete Ziel ist die bestmögliche Erreichung logistischer und wirtschaftlicher Ziele. Unter dem Hauptbegriff **Logistikleistung** werden die Liefertreue und die Lieferzeit betrachtet. Hierbei handelt es sich um die Zielvorgaben, die von den Kunden des Unternehmens maßgeblich wahrgenommen werden. Es gilt dementsprechend die Termintreue zu maximieren und die produktionsinternen Durchlaufzeiten zu minimieren. Auf der anderen Seite stehen die **Logistikkosten**, welche in Prozesskosten und Kapitalbindungskosten differenziert werden. Kapitalbindungskosten hängen von den Beständen in der Produktion ab und können dementsprechend durch niedrige Bestände minimiert werden. Die Prozesskosten werden durch eine hohe Auslastung der materialflussrelevanten Ressourcen gesenkt [Wie14, S.250].

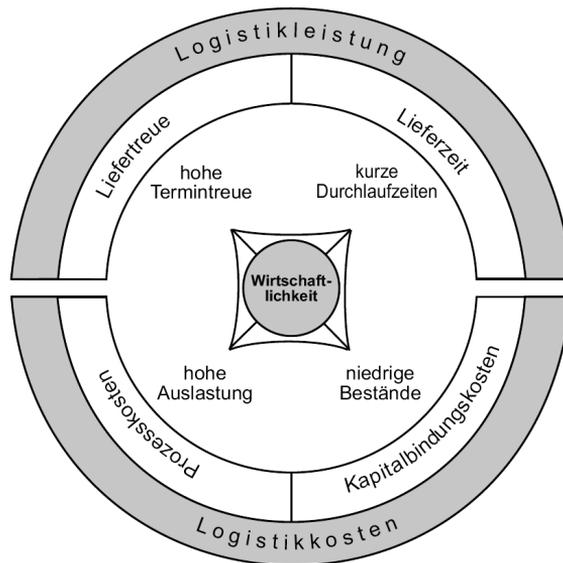


Bild 3-10: Zielsystem der Produktionslogistik [Wie14, S. 251]

**Bewertung:**

Das Zielsystem der Produktionslogistik stellt die Kosten der Produktionslogistik der Leistung direkt gegenüber. Es ermöglicht eine unmittelbare Ableitung der Zielbeziehungen für produktionslogistische Ziele. Dabei werden die Ziele, wie bspw. hohe Termintreue, nicht weiter detailliert oder in Korrelation mit Zielen außerhalb der Produktionslogistik gesetzt.

**3.4.3 Zielsystem der Auftragseinlastung nach KOMPA**

KOMPA unterteilt das Zielsystem der Auftragseinlastung in ein externes, internes und inhärentes Zielsystem. Die übergeordneten Ziele des **externen Zielsystems** sind kategorisiert nach *betriebswirtschaftlichen*, *produktionslogistischen* und *systemtechnischen Zielen*. Als betriebswirtschaftliche Ziele werden bspw. Kosten und Umsatz genannt. Ziele wie Durchlaufzeit und Lagerbestände zählen zu der Kategorie produktionslogistische Ziele. Exemplarische systemtechnische Ziele sind Autonomie und Robustheit. Das **interne Zielsystem** differenziert sich in Haupt-, Neben- und Unterziele der Auftragseinlastung. KOMPA definiert in diesem Zusammenhang *Planungsqualität der Auftragseinlastung* als Hauptziel. Dieses setzt sich aus folgenden Unterzielen zusammen: *Transparenz der Auftragsänderung*, *der Produktionsressourcen* und *der Produktqualität* sowie der *Planungsdatenqualität* (Bild 3-11). Die Nebenziele, *hohe Liefertermintreue zum Kunden* mit *niedrigen Kosten*, müssen bei Abweichungen vom Produktionsprogramm gewährleistet bleiben. Zur Unternehmensstrategiekonformen Beeinflussung logistischer Haupt- und Teilziele ist zu beachten, dass die Ziele des internen Zielsystems Teilziele des externen Zielsystems darstellen. Das inhärente Zielsystem definiert KOMPA gemäß GAUSEMEIER ET AL. [GHK+06, S. 21] als das Zielesystem, das den Entwurfszweck des Systems darstellt [Kom14, S. 115ff.].

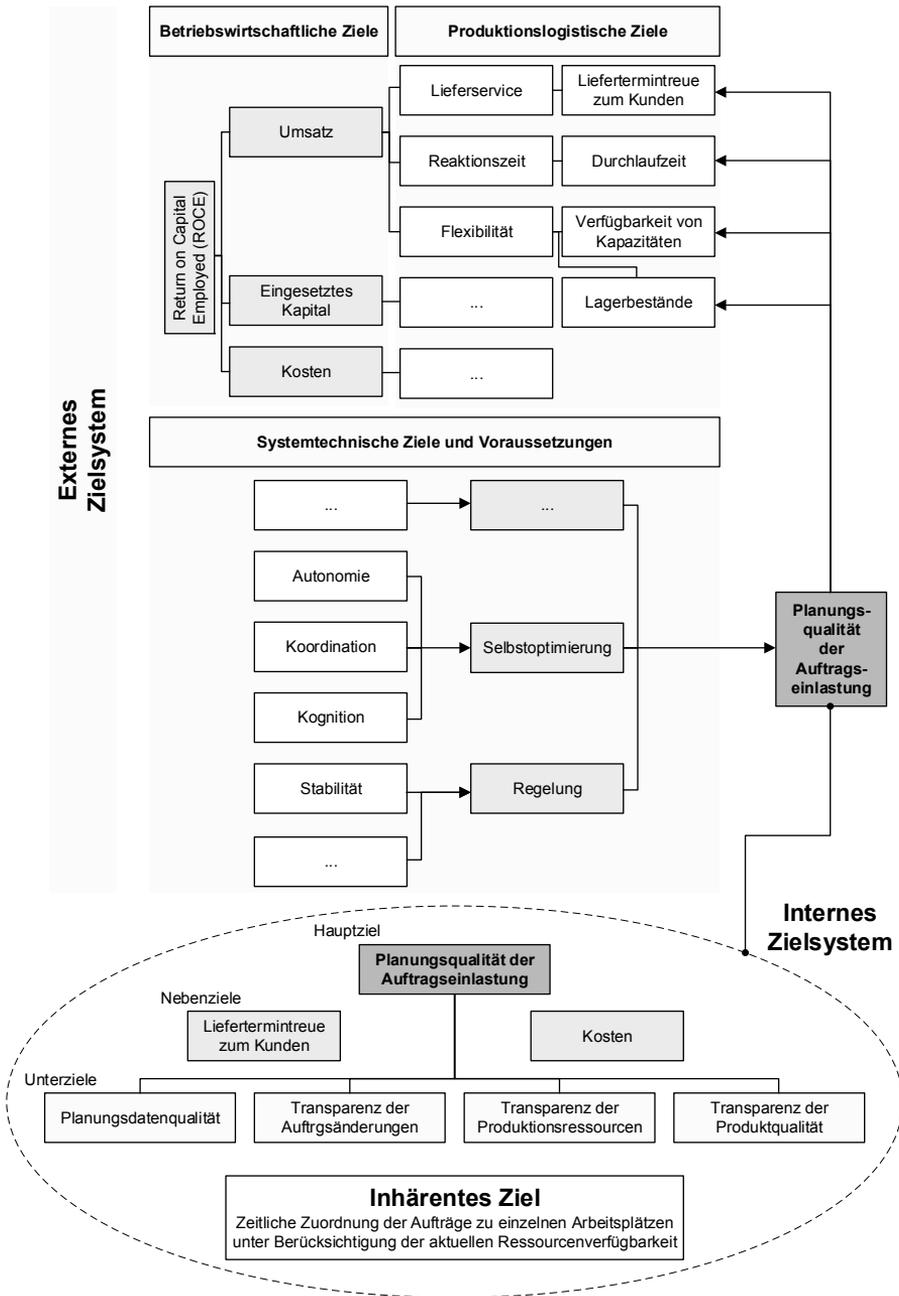


Bild 3-11: Zielsystem der Auftragseinlastung nach SCHUH und KOMPA [SK12, S. 425] (vereinfachte Darstellung)

**Bewertung:**

Das Zielsystem der Auftragseinlastung von KOMPA fasst betriebswirtschaftliche, produktionstechnische und systemtechnische Ziele in einem externen Zielsystem zusammen. Dies wird dem internen Zielsystem gegenübergestellt, das die internen Ziele der Auftragseinlastung beschreibt. Das Zielsystem der Auftragseinlastung ist vollständig auf die Auftragseinlastung in Überlastsituationen ausgerichtet.

**3.4.4 Zielsystem selbstoptimierender Systeme nach Pook**

Das Zielsystem nach POOK [Poo11] ist das Resultat der Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Es handelt sich hierbei um ein Zielsystem, das direkt mit dem Produktkonzept korreliert. In diesem Zusammenhang ist ein Zielsystem die Repräsentation der externen, internen und inhärenten Ziele<sup>27</sup> und deren Verknüpfungen. Die Spezifikation eines Zieles enthält dabei Informationen über die Einordnung in der Hierarchie, Verweise auf Systemelemente, die das Ziel betreffen sowie die Zielvorschrift [Fra06, S. A-2]. Bild 3-12 zeigt die hierarchische Ordnung des Zielsystems selbstoptimierender Systeme. Die Zielhierarchie beschreibt die Ordnungsbeziehungen der Ziele, hierbei werden die Ordnungskriterien Priorisierung von Zielen und Untergliederung von Zielen unterschieden [FGK+04, S. 29f.]. Auf der unteren Ebene der Zielhierarchie enthält die Ziel-Mittel-Ebene die Ziele, die einen Beitrag zu externen und inhärenten Zielen leisten. Diese Ziele stellen das Bindeglied zu den technischen Mitteln dar, die eine Anpassung des Systemverhaltens realisieren [Poo11, S. 11f.].

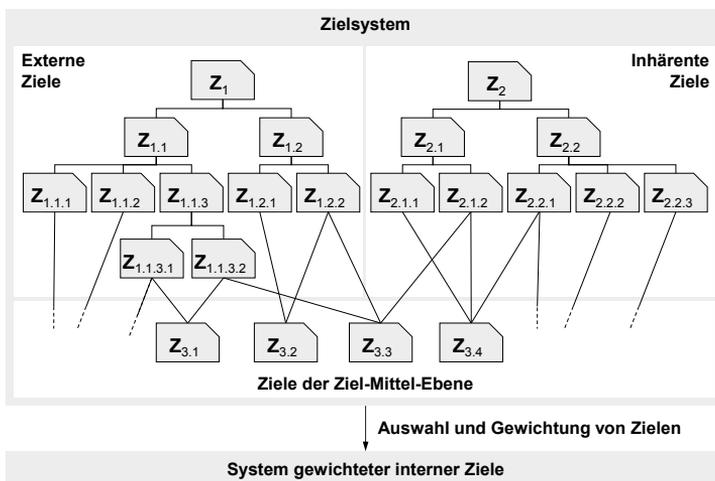


Bild 3-12: Struktur eines Zielsystems und Ableitung der internen Ziele [Poo11, S. 19]

<sup>27</sup> Externe, interne und inhärente Ziele: vgl. Kapitel 2.1.6

Ausgehend von den externen Zielen (z. B. max. Fahrkomfort) und inhärenten Zielen (z. B. min. Verschleiß) eines Systems, werden die Ziele der Ziel-Mittel-Ebene (z. B. min. Geschwindigkeit) verfolgt. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten des Zielsystems eines selbstoptimierenden Systems in der Ziel-Mittel-Ebene sind in Bild 3-13 dargestellt. Eine Auswahl und Gewichtung dieser Ziele wird notwendig, wenn es zu einem Zielkonflikt kommt. Als Zielkonflikt wird dabei ein Ereignis bezeichnet, in dem nicht alle Ziele im gleichen Maß bestmöglich erfüllt werden können. Dies erfordert selbständige Handlungen des selbstoptimierenden Systems auf Basis der Betriebssituation, den Zielgewichten und den geforderten Systemzielen. Diese Handlungen der Auswahl und Gewichtung der Ziele des Zielsystems legen die Gewichtung der internen Ziele fest, welche direkt durch das System verfolgt und beeinflusst werden können [Poo11, S. 13ff.].

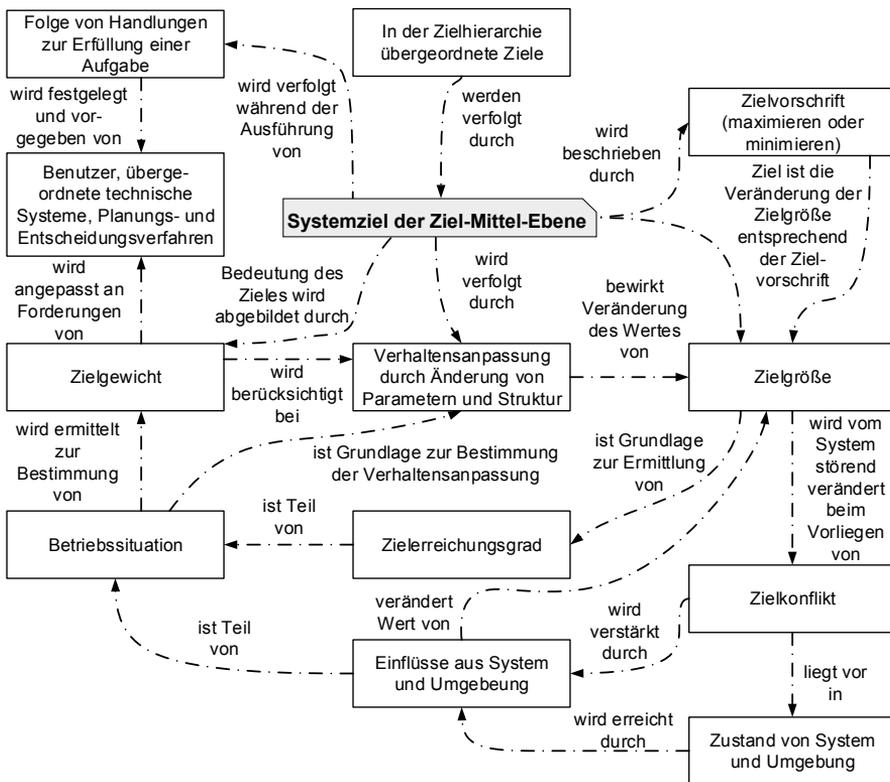


Bild 3-13: Begriffe des Zielsystems eines selbstoptimierenden Systems [Poo11, S. 83]

Die internen Ziele des Systems bilden die Grundlage für die Anpassung des Systemverhaltens. Das selbstoptimierende System modifiziert sein Verhalten anhand der jeweiligen Änderung der internen Ziele mittels Parameter- oder Strukturanpassungen. Hierzu werden die Systemelemente adressiert, die in der Lage sind, eine Anpassung im Rahmen der

Zielvorgabe zu realisieren. Das verbindende Element ist die Ziel-Mittel-Ebene [FGK+04, S. 21], [Poo11, S. 22].

**Bewertung:**

Das Zielsystem selbstoptimierender Systeme nach POOK hierarchisiert inhärente und externe Ziele. Es definiert zudem die Bildung von internen Zielen in der Ziel-Mittel-Ebene über die Auswahl und Gewichtung von inhärenten und externen Zielen. Die direkte Verbindung von Zielen und Systemelementen geht über die reine Definition von Zielgrößen und Zusammenhängen hinaus und beschreibt ergänzend die Wechselwirkungen zwischen dem Produktkonzept und dem Zielsystem. Somit bildet das Zielsystem ein gutes Beschreibungsmuster zur Spezifikation des Zielsystems zur Realisierung eines selbstoptimierenden Produktionssystemverhaltens.

**3.4.5 Zielsystem der Produktion nach KRAMER**

Ein generisches Zielsystem der Produktion wird von KRAMER als ein Element der Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette aufgestellt. Die Herleitung des Zielsystems erfolgt in mehreren Schritten. Sie basiert u. a. auf einer Abgrenzung des Begriffes der Produktion, den klassischen Zielen der Produktion Zeit, Kosten und Qualität sowie dem Ziel der Flexibilität. Das Zielsystem von ZAHN ET AL. [ZS96, S. 152] wird hierbei ebenso betrachtet wie das Zielsystem der Produktionslogistik (vgl. Kapitel 3.4.2). Ein besonderes Augenmerk richtet KRAMER auf die Definition operationalisierbarer Unterziele, die durch einen Kennzahlenwert beschrieben werden können. Das als statisch zu betrachtende Zielsystem der Produktion nach KRAMER zeigt Bild 3-14. Die Gewichtung der einzelnen Ziele innerhalb des Zielsystems liegt der Unternehmensstrategie zugrunde. Somit lässt sich das statische Zielsystem auf die Bedürfnisse der Unternehmen anpassen [Kra02, S. 79ff.].

**Bewertung:**

KRAMER definiert ein generisches Zielsystem der Produktion mit dem Fokus der manuellen Operationalisierung. Er leitet ein Kennzahlensystem auf dieser Basis ab, das es ermöglicht, die Ziele der Produktion über die Einleitung von Verbesserungsprozessen positiv anhand der Kennzahlen zu beeinflussen. Die Ableitung von Regeln für eine automatisierte Verhaltensanpassung eines Produktionssystems wird bei dem Ansatz nicht betrachtet. Das Zielsystem bildet eine sehr gute Ausgangslage für die Analyse der Zielbeziehungen in der Produktion.

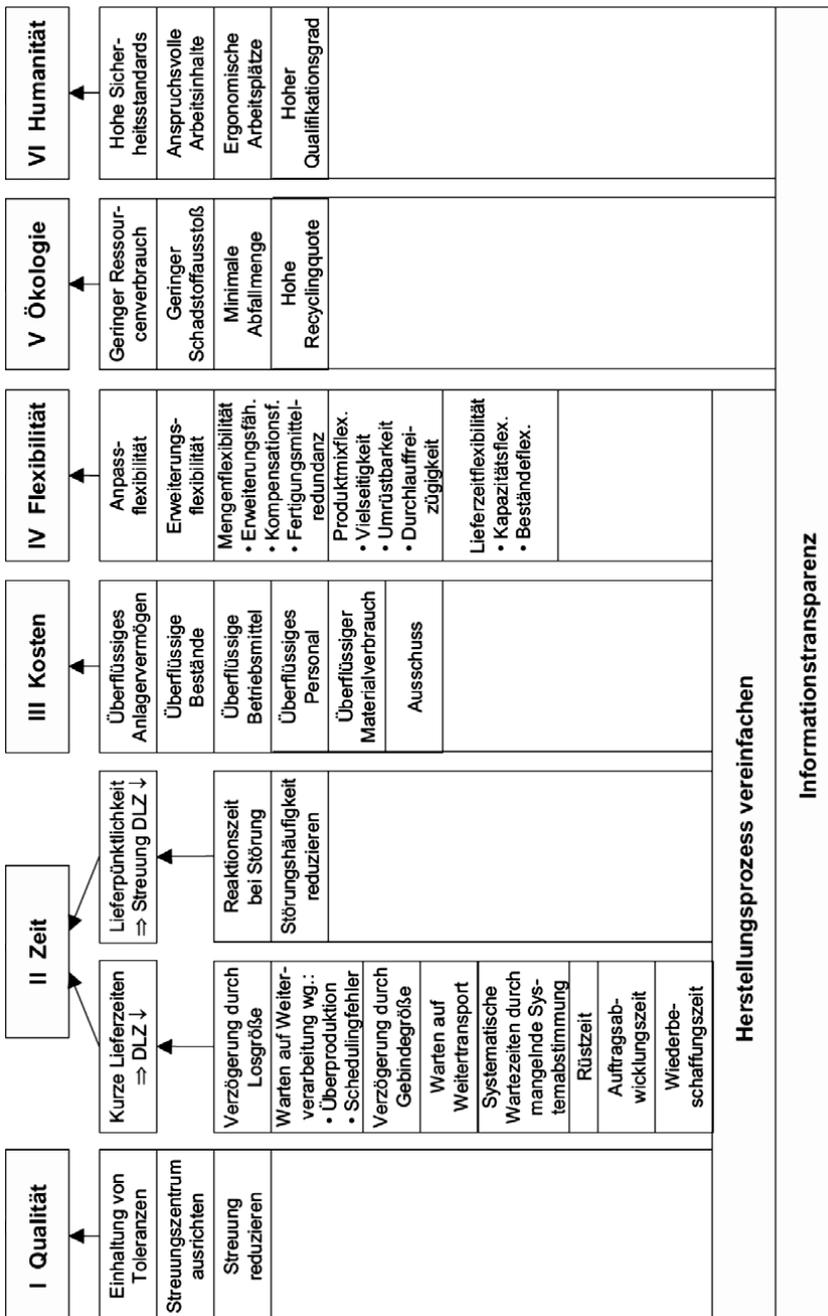


Bild 3-14: Zielsystem der Produktion mit dem übergeordnetem Ziel der Wertschöpfung nach [Kra02, S.104]

## 3.5 Anwendungssysteme

Im Folgenden werden Systeme der Informationstechnik diskutiert. In Kapitel 2.6 wurden bereits IT-Systeme des Auftragsabwicklungsprozesses vorgestellt wie z. B. Enterprise Resource Planning Systeme oder Manufacturing Execution Systeme. In diesem Kapitel werden ergänzend Customer Relationship Management Systeme und die Simulationssoftware Plant Simulation aus dem Kontext der Digitalen Fabrik (vgl. Kapitel 2.5) beschrieben.

### 3.5.1 Customer Relationship Management (CRM)

Die Geschäftsprozesse, die unmittelbar mit dem Kunden in Beziehung stehen, werden durch das Customer Relationship Management<sup>28</sup> (CRM) unterstützt. Primär sind hier die Funktionsbereiche Marketing, Vertrieb und Service involviert [GP14, S.377]. Im Zentrum des CRM sollte die Ermittlung der Kundenwerte stehen. Die Kundenwerte werden in Form von Anforderungen zur zielorientierten Gestaltung von profitablen Kundenbeziehungen herangezogen. Zur Ermittlung der Kundenwerte muss ein Unternehmen verschiedene Fragestellungen beantworten. Beispielsweise wie die „Güte“ der Kunden definiert wird oder welche Orientierungsgrößen (z. B. Deckungsbeitrag oder Umsatz) verwendet werden [HGE17, S. 500]. Die zentrale Messgröße für ein erfolgreiches Customer Relationship Management ist die Kundenzufriedenheit. Sie stellt einen direkten Bezug zu der Kundenbindung dar, welcher den langfristigen Unternehmenswert widerspiegelt [Hel13, S. 7].

Systeme zur IT-Unterstützung des Customer Relationship Managements sind in den 1980er-Jahren zunächst als Computer Aided Selling (CAS)-Systeme eingeführt worden und in den Folgejahren zu CRM-Systemen wie (z. B. Siebel von Oracle<sup>29</sup>) weiterentwickelt worden. CRM-Systeme sind in zwei grundsätzliche Funktionalitäten unterteilt, das operative CRM und das analytische CRM (Bild 3-15). Im Bereich des operativen CRM sind alle Funktionen zusammengefasst, die mit dem direktem Kundenkontakt einhergehen. Das analytische CRM fokussiert die Auswertung der erhobenen Kundendaten, die von dem operativen CRM übergeben werden [Sch11, S. 447]. Dem Unternehmen steht somit umfassendes Wissen über Struktur, Verhalten und Bedürfnisse der Kunden zur Verfügung. Das Wissen wird im Customer Data Warehouse zusammengeführt und so für den Mitarbeiter in einer vollständigen Sicht je Kunde aggregiert [Hel13, S. 181f.].

---

<sup>28</sup> CRM wird oftmals auch Kundenbeziehungsmanagement genannt [HGE17, S. 500].

<sup>29</sup> vgl. <https://www.oracle.com/de/products/applications/siebel>

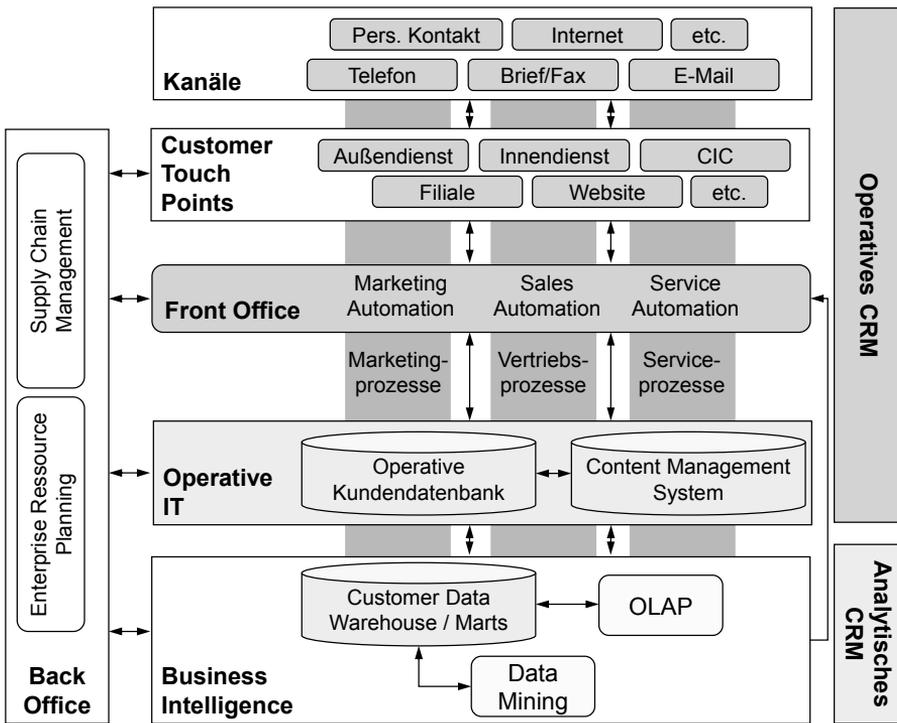


Bild 3-15: Komponenten eines Customer Relationship Management Systems [Hip11, S. 686]

**Bewertung:**

Customer Relationship Management Systeme unterteilen sich in operative und analytische Funktionsbereiche. Der Kundenwert ist hierbei ein zentraler Aspekt zur internen Bewertung von Kunden. Die Art der Erfassung und Definition der Kundenwerte obliegt dem Unternehmen. Im Funktionsbereich des analytischen CRM sind die Systeme in der Lage, die gewünschten Informationen über die Kunden des Unternehmens aus den erfassten Kundendaten zu aggregieren und an weitere Systeme wie bspw. dem ERP-System weiterzuleiten.

**3.5.2 Plant Simulation (Siemens PLM Software)**

Plant Simulation<sup>30</sup> ist ein Discret-Event-Simulator von Siemens PLM Software zur dynamischen Analyse von Materialflüssen (Bild 3-16). Die Modelle können hierzu objektorientiert auf Basis bereitgestellter oder individueller Anwendungsbibliotheken aufgebaut werden [Küh06, S.245f.]. Die Anpassung der Simulations-Bausteine der Bibliotheken

<sup>30</sup> Früher: em-Plant, Simple++

wird durch die Informationsflusssprache SimTalk realisiert. SimTalk ermöglicht es, das meist simple Grundverhalten der Bausteine zu konkretisieren. Darüber hinaus ist es möglich, das gesamte Verhalten des Modells anhand von Steuerungen vorzugeben. Hierzu wird der Baustein *Methode* verwendet und das beabsichtigte Steuerungsverhalten in Form von SimTalk Kontrollstrukturen und Sprachkonstrukten hinterlegt [Ban11, S. 9ff.]. Die Auswertung einer Simulation liefert Ergebnisse in Form von Tabellen, Statistiken oder Diagrammen. Dies ermöglicht die Analyse des Produktionssystemkonzeptes hingehend verschiedenster Kriterien und somit eine frühzeitige Absicherung des Verhaltens und zuverlässige Entscheidungen in Bezug auf die Umsetzung unterschiedlicher Produktionssystemvarianten [Küh06, S. 245f.].

Plant Simulation unterstützt die Strukturierung und Hierarchisierung des Modells bei der Abbildung von Produktionssystemen und stellt umfassende Analysetools zur Verfügung wie bspw. eine automatische Engpassanalyse, Sankey-Diagramme oder Gantt-Diagramme. Zudem lässt sich die Animation des Produktionssystemverhaltens während der Simulation in 2D und 3D visualisieren [Küh06, S. 246]. Der Datenimport und -export wird durch eine Vielzahl an Schnittstellen unterstützt, z. B. ODBC (Open Database Connectivity), um Daten aus einer Datenbank zu lesen und Daten in einer Datenbank zu verändern oder die XML-Schnittstelle zum Einlesen und Ausgeben von XML Dateien [Ban11, S. 375ff.], [Ele12, S. 36]. Ein wesentliches Leistungsmerkmal von Plant Simulation ist daher die hohe Integrationsfähigkeit durch eine offene Systemarchitektur [Küh06, S. 246].

Durch die Abbildung der Lösungsvarianten einer Produktionssystemplanung in Form von Bearbeitungs- und Montagestationen, Puffer, Förderstrecken usw. ist es möglich, das zeitliche Verhalten des Systems in Plant Simulation abzubilden. Dies ermöglicht die Planung von Taktzeiten an den Ressourcen, die notwendigen Pufferflächen sowie die Maschinenauslastung [GP14, S.367].

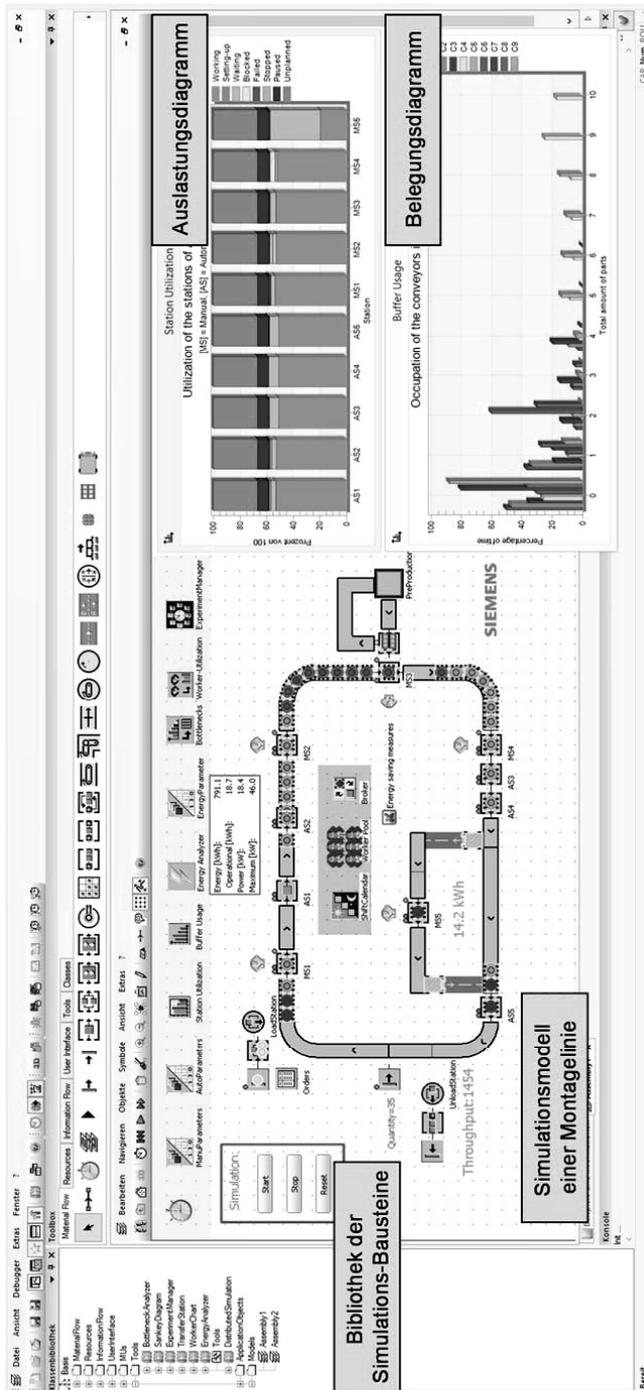


Bild 3-16: Screenshot eines Plant Simulation Modells (Siemens PLM Software)

**Bewertung:**

Plant Simulation ermöglicht die objektorientierte Erstellung von Simulationsmodellen zur dynamischen Materialflussanalyse von Produktionssystemen. Die offene Systemarchitektur und die hohe Integrationsfähigkeit unterstützen hierbei sinnvoll die Konnektivität zu Planungsdaten. Der Aufbau der Modelle wird durch eine Bibliothek von Simulations-Bausteinen unterstützt und realisiert somit eine intuitive Modellbildung einfacher Produktionssysteme. Zudem ermöglicht die Informationsflusssprache SimTalk die Implementierung sehr komplexer Steuerungen und somit die Abbildung eines sehr komplexen Verhaltens eines Produktionssystems.

**3.6 Bewertung und Handlungsbedarf**

Im Folgenden wird die Bewertung der untersuchten Ansätze zusammengefasst. Dies wird anhand der aufgestellten Anforderungen aus Kapitel 2.9 strukturiert. Bild 3-17 visualisiert die Zusammenfassung der Ergebnisse.

**A1) Einordnung in die integrative Produktionssystemplanung**

Die integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem ermöglicht die Analyse von Produkt- und Produktionssystemkonzept in den frühen Phasen der Produktentstehung. Die Arbeiten von NORDSIEK und BAUER stellen hierzu ein adaptierbares Rahmenwerk bereit.

**A2) Prinziplösung als Ausgangspunkt**

Die Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion setzen eine vollständige Produktbeschreibung nach dem Abschluss der Konstruktion voraus. Die Ansätze der integrativen Produktionssystemplanung adressieren die frühe Phase und können adaptiert werden.

**A3) Verhaltensbeschreibung in der Produktionssystemkonzipierung**

Die untersuchten Ansätze fokussieren verschiedene Aspekte der Verhaltensspezifikation. Die durchgängige und allgemeinverständliche Beschreibung des Produktionssystemverhaltens wird jedoch durch keinen Ansatz vollständig abgedeckt. Die Architektur integrierter Informationssysteme sowie die Modelle des Produktverhaltens in CONSENS bieten jedoch eine gute Basis zur Modifikation.

**A4) Abbildung der Zielvorgaben der Produktion**

Zielvorgaben werden in Form von Zielen beschrieben und in einem Zielsystem in Bezug zueinander gebracht. Die unterschiedlichen Sichten bei der betrachteten Definition von Zielsystemen führen zu einem inhomogenen Gesamtbild. Keine der Definitionen bzw. der Vorgehen bildet die Ziele der Selbstoptimierung im Kontext der Produktion allgemeinverständlich und zudem mit einem ausreichenden Informationsgehalt ab. Viele der

untersuchten Vorgehen und Definitionen tangieren jedoch Teilbereiche und können kombiniert werden.

#### **A5) Unternehmerische Rahmenbedingungen berücksichtigen**

Die Grundvoraussetzung für selbstständige Entscheidungen eines selbstoptimierenden Systems ist das Wissen über die Gesamtsituation. BAUHOFF berücksichtigt unternehmerische Rahmenbedingungen bspw. durch eine initiale Zielgewichtung. Zudem unterstützen Customer Relationship Management Systeme individuelle Analysen von Kundendaten und die Übertragung der Resultate in die IT-Landschaft des Unternehmens.

#### **A6) Absicherung des Produktionssystemkonzeptes**

Die Bewertung und die Absicherung des Produktionssystems wird von unterschiedlichen Ansätzen betrachtet. Plant Simulation von Siemens PLM bietet hier sehr gute Grundvoraussetzungen zur Absicherung des Verhaltens des Produktionssystemkonzeptes in einer praxisnahen Software. Die Modellierungsregeln von BAUER bilden hierbei eine wertvolle Unterstützung bei der Modellgenerierung.

#### **A7) Systematische Vorgehensweise**

Die vorgestellten Ansätze werden in vielen Fällen durch definierte Vorgehensmodelle unterstützt. Dabei werden jedoch nur Teilaspekte der integrativen Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems betrachtet.

#### **A8) Systemtechnische Umsetzung**

Die untersuchten Ansätze unterstützen die systemtechnische Umsetzung in den operativen Betrieb lediglich bedingt. Der Leitfaden von MEIER sieht eine Analyse der IT-Landschaft des Unternehmens vor, gibt jedoch keine konkreten Vorgaben. Die Methodik nach Lau verweist lediglich auf eine Anbindung an die Betriebsdatenerfassung bzw. das Manufacturing Execution System.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.	Anforderungen (A)							
	Einordnung in die integrative Prod.sys.planung	Prinziplösung als Ausgangspunkt	Verhaltensbeschreibung in der Prod.sys.konzipierung	Abbildung der Zielvorgaben der Produktion	Unternehmerische Rahmenbed. berücksichtigen	Absicherung des Produktionssystemkonzeptes	Systematische Vorgehensweise	Systemtechnische Umsetzung
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
<b>Bewertungsskala:</b>								
	= nicht erfüllt							
	= teilweise erfüllt							
	= voll erfüllt							
<b>Ansätze der integrativen Produkt- und Produktionssystementwicklung</b>								
Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK								
Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung nach BAUER								
<b>Ansätze der Verhaltensspezifikation</b>								
CONSENS Partialmodell Verhalten								
Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS)								
Systems Modeling Language (SysML)								
Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse (OMEGA)								
<b>Vorgehen zur Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion</b>								
Methodik eine selbstoptimierenden Produktionssteuerung nach Lau								
Gestaltungskonzept zur selbstoptimierenden Materialdisposition nach БАУНОВ								
Leitfaden zur Implementierung der echtzeitfähigen PPR nach MEIER								
<b>Definitionen von Zielsystemen</b>								
Betriebswirtschaftliches Zielsystem								
Zielsystem der Produktionslogistik								
Zielsystem der Auftragseinlastung nach КОМПА								
Zielsystem selbstoptimierender Systeme nach POK								
Zielsystem der Produktion nach KRAMER								
<b>Anwendungssysteme</b>								
Customer Relationship Management System								
Plant Simulation (Siemens PLM Software)								

Bild 3-17: Bewertung der untersuchten Ansätze anhand der Anforderungen

Wie Bild 3-17 zeigt ist keiner der untersuchten Ansätze in der Lage, die gestellten Anforderungen vollständig zu erfüllen. Einige Ansätze erfüllen mehrere Anforderungen, wie die Systematik nach NORDSIEK und das Planungswerkzeug nach BAUER. Diese eignen sich sehr gut für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Defizite bestehen insbesondere im Bereich der Verhaltensbeschreibung von Produktionssystemen in der frühen Phase der Produktentstehung. Zudem setzen Verfahren zur Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion zu spät im Produktentstehungsprozess an oder sind vollkommen auf die Optimierung eines bereits bestehenden Produktionssystems ausgelegt. Es bedarf daher einer *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme*.



## 4 Anwendungsbeispiel

Die vorliegende Arbeit ist im Querschnittsprojekt Selbstoptimierung des Spitzenclusters Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe (it's OWL) entstanden. Aus Gründen der Geheimhaltung werden jedoch keine Projekteinhalte der kooperierenden Unternehmen als Anwendungsbeispiele verwendet. Es wird ein Demonstrator des Heinz Nixdorf Instituts und das fiktive Unternehmen SPSE-Lights verwendet.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der integrativen Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Als Anwendungsbeispiel dient der Demonstrator „Kundenindividualisierte Taschenlampe“ des Heinz Nixdorf Instituts. Der Demonstrator wurde im Rahmen einer Umstrukturierungsmaßnahme des Labors Flexible Industrieautomatisierung entwickelt<sup>31</sup>. Bedingt durch einen hohen Individualisierungsgrad des Produktes entsteht eine hohe Variantenanzahl der Taschenlampe. Dies erfordert eine hohe Flexibilität und Agilität des Produktionssystems. Das Planungsszenario ist die Integration des zu planenden Produktionssystems auf Basis der Prinzipzlösung der Taschenlampe in eine bereits bestehende Produktion des fiktiven Leuchtmittelherstellers SPSE-Lights. Es wird angenommen, dass SPSE-Lights ein KMU<sup>32</sup> mit 380 Mitarbeitern und einem Umsatzerlös von 32 Millionen Euro ist, das zu dem Segment der Serienfertiger gehört. Das Unternehmen ist spezialisiert auf hoch individualisierte Produkte mit einer Lieferzeit von Standardprodukten und einer maximalen Liefertreue. Die Kunden haben die Möglichkeit, die Gestalt der Produkte individuell in einem Online-Portal des Unternehmens nach definierten Richtlinien<sup>33</sup> zu gestalten.

Bild 4-1 zeigt die Wirkstruktur des Demonstrators und verdeutlicht somit die prinzipielle Wirkungsweise des Systems. Die *Batterien* stellen die elektrische Leistung zur Verfügung zum Betreiben der kundenindividualisierten Taschenlampe und werden mittels eines *Batteriehalters* fixiert. Über einen *Druckknopf* wird der elektrische Leistungsfluss von den *Batterien* zu der *Leuchtdiode (LED)* hergestellt. Die *LED* strahlt bei Stromdurchfluss das Licht der Taschenlampe ab, welches durch den *Reflektor* gebündelt wird. Die Systemelemente *Griffstück* und *Lampenkopf* sind die Komponenten, die für den mechanischen Zusammenhalt der Taschenlampe erforderlich sind. Die *Glasscheibe* schützt die *LED* und den *Reflektor* vor Verschmutzung und mechanischen Einflüssen.

---

<sup>31</sup> Die Methodik, die der Entwicklung des Demonstrators zugrunde liegt, fokussiert die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung (vgl. [PBG+14]).

<sup>32</sup> KMU = Kleines bis mittleres Unternehmen (Definition: Unter 500 Beschäftigte und maximaler Umsatzerlös von 50 Millionen € [Eur03].)

<sup>33</sup> Ein Beispiel für eine Richtlinien ist die Einhaltung von maximalen und minimalen Abmaßen der Bauteile.

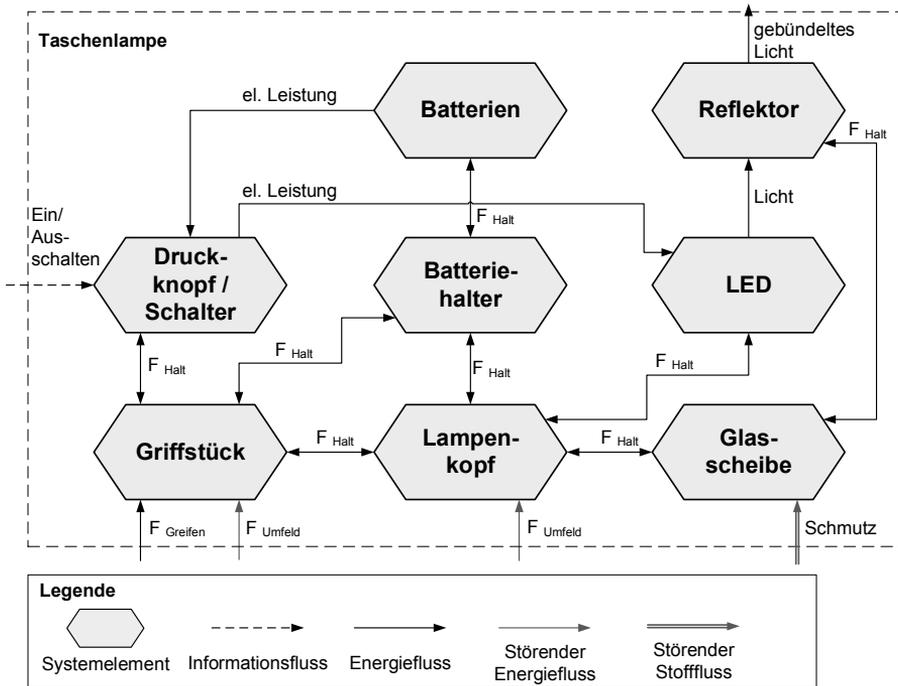


Bild 4-1: Wirkstruktur des Anwendungsbeispiels nach [PBG+14, S. 5]

Die Gestalt einer Variante des Anwendungsbeispiels zeigt Bild 4-2 in Form einer Explosionszeichnung. Die einzelnen Varianten der Taschenlampe unterscheiden sich nicht in der zuvor erläuterten Grundfunktion. Vielmehr unterscheiden sie sich in der Gestalt und in der Materialauswahl der Komponenten *Griffstück* und *Lampenkopf*. Diese können individuell auf den Kunden angepasst werden und somit den Kundenanforderungen gerecht werden.

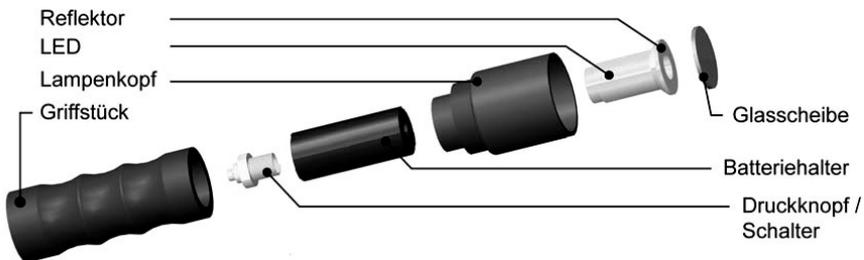


Bild 4-2: Gestaltmodell des Anwendungsbeispiels nach [PGK+15, S. 5]

Die Prinziplösung des Produktes Taschenlampe liegt somit vor und dient als Ausgangspunkt für die integrative Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Der Konkretisierungsgrad der Partialmodelle Wirkstruktur, Gestalt, Funktionen<sup>34</sup> und Anforderungsliste<sup>35</sup> entsprechen einer ersten Anwendung des V-Modells nach VDI2206 ohne Iterationsschritte.

---

<sup>34</sup> vgl. Anhang (Bild A-1)

<sup>35</sup> vgl. Anhang (Bild A-2)



## 5 Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens s.o. Produktionssysteme

Die im Rahmen der Arbeit entwickelte *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens von selbstoptimierenden Produktionssystemen* unterstützt den Planer bei der Entwicklung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Der Fokus liegt auf der durchgängigen Planung des angestrebten Verhaltens des zu entwickelnden Produktionssystems auf Basis der Prinziplösung des Produktes. Hierzu zählt die Definition eines Zielsystems der Produktion ebenso wie die Analyse der unternehmerischen Rahmenbedingungen zur Berücksichtigung der Kundenbeziehungen und der systemtechnischen Umsetzung. Die Systematik besteht aus drei wesentlichen Elementen, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

- Einem **Vorgehensmodell**, das die erforderlichen Schritte zur integrativen Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems beschreibt. Es ordnet sich in die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ein. Das Vorgehensmodell gliedert sich in die Phasen, welche in Kapitel 5.1 prägnant erläutert werden.
- Der **Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells**, welches die Konzipierung des Verhaltens der Produktion in der frühen Phase der Produktentstehung ermöglicht. Das Verhaltensmodell dient der strukturierten und detaillierten Beschreibung der Abläufe und als Informationsbasis für die Steuerungsmethoden eines Simulationsmodells.
- **Methoden und Werkzeuge**, welche die Lösung von Teilaufgaben im Rahmen der integrativen Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystems ermöglichen. Hierzu zählen ein Vorgehen zur Ermittlung der Produkt-Prozess und der Prozess-Ressourcen Beziehungen, ein Verfahren zur Definition und initialen Gewichtung des Zielsystems, ein Vorgehen zur Ermittlung der Kundenprioritäten und der Auftragsprioritäten sowie ein Verfahren zur Modellierung des Simulationsmodells der selbstoptimierenden Produktion.

Das erarbeitete Vorgehensmodell wird in Kapitel 5.1 dargestellt und ein kurzer Überblick über die Systematik gegeben. Die einzelnen Phasen, Aufgaben bzw. Methoden und Resultate werden in den Kapiteln 5.2 bis 5.6 erläutert. In Kapitel 5.7 wird die Systematik anhand der Anforderungen bewertet.

### 5.1 Vorgehensmodell

Die *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens von selbstoptimierenden Produktionssystemen* unterteilt sich in fünf Phasen (vgl. Bild 5-1). Als Ausgangslage wird vorausgesetzt, dass im Rahmen der Produktentwicklung die Prinziplösung des Produktes erarbeitet wurde (vgl. Kapitel 4). Die Phasen des Vorgehensmodells zeichnen sich durch

einen iterativen Prozess aus und stellen keine stringente Folge von Arbeitsabläufen dar. Die Arbeitsschritte können dementsprechend teilweise parallel oder mehrfach durchgeführt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der Systematik kurz erläutert.

**Statisches Produktionssystem konzipieren:** Das Vorgehen beginnt mit der Analyse der Prinziplösung des Produktes. Anhand der Methoden der integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem wird die detaillierte Grundstruktur des Produktionssystems erarbeitet. Die spezifizierten Partialmodelle des statischen Produktionssystems bilden eine Eingangsgröße für die nachfolgenden Phasen. Zudem sind sie die Ausgangsbasis zur Übertragung des Produktionssystemkonzeptes im Rahmen der Strukturierung des Simulationsmodells.

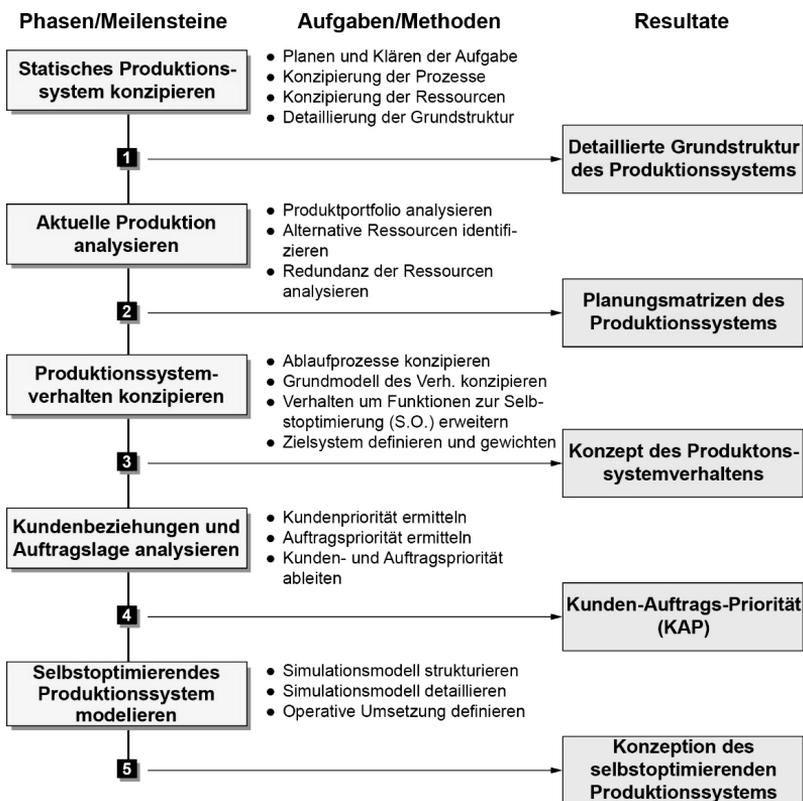


Bild 5-1: Vorgehen bei der integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme

**Aktuelle Produktion analysieren:** In dieser Phase werden die Rahmenbedingungen des Unternehmens betrachtet. Hierzu wird zunächst das aktuelle Produktportfolio analysiert und die vorhandenen Ressourcen des Unternehmens identifiziert. Zur Betrachtung des Verhaltens des Produktionssystems in der folgenden Phase müssen Informationen über

alternative und redundante Ressourcen des Unternehmens vorliegen. Alternative Ressourcen sind in der Lage, gleiche Produktionsprozesse mit abweichenden Parametern durchzuführen. Die identifizierten Produkte, Prozesse und Ressourcen werden in Matrizen gegenübergestellt. Als Ergebnis liegen Planungsmatrizen des Produktionssystems vor, die im späteren Verlauf als Datenbasis zur Generierung von alternativen Arbeitsplänen dienen.

**Produktionssystemverhalten konzipieren:** Die dritte Phase des Vorgehens beginnt mit der Konzipierung der Ablaufprozesse auf Basis der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystems. Die Beteiligten der Produktionssystemplanung spezifizieren hierzu das angestrebte Verhalten des Produktionssystems. Das Verhalten eines Produktionssystems wird durch die Fertigungssteuerung bestimmt. Daher werden nachfolgend die notwendigen Funktionen der Fertigungssteuerung auf Basis der spezifizierten Ablaufprozesse identifiziert. Im nächsten Schritt wird das Grundmodell des Verhaltens und somit die grundlegende Logik der Fertigungssteuerung spezifiziert. Dieses Grundmodell wird um die Funktionen der Selbstoptimierung erweitert und bildet anschließend das Verhaltensmodell des selbstoptimierenden Produktionssystems. Im letzten Schritt wird das Zielsystem der selbstoptimierenden Produktion definiert. Zudem wird die initiale Gewichtung der Ziele durch das Unternehmen durchgeführt.

**Kundenbeziehungen und Auftragslage analysieren:** Das selbstoptimierende System soll in der Lage sein, das bestmögliche Verhalten der Produktion zu identifizieren und umzusetzen. Hierzu müssen neben der initialen Gewichtung der Ziele weitere unternehmerische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Die Ermittlung der Kunden- und Auftragspriorität ist daher Gegenstand der vierten Phase des Vorgehens. Die Kundenpriorität wird hierzu aus der Kundenattraktivität und dem Kundennutzen abgeleitet. Zudem bilden die operative Auftragsrelevanz und die strategischen Auftragsrelevanz die Basis für die Ermittlung der Auftragspriorität. Das Resultat sind Kunden-Auftrags-Priorität (KAP) Werte, die bestimmen, inwieweit eine Verschiebung eines Auftrages zulässig ist ohne negative Auswirkungen für das Unternehmen.

**Selbstoptimierendes Produktionssystem modellieren:** Die Modellierung und die Definition der operativen Umsetzung des selbstoptimierenden Produktionssystems bildet die abschließende Phase der Systematik. Auf Basis der Spezifikation der detaillierten Grundstruktur wird das grundsätzliche Simulationsmodell in Plant Simulation generiert. Es folgt die Ableitung der Datenstruktur und die Identifikation der notwendigen Schnittstellen auf Basis des entwickelten Verhaltensmodells. Im nächsten Schritt wird das Simulationsmodell durch die Parametrisierung und Erweiterung der Ressourcen sowie durch den Aufbau der Steuerungsmethoden detailliert. Die Absicherung des Verhaltens des Produktionssystems erfolgt anschließend und lässt Rückschlüsse auf eventuelle Planungsfehler zu, welche eine Anpassung der Grundstruktur zur Folge haben können. Abschließend wird die operative Umsetzung gemäß den vorliegenden Bedienungen im Unternehmen definiert.

## 5.2 Statisches Produktionssystem konzipieren

In dieser Phase entsteht mit der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystems die Basis für die Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Hierzu wird das Konzept des Produktionssystems integrativ mit dem Produkt erarbeitet. Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ermöglicht eine frühzeitige Analyse auf Konzeptebene [GLL12, S. 88]. Auf Basis der Prinziplösung des Produktes wird der grundsätzliche Aufbau und die Wirkungsweise des zugehörigen Produktionssystems erarbeitet. Nach NORDSIEK [Nor12] sind drei Schritte in der Produktionssystemkonzipierung zu durchlaufen, die abgestimmt zur Produktentwicklung erfolgen (vgl. Kapitel 3.1.1). Das Planen und Klären der Aufgabe (vgl. Kapitel 5.2.1) des Produktionssystems, die Konzipierung auf Prozessebene (vgl. Kapitel 5.2.2) und die Konzipierung auf Ressourcenebene (vgl. Kapitel 5.2.3) werden iterativ durchlaufen, wobei sich der Konkretisierungsgrad der Lösung stetig erhöht. In Kapitel 5.2.4 wird das Konzept des Produktionssystems um die relevanten Materialflussbeziehungen konkretisiert. Das erläuterte Vorgehen ist in Bild 5-2 dargestellt.

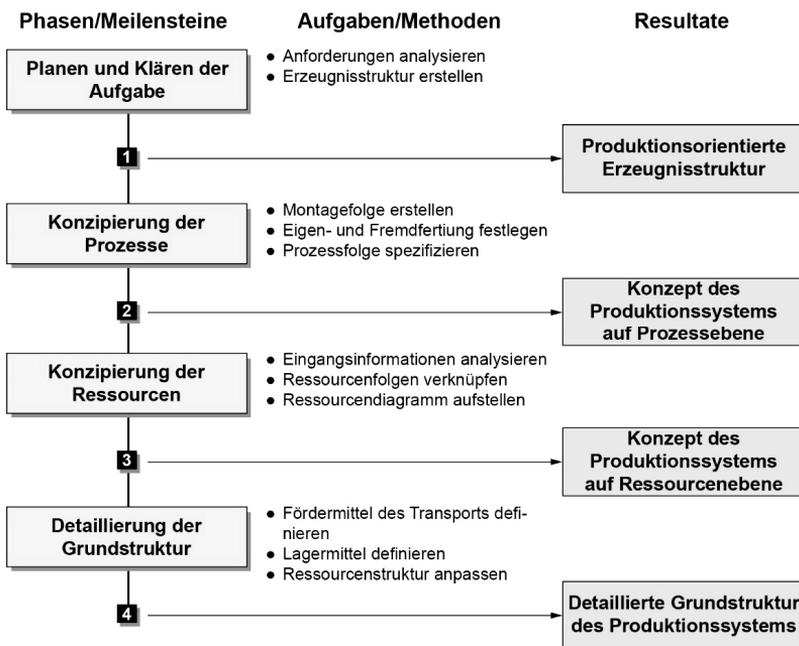


Bild 5-2: Vorgehen bei der statischen Produktionssystemkonzipierung

### 5.2.1 Planen und Klären der Aufgabe

Die Integrative Produktionssystemplanung beginnt mit dem **Planen und Klären der Aufgabe**, dessen Kern die Analyse der Prinziplösung des herzustellenden Produktes ist [Nor12, S. 98ff.]. Hierzu sind zwei Schritte zu absolvieren, die Anforderungsanalyse und

das Erstellen der Erzeugnisstruktur. Im ersten Schritt, der **Anforderungsanalyse**, wird die erstellte Anforderungsliste des Produktes auf die fertigungsrelevanten Anforderungen reduziert. Aus diesen Anforderungen lassen sich direkte Rückschlüsse ziehen, wie bspw. die zu erwartende jährliche Produktionsmenge, die Variantenanzahl oder die einzusetzenden Materialien. Diese Informationen können genutzt werden, um eine Vorauswahl der einzusetzenden Fertigungsmittel des zu planenden Produktionssystems zu treffen [Nor12, S. 107].

Auf Basis der Partialmodelle Funktionen, Wirkstruktur (Bild 4-1) und Gestalt (Bild 4-2) des herzustellenden Produktes wird das Verfahren zur montagegerechten Produktgestaltung nach DAHL [DAH90] verwendet, um die **produktionsorientierte Erzeugnisstruktur** aufzustellen. Der Fokus liegt hierbei auf dem baulichen Zusammenhang der Systemelemente und den montagerelevanten Beziehungen zwischen diesen [Nor12, S. 108]. Auf Basis der Partialmodelle Funktionen<sup>36</sup> und Wirkstruktur des Anwendungsbeispiels wurde die funktionale Gliederung der Taschenlampe (Bild 5-3) abgeleitet. Diese ist die Grundlage für die Erstellung der produktionsorientierten Erzeugnisstruktur.

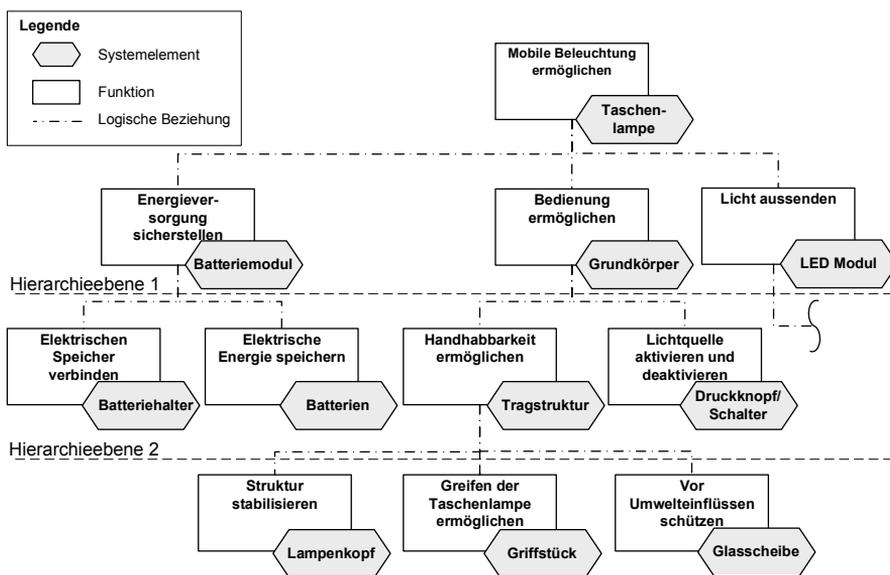


Bild 5-3: Funktionale Gliederung der Taschenlampe (Ausschnitt) nach [Nor12, S. 108]

Auf Basis der funktionalen Gliederung, der Wirkstruktur und der Gestalt des Anwendungsbeispiels werden die montagerelevanten Beziehungen identifiziert. Hierzu zählen neben den Informationen der funktionalen Gliederung sowohl die in der Wirkstruktur

<sup>36</sup> vgl. Anhang (Bild A-3)

dargestellten mechanischen und elektrischen Energieflüsse als auch strukturelle Zusammenhänge, die dem Partialmodell Gestalt entnommen werden können. NORDSIEK verwendet eine Beziehungsmatrix<sup>37</sup> zur Darstellung der montagerelevanten Beziehungen. In der Beziehungsmatrix werden alle gestaltbehafteten Systemelemente aufgeführt, die in der funktionalen Gliederung nicht weiter unterteilt werden. Im Fall des Anwendungsbeispiels sind dies die acht Systemelemente Griffstück, Lampenkopf, Druckschalter, Batteriehalter, Batterien, Glasscheibe, LED und Reflektor. Die Bewertung der einzelnen Systemelemente ist in Anhang A2 detailliert beschrieben. Aus der Bewertung der montagerelevanten Beziehungen ergibt sich die in Bild 5-4 dargestellte produktionsorientierte Erzeugnisstruktur des Anwendungsbeispiels. Sie bildet die Grundlage für die im nächsten Abschnitt beschriebene Konzipierung der Produktionsprozesse.

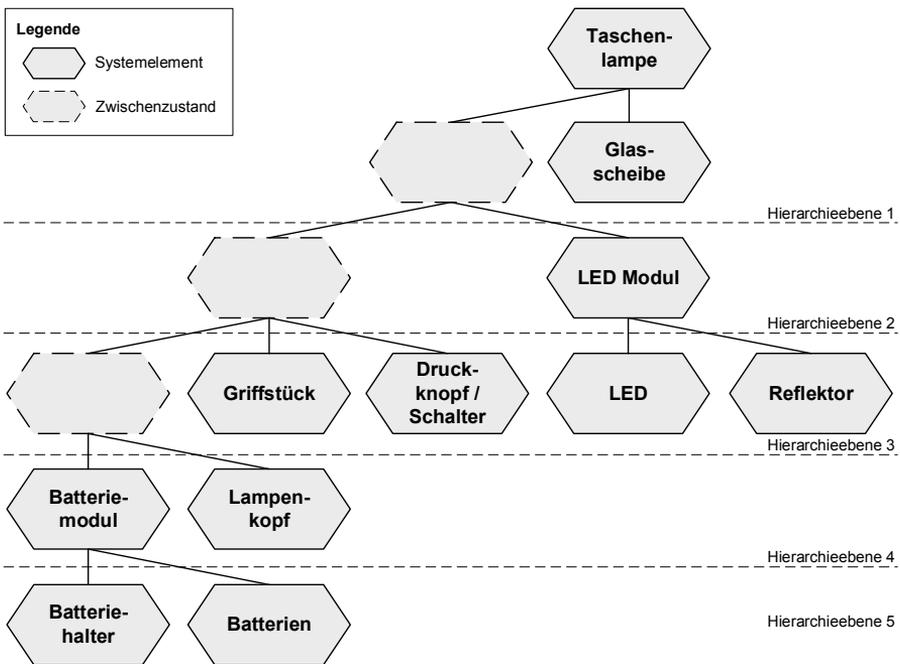


Bild 5-4: Produktionsorientierte Erzeugnisstruktur der Taschenlampe auf Basis der Prinziplösung nach [Nor12, S. 112]

## 5.2.2 Konzipierung der Prozesse

Nach NORDSIEK wird im Rahmen dieser Phase ein erster Arbeitsablauf in Form einer **Prozessfolge** erarbeitet. Hierbei werden zum einen die notwendigen Fertigungs-, Mon-

<sup>37</sup> Beziehungsmatrix der Taschenlampe, vgl. Anhang (Bild A-4)

tage- und Fügevorgänge spezifiziert und zum anderen die Bauteile, Baugruppen und Bauteilzwischenzustände zugeordnet. Das Produktionssystemkonzept auf Prozessebene wird in fünf Schritten konzipiert, die in den folgenden Abschnitten sukzessive erläutert werden. Zunächst wird die produktionsorientierte Erzeugnisstruktur des Produktes analysiert und in eine erste Montagefolge überführt. Einen Auszug der ersten Montagefolge<sup>38</sup> der Taschenlampe zeigt Bild 5-5.

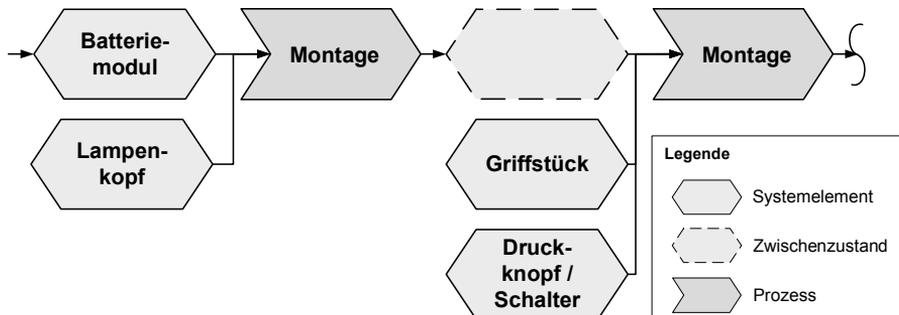


Bild 5-5: Auszug der ersten Montagefolge der Taschenlampe nach [Nor12, S. 114]

Im nächsten Schritt werden die **zu fertigenden Elemente** bestimmt. Bild 5-6 zeigt eine vollständige Auflistung der Systemelemente. Es wird zwischen lichttechnischen, elektronischen und mechanischen Komponenten unterschieden. Das Unternehmen SPSE Lights ist spezialisiert auf die Individualisierung von mechanischen Komponenten und die Montage des Endproduktes. Dementsprechend werden die nicht mechanischen Komponenten als Zukaufteil deklariert. Eine interne Produktion würde keinen Mehrwert ergeben, da die erforderlichen Produktionstechnologien im Unternehmen nicht existieren und eine Einführung der Technologien einen zu hohen Aufwand mit sich bringen würde.

<sup>38</sup> Vollständige erste Montagefolge vgl. Anhang (Bild A-6)

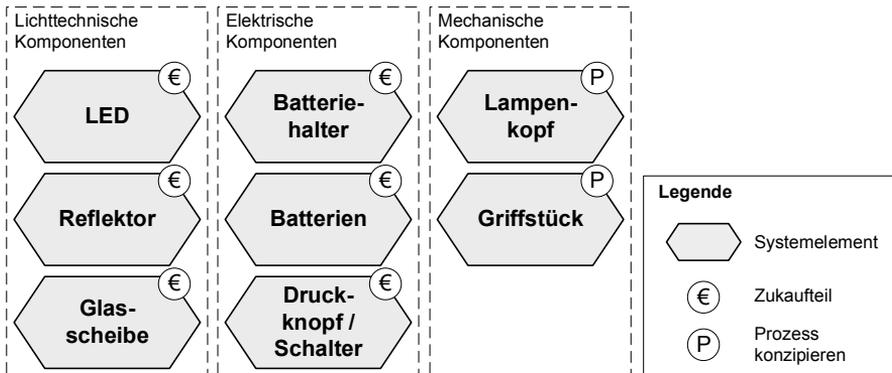


Bild 5-6: Zukauf- und Eigenfertigungsteile der Taschenlampe

Im Folgenden wird die erste Prozessfolge der Taschenlampe weiter mit bereits bekannten und neuen Produktionsprozessen konkretisiert. In den Schritten Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl und Bewertung der Auswahl werden neue Produktionsprozesse zur Herstellung der Taschenlampe spezifiziert. Nordsiek stützt sich hierbei maßgeblich auf bewährte Auswahlprogramme und -matrizen von ASHBY ET AL. [AWF07] und SWIFT/BOOKER [SB03]. Als Basis hierfür werden die Informationen Gestalt, Parameter und Anforderungen des Bauteiles genutzt (Bild 5-7).



Bild 5-7: Bauteilanforderungen des Griffstücks nach [Nor12, S. 126]

Das Bauteil Griffstück besitzt die Gestaltklasse nicht rotationssymmetrisch, da der Griff sowie der Lampenkopf individuell durch den Kunden gestaltet werden. Das Material sowie die Restriktionen - Länge von 100 bis 200 mm und Durchmesser von 30 bis 60 mm - ergeben sich aus den Richtlinien zur Gestaltung des Griffstücks. Aus den Bauteilanforderungen des Griffstücks ergibt sich unter der Verwendung der Auswahlprogramme und

-matrizen<sup>39</sup> von ASHBY [AWF07] und SWIFT/BOOKER [SB03] die Kerntechnologie Trennen. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass aus wirtschaftlichen Gründen eventuell vorbereitende Arbeitsschritte durch einen vorgelagerten Drehprozess erfolgen können. Es ergeben sich alternative Kombinationen der Fertigungstechnologien für das Bauteil Griffstück. Das Ergebnis der Konzipierung auf Prozessebene<sup>40</sup> für alle Produktionsprozesse, die für die Herstellung der Taschenlampe notwendig sind, ist in Bild 5-8 dargestellt. Die annotierten Parameter der Prozesse (z. B. Bearbeitungszeit) werden aus dem Erfahrungswissen des Planers abgeleitet oder auf Basis von bereits vorhandenen vergleichbaren Prozessen im Unternehmen beschrieben.

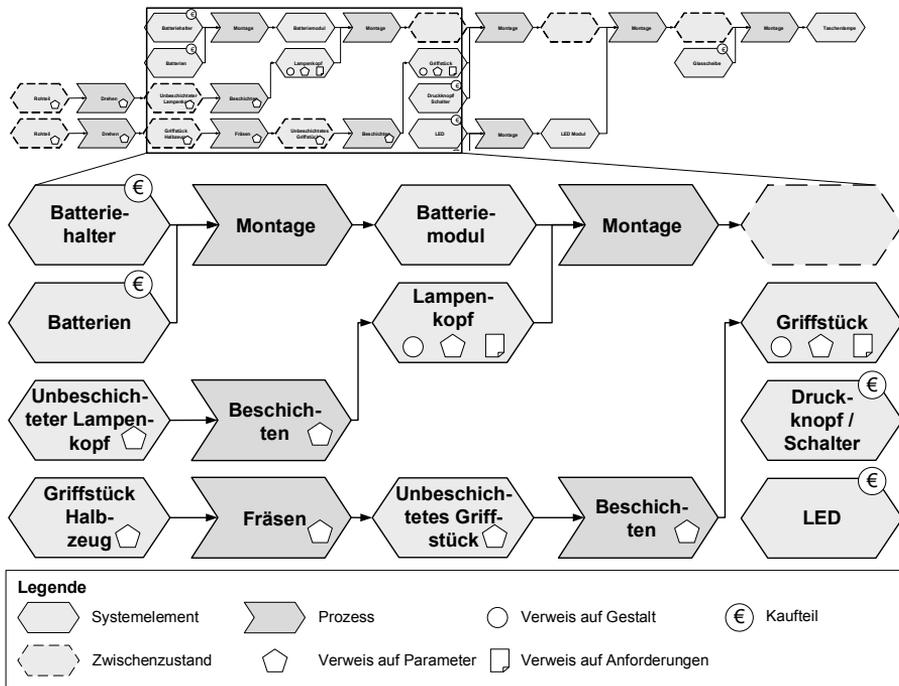


Bild 5-8: Spezifikation des Produktionsprozesses (Ausschnitt) nach [Nor12, S. 131]

### 5.2.3 Konzipierung der Ressourcen

Die Grundlage für die Arbeitsstättenplanung und die Planung der Materialflüsse des Produktionssystem bildet die Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK. Das Ressourcendiagramm stellt die Anordnungsstruktur des Produktionssystem dar und enthält Informationen zu den Charakteristika der verwendeten Ressourcen. Charakteristika wie

<sup>39</sup> vgl. Anhang (Bild A-7)

<sup>40</sup> Vollständige Spezifikation des Produktionsprozesses vgl. Anhang (Bild A-8)

bspw. Bearbeitungszeit können bereits auf Prozessebene abgeschätzt werden, sind jedoch auf dieser rein technologischen Ebene eher eine grobe Näherung.

Zunächst werden die notwendigen Eingangsinformationen in den Kategorien **Bauteil** (Maße, Gewicht, Werkstoff), **Produktionsaufgabe** (Technologie / Verfahren) und **Produktionsumgebung** (Arbeitsmittel, Personal, Auslastung) gesammelt. Auf Basis dieser Daten erfolgt die Zuordnung der Ressourcen zu den jeweiligen Produktionsprozessen. Am Beispiel des Griffstücks sind die Daten des Bauteils bereits in Bild 5-7 beschrieben und die Kerntechnologie Trennen in der Prozesskonzipierung definiert worden. Die zu Verfügung stehende Produktionsumgebung des Unternehmens kann den ERP oder ME-Systemen bzw. anderen Planungstools zur Ressourcenverwaltung entnommen werden. Die vorhandenen Arbeitsmittel, die Personallage und die aktuelle Auslastung dieser werden somit aufgelistet.

Im nächsten Schritt wird in Anlehnung an TROMMER [Tro01] eine Morphologie von Ressourcen aufgestellt. Jedem notwendigen Produktionsprozess werden hierdurch geeignete alternative Ressourcen zugeordnet. Anschließend wird die Verfügbarkeit der geeigneten Ressourcen ermittelt und realisierbare Ressourcenfolgen miteinander verknüpft. Bild 5-9 zeigt verschiedene Varianten der Verknüpfung zur Herstellung des Griffstücks. Die Bauteilanforderung hoher Individualisierungsgrad fordert eine Kombination von Ressourcen mit einer hohen Flexibilität, da die Geometrie lediglich in ihren Ausmaßen eingeschränkt ist. Die Ressourcenfolge in der Variante 3 stellt eine gute Kombination aus einer hohen Flexibilität und einer guten Wirtschaftlichkeit dar: Die kundenindividuell definierten Geometrien des Griffstücks können direkt in Form eines CAD-Modells als Basis für die Programmierung der CNC-Ressourcen verwendet werden. Zudem ermöglicht die Verwendung eines CNC-Bearbeitungszentrum, Sonderbearbeitungsprozesse und das Ausweichen von Drehprozessen im Fall einer Störung der CNC-Drehmaschine auf dieses. Wirtschaftlich gesehen ist es dennoch sinnvoll, die Drehprozesse auf einer CNC-Drehmaschine zu fertigen, da die Bearbeitungszeiten geringer sind und der Maschinenstundensatz eines CNC-Bearbeitungszentrums meist höher ist. Aufgrund der kundenindividuellen Geometrie des Griffstücks ist es am sinnvollsten, dieses an einem Handarbeitsplatz zu montieren.

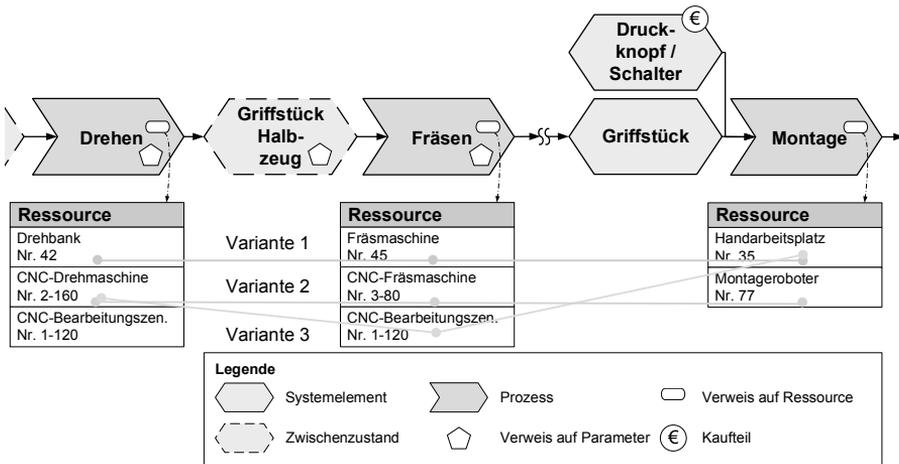


Bild 5-9: Ressourcenfolge am Beispiel Griffstück (Ausschnitt) nach [Nor12, S. 136]

Abschließend wird das Ressourcendiagramm der favorisierten Variante mittels der Spezifikationstechnik CONSENS<sup>41</sup> erstellt (Bild 5-10). Zudem werden die im Unternehmen identifizierten alternativen Ressourcen und Ressourcenfolgen dokumentiert. Diese stehen somit für eine weiterführende Analyse der Produktion (vgl. Kapitel 5.3) zur Verfügung.

Das Konzept des Produktionssystems liegt somit als Informationsbasis für weitere Konkretisierungsschritte vor [Nor12, S. 137]. Diese Konkretisierungsschritte sehen u. a. die Detaillierung des Materialflusses vor. Hierzu werden im folgenden Abschnitt die Transportsysteme definiert sowie die Lagersysteme ausgelegt.

<sup>41</sup> vgl. Kapitel 2.3.2

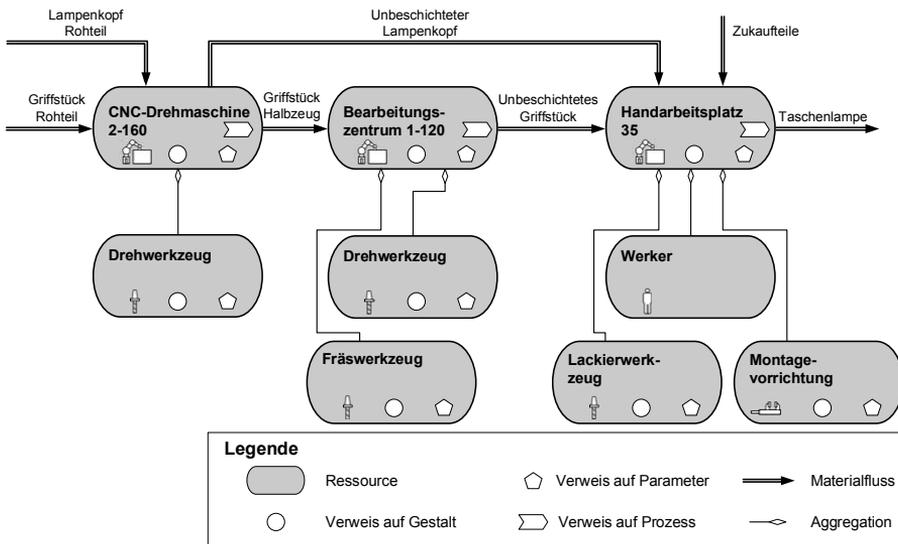


Bild 5-10: Ressourcendiagramm des Produktionssystemkonzeptes der Taschenlampe nach [Nor12, S. 137]

## 5.2.4 Detaillierung der Grundstruktur

Zum Aufbau des Simulationsmodells einer selbstoptimierenden Produktion werden weiterführende Informationen zu Lager- und Transportmitteln benötigt. Insbesondere der Materialfluss und dessen Komponenten stehen im Fokus der Betrachtung. BAUER [Bau15] setzt in der Phase der Konzipierung auf Ressourcenebene an und erweitert diese u. a. um die Festlegung des innerbetrieblichen Materialflusses. Unter Verwendung der von BAUER definierten Modellierungsregeln wird im Folgenden das Produktionssystemkonzept der Taschenlampe hinsichtlich der Materialflüsse detailliert.

Zunächst werden die Fördermittel des Transports definiert. Aufgrund der zuvor erarbeiteten Informationen, wie bspw. Abmessungen der Bauteile, hoher Individualisierungsgrad oder abgeschätzte Taktzeiten der Produktionsprozesse, schränkt sich der Lösungsraum für das Transportsystem ein. Hinzu kommen allgemeine Kriterien bspw. Automatisierungsgrad, Pufferfähigkeit und Förderleistung. Diese müssen im konkreten Planungsfall möglichst gut hingehend der Anforderungen einer selbstoptimierenden Produktion erfüllt werden (vgl. Planungsorientierte Ziele der Produktion Kapitel 5.4.4). Aus diesem Grund wird ein Monorail Transportsystem<sup>42</sup> ausgewählt. Dieses ist in der Lage, den Transport mittels steuerbaren Shuttle über ein Schienennetzwerk zu realisieren und zeit-

<sup>42</sup> vgl. <http://www.montratec.com/>

gleich als Puffer zu fungieren. Somit zeichnet es sich durch einen hohen Automatisierungsgrad, einer hohen Pufferfähigkeit und einer hohen Flexibilität aus. Die Förderleistung kann flexibel angepasst werden durch die Anzahl der Schulte im Schienennetzwerk. Es nicht notwendig, Zwischenlager zu definieren, da das gewählte Transportsystem in der Lage ist, Bauteile zu puffern. Daher reicht es aus, ein Eingangslager und ein Ausgangslager für die Produktion der Taschenlampe zu definieren. Die Zukaufteile können dem Eingangslager ebenso entnommen werden wie Rohteile für die mechanische Bearbeitung. Bild 5-11 stellt die erweiterte und angepasste Ressourcenstruktur der Taschenlampenproduktion dar.

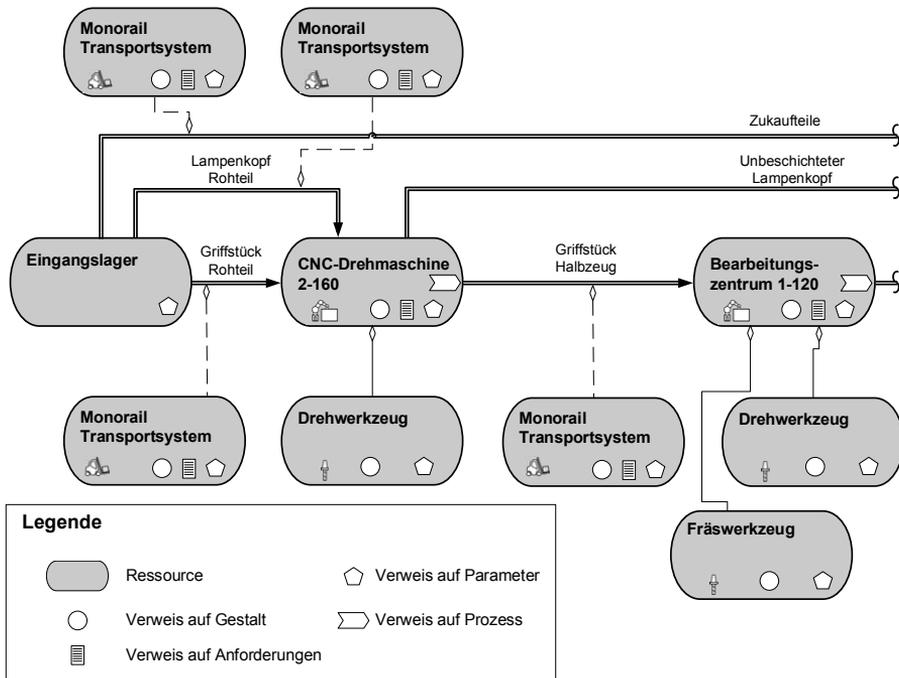


Bild 5-11: Ausschnitt<sup>43</sup> der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystemkonzeptes nach [Bau15, S. 140]

### 5.3 Aktuelle Produktion analysieren

Zur Realisierung eines selbstoptimierenden Produktionssystems müssen alle zu fertigen Produkte des Unternehmens berücksichtigt werden. Zudem ist es erforderlich, den Produktionsprozessen alternative Ressourcen zuzuordnen sowie diese alternative Zuordnung zu charakterisieren. Bild 5-12 zeigt das Vorgehen zur Analyse der aktuellen Produktion. Das Ziel ist eine Datenbasis, die es ermöglicht, alternative Arbeitspläne für die

<sup>43</sup> Vollständige Grundstruktur vgl. Anhang (Bild A-9)

zu fertigen Produkte des Unternehmens zu generieren. Die zu erarbeitenden Informationen werden hierzu in Kapitel 5.3.1 mittels der Produkt-Prozess-Matrix und in Kapitel 5.3.2 anhand der Prozess-Ressourcen-Matrix beschrieben.

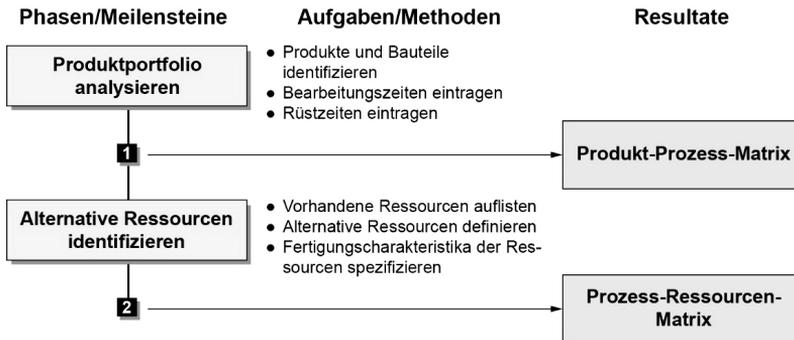


Bild 5-12: Vorgehen bei der Analyse der aktuellen Produktion

### 5.3.1 Produktportfolio analysieren

Die Basis für die Produkt-Prozess-Matrix bilden die in der Produktionssystemkonzipierung definierten Prozesse und deren hinterlegte Parameter. Des Weiteren werden die bereits ausgewählten Ressourcen der jeweiligen Prozesse aufgeführt. Die Daten der Produkte, die bereits im Unternehmen auf den betrachteten Ressourcen hergestellt werden, werden dem Planungssystem entnommen oder aus statischen Planungsdaten extrahiert. Bild 5-13 zeigt einen Ausschnitt der Produkt-Prozess-Matrix<sup>44</sup> des Unternehmens SPSE-Lights für das konzipierte Produktionssystem. In den Feldern der Matrix werden die Bearbeitungszeiten und die Rüstzeiten eingetragen, wenn ein Bauteil auf einem der in den Spalten gelisteten Ressourcen gefertigt oder mit weiteren Bauteilen montiert werden soll.

<sup>44</sup> Die Produkt-Prozess-Matrix wurde an dieser Stelle zur besseren Verständlichkeit grafisch dargestellt. Primär wird sie in Microsoft Excel überführt, um eine automatisierte Verarbeitung im Simulationsmodell zu realisieren.

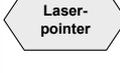
<b>Legende</b> BZ = Bearbeitungszeit RZ = Rüstzeit		 CNC-Drehmaschine 2-160	 Bearbeitungszentrum 1-120	 Handarbeitsplatz 35	 Handarbeitsplatz 35
Produkt	Bauteil				
 Taschenlampe	 Lampenkopf	BZ: 42 RZ: 80	-	BZ: 30 RZ: 160	BZ: 12 RZ: 0
	 Griffstück	BZ: 15 RZ: 120	BZ: 103 RZ: 180	-	BZ: 12 RZ: 0
	 Glas-scheibe	-	-	-	BZ: 142 RZ: 0
 Laserpointer	 Hülse	BZ: 38 RZ: 400	-	-	BZ: 19 RZ: 0
	 ...	...	...	...	...

Bild 5-13: Produkt-Prozess-Matrix der Bearbeitungszeiten (Ausschnitt)

Im Fall der Taschenlampe werden die Bauteile Lampenkopf und Griffstück getrennt von den Zukaufteilen aufgeführt. Der Lampenkopf wird laut dem Produktionssystemkonzept mit einer Bearbeitungszeit von 42 Sekunden auf der CNC-Drehmaschine gefertigt und am Handarbeitsplatz innerhalb von 30 Sekunden unter einer Absaugvorrichtung beschichtet. Das Bearbeitungszentrum fertigt nach einem Rüstvorgang von 180 Sekunden ein Griffstück innerhalb von 103 Sekunden, nachdem es in einer Vorbearbeitungsstufe auf der CNC-Drehmaschine bearbeitet wurde. Die Handhabungszeit für die Montage von Lampenkopf und Griffstück mit den jeweiligen Zukaufteilen wird mit 12 Sekunden am Handarbeitsplatz angegeben. Die Zukaufteile werden mit einer Bearbeitungszeit von 142 Sekunden in der letzten Spalte angegeben, da sie keine weiteren wertschöpfenden Prozesse durchlaufen.

### 5.3.2 Alternative Ressourcen identifizieren

Die Prozess-Ressourcen-Matrix stellt den Zusammenhang zwischen den ausgewählten Ressourcen des Produktionssystemkonzeptes und alternativen Ressourcen dar. Als Basis dienen die dokumentierten alternativen Ressourcen (vgl. Kapitel 5.2.3), das Erfahrungswissen des Planers, Daten des Planungssystems und konkrete Maschinenspezifika der verfügbaren Ressourcen. Im Unterschied zu der Produkt-Prozess-Matrix werden hier alle verfügbaren Ressourcen aufgeführt, die für eine Produktion des konzipierten Produktes in Frage kommen.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystemverhaltens ist die Definition der korrekten Anzahl alternativer Ressourcen. Das

zu entwickelnde System muss in der Lage sein, verschiedene alternative Pfade der Bauteile durch die Fertigung zu generieren. Dies ist nur möglich, wenn ausreichend viele alternative Lösungsmöglichkeiten in dieser Phase identifiziert werden können. Für jeden Produktionsprozess sollte mindestens eine Alternative zu der im Produktionssystemkonzept geplanten Ressource vorliegen. Ist dies nicht möglich, sollte das System um weitere redundante Ressourcen erweitert werden. Hierbei ist abzuwägen, ob eine Erweiterung zur Realisierung einer selbstoptimierenden Produktion wirtschaftlich sinnvoll ist. Das Ergebnis dieser Erweiterung wird in Form der Gestalt des Produktionssystems beschrieben. Auf Basis der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystems (vgl. Kapitel 5.2.4) und den vorhandenen bzw. alternativen Ressourcen kann dieses Modell des SPSE-Lights Produktionssystems erstellt werden (Bild 5-14). Die alternativen Ressourcen zur Herstellung der kundenindividuellen Taschenlampe wurden farblich hervorgehoben.

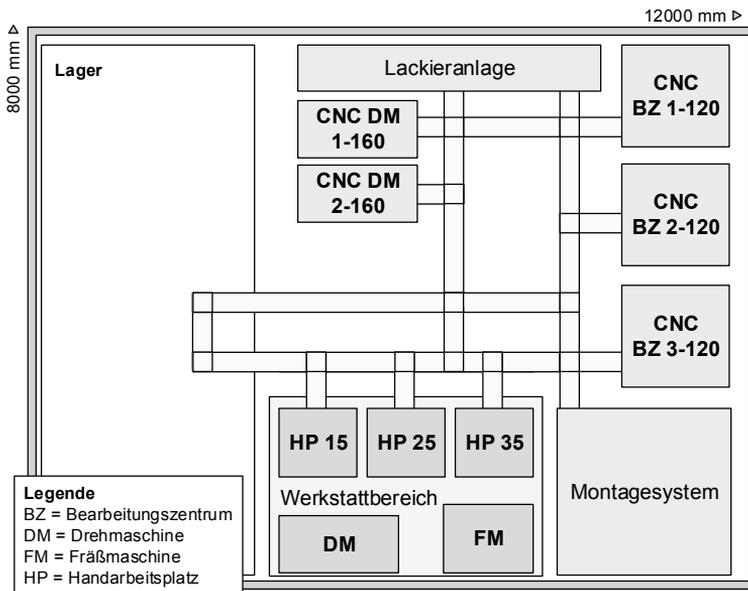


Bild 5-14: Gestalt des SPSE-Lights Produktionssystems nach [Bau15, S. 99]

Basierend auf der Erweiterung, die im Rahmen der Erstellung der Gestalt des Produktionssystems erarbeitet wurde, kann nun die Prozess-Ressourcen-Matrix aufgestellt werden. Die aufgestellte Prozess-Ressourcen-Matrix für das Anwendungsbeispiel zeigt Bild 5-15. In den jeweiligen Feldern der Matrix werden die für eine selbstoptimierende Fertigungssteuerung notwendigen Fertigungsfaktoren eingetragen. Der Wert wird relativ in Prozent als Vergleich zur ausgewählten Ressource des Produktionssystemkonzeptes eingetragen. Die Angabe erfolgt in diesem Format, da in dieser frühen Phase der Produktionssystementwicklung meist keine valide Angabe der konkreten Zahlenwerte möglich

ist. Als Fertigungsfaktoren<sup>45</sup> werden **Zeit** (Bearbeitungszeit und Rüstzeit), **Qualität** (Oberflächengüte und Maßhaltigkeit) und **Kosten** (Energiekosten) verwendet. Der Produktionsprozess Drehen kann bspw. alternativ auf dem Bearbeitungszentrum 1-120, 2-120 und 3-120 erfolgen. Hierbei ist jedoch mit einer 1,5 fachen Bearbeitungs- und Rüstzeit, einer geringeren Qualität und 30 % höheren Energiekosten zu rechnen im Vergleich zur CNC-Drehmaschine 1-160.

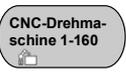
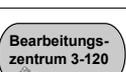
<b>Legende</b> Z = Zeit Q = Qualität E = Energiekosten				
 CNC-Drehmaschine 1-160	Z: 100% Q: 100% E: 100%	-	-	-
 CNC-Drehmaschine 2-160	Z: 100% Q: 100% E: 100%	-	-	-
 Bearbeitungszentrum 1-120	Z: 150% Q: 80% E: 130%	Z: 100% Q: 100% E: 100%	-	-
 Bearbeitungszentrum 2-120	Z: 150% Q: 80% E: 130%	Z: 100% Q: 100% E: 100%	-	-
 Bearbeitungszentrum 3-120	Z: 150% Q: 80% E: 130%	Z: 100% Q: 100% E: 100%	-	-
 Handarbeitsplatz 35	Z: 800% Q: 50% E: 20%	Z: 800% Q: 50% E: 20%	Z: 100% Q: 100% E: 100%	Z: 100% Q: 100% E: 100%

Bild 5-15: Prozess-Ressourcen-Matrix der Fertigungscharakteristika (Ausschnitt)

Die Zusammenhänge zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen ist somit vollständig beschrieben. Auf Basis dieser Informationen können automatisiert theoretisch realisierbare Arbeitspläne mittels Multiplikation der Matrizen erstellt werden (vgl. Kapitel 5.4.3).

<sup>45</sup> In Anlehnung an die oberste Ebene des Zielsystems der Produktion nach KRAMER [Kra02, S. 104] (vgl. Kapitel 5.4.4).

## 5.4 Produktionssystemverhalten konzipieren

Das Produktionssystemkonzept enthält mit dem vorherigen Schritt eine vollständige Informationsbasis für die Spezifikation des Verhaltens des Produktionssystems. In dieser Phase werden die logischen Zusammenhänge des Verhaltens<sup>46</sup> der Produktion beschrieben. Die Modellierung des Verhaltens erfolgt im Rahmen des definierten Vorgehens in vier Stufen (Bild 5-16). Die ausführende Instanz der Verhaltensanpassung eines Produktionssystems ist die Fertigungssteuerung. Daher liegt der Fokus der Verhaltensbeschreibung des Produktionssystems auf der Fertigungssteuerung, welche zwischen den PPS/ERP-Systemen und den Herstellprozessen agiert (vgl. Kapitel 2.6.1). In Kapitel 5.4.1 werden die steuerungsrelevanten Ablaufprozesse des Produktionssystems auf Basis der vorhandenen Planungsergebnisse konzipiert. Hierzu wird das Partialmodell Verhalten-Aktivitäten der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Kapitel 3.2.1) verwendet und adaptiert. Es fokussiert im ursprünglichen Sinn die Modellierung der Aktivitäten des Verhaltens eines Produktes als eines von sieben kohärenten Partialmodellen der Produktkonzipierung (vgl. Kapitel 2.3.2). In Kapitel 5.4.2 wird dieses Konzept der Ablaufprozesse konkretisiert. Hierzu wird die Methode ARIS (vgl. Kapitel 3.2.2) als Basiskonstrukt verwendet und bedarfsgerecht hingehend der Anforderungen der detaillierten Verhaltensbeschreibung einer Fertigungssteuerung erweitert. Insbesondere die Datensicht zur Konzipierung des Verhaltens ist für die Verwendung von ARIS ausschlaggebend und ermöglicht die vollständige Beschreibung einer Fertigungssteuerung. Die Erweiterung der Fertigungssteuerung um verhaltensrelevante Funktionen der Selbstoptimierung erfolgt in Kapitel 5.4.3. Hierzu wird einleitend die grundsätzliche Struktur der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im Kontext der Informationsverarbeitung der Produktion erläutert. Abschließend wird in Kapitel 5.4.4 die Definition und initiale Gewichtung des Zielsystems beschrieben, welches erforderliche Anpassungen des Produktionssystemverhaltens maßgeblich determiniert.

---

<sup>46</sup> Unter dem Verhalten der Produktion wird die Summe aller, für den Materialfluss relevanten, Aktionen eines Produktionssystems in einer bestimmten Situation verstanden (vgl. Kapitel 2.1.5).

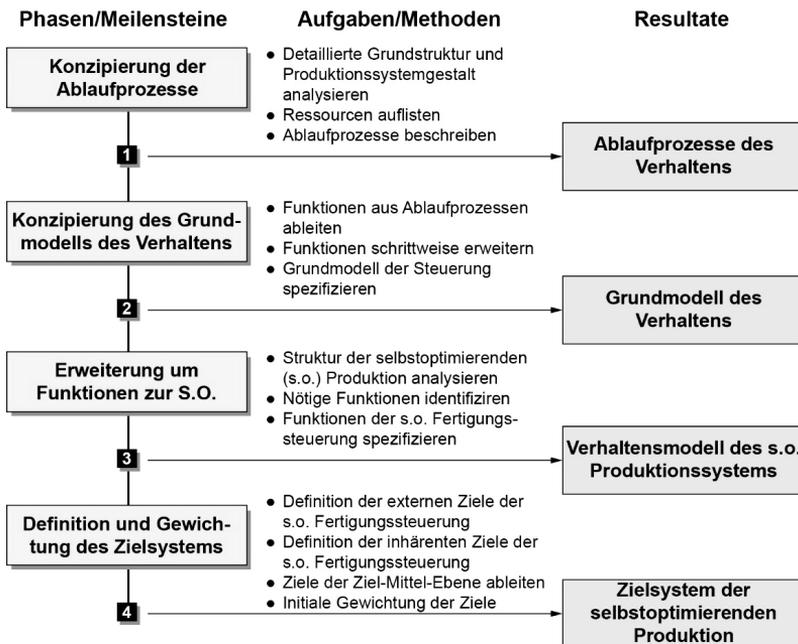


Bild 5-16: Vorgehen bei der Konzipierung des Produktionssystemverhalten

#### 5.4.1 Konzipierung der Ablaufprozesse

Auf Basis der zuvor erarbeiteten Planungsergebnisse werden die Ablaufprozesse des Verhaltens konzipiert. Hierzu werden zunächst die detaillierte Grundstruktur und die Gestalt des Produktionssystems analysiert. Die verwendeten Ressourcen werden aufgelistet und das Wissen über das Produktionssystemkonzept genutzt, um den ersten Schritt der Konzipierung des Verhaltens des Produktionssystems durchzuführen. Bild 5-17 zeigt das Prinzip des adaptierten Partialmodells Verhalten-Aktivitäten zur Beschreibung der Ablaufprozesse des geplanten Produktionssystems. Zur Erarbeitung einer Informationsbasis mit allen Beteiligten der Produktionssystemplanung wird bewusst im ersten Schritt der Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells auf dieser Abstraktionsebene begonnen. Zur Konzipierung der Ablaufprozesse wird das Verhalten jeder Ressource des geplanten Produktionssystems in einer gerichteten Prozesskette beschrieben. Dabei wird auf mögliche Wechselwirkungen mit den Ablaufprozessen weiterer Ressourcen geachtet. Des Weiteren werden die übergeordneten Ablaufprozesse gemeinsam mit den Ressourcen-Ablaufprozessen iterativ konzipiert. Die übergeordneten Ablaufprozesse beschreiben dabei implizit die notwendigen Funktionen der Fertigungssteuerung und deren zeitliche Zuordnung.

### Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells – Schritt 1

Die Ablaufprozesse werden durch Nomen und Verb beschrieben, z. B. *Montage durchführen*. Eine gestrichelte Außenkontur kennzeichnet einen optionalen Ablaufprozess, wie bspw. *Maschine rüsten*. Zudem ist eine mögliche Parallelisierung der Ablaufprozesse anhand eines Verweises markierbar. Dieser Verweis ermöglicht es, die Übersichtlichkeit der Beschreibungsform zu wahren, da alle Prozesse in einer stringenten Kette dargestellt werden können.

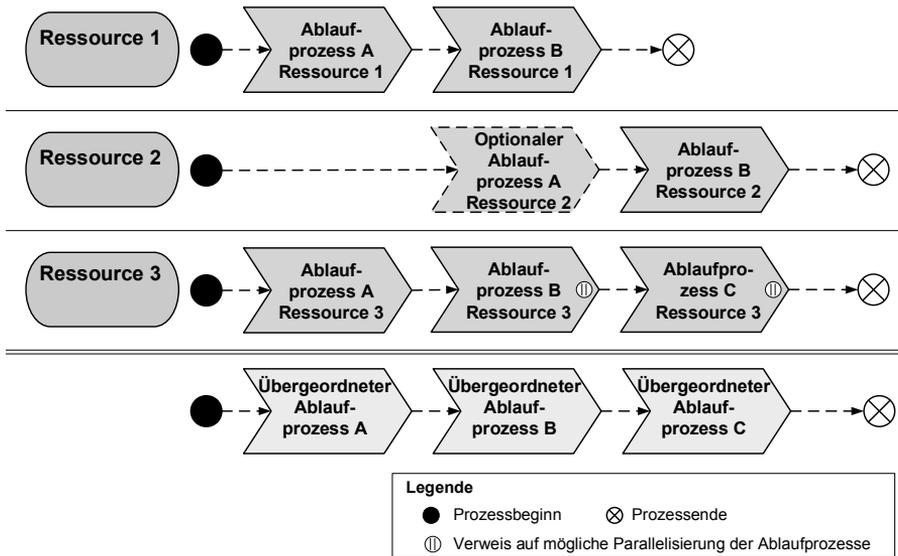


Bild 5-17: Darstellungsform der Ablaufprozesse des Produktionssystemverhaltens

Bild 5-18 verdeutlicht das Vorgehen anhand des konkreten Anwendungsbeispiels. Dargestellt ist ein Ausschnitt<sup>47</sup> der konzipierten Ablaufprozesse zur Herstellung der Taschenlampe. Der Ausschnitt beschreibt die Ablaufprozesse, ab dem Zeitpunkt, an dem ein Fertigungsauftrag verarbeitet wurde, bis zu dem Zeitpunkt, an dem die erste Ressource (CNC-Drehmaschine) mit Rohmaterial versorgt wird. Die Ablaufprozesse der Ressourcen des gleichen Typs sind prinzipiell gleich. Aus diesem Grund werden sie zu einem Ressourcen-Typ zusammengefasst.

<sup>47</sup> Vollständiger Ablaufprozess vgl. Anhang (Bild A-10, Bild A-11, Bild A-12)

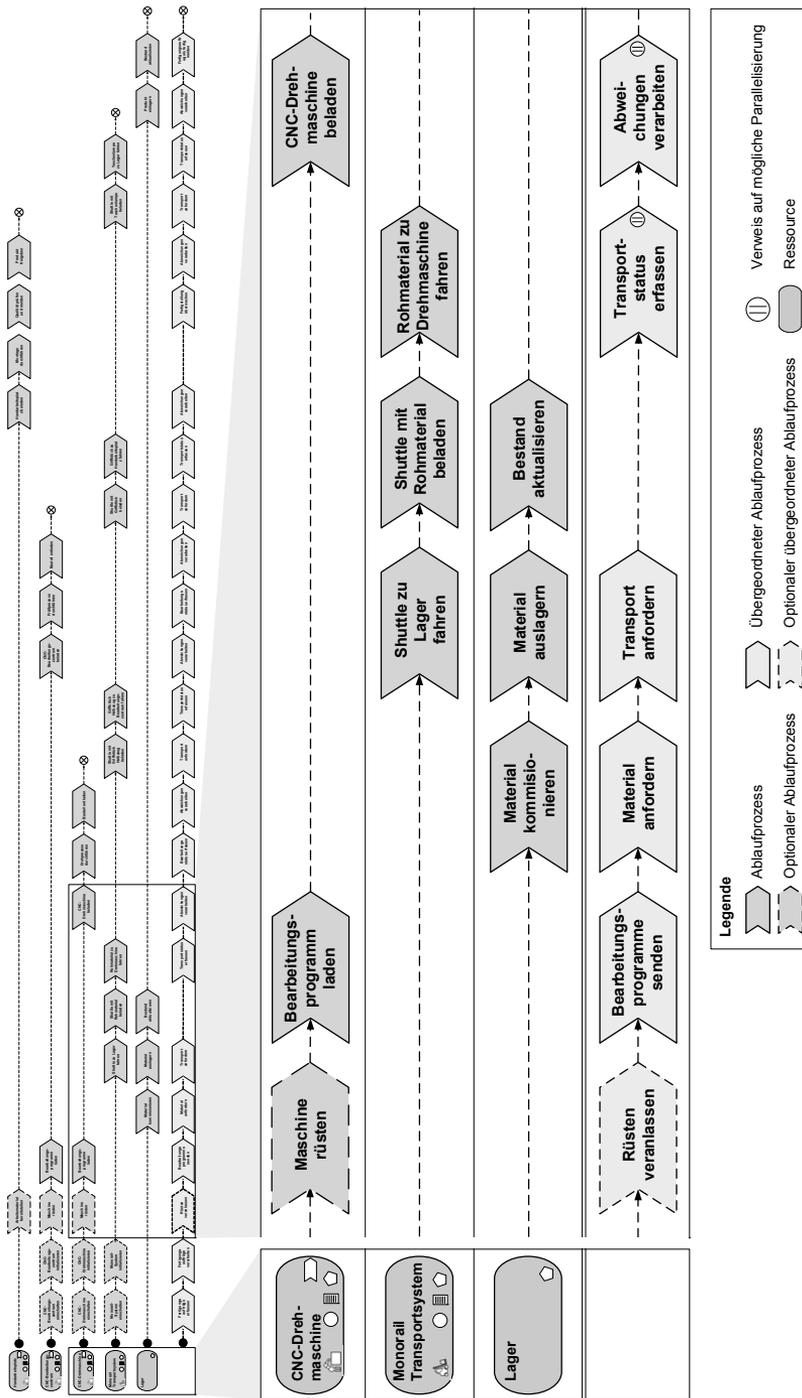


Bild 5-18: Ablaufprozesse des Produktionssystemverhaltens (Ausschnitt)

Im Anwendungsbeispiel sind Ressourcen des gleichen Typs u. a. die CNC-Drehmaschinen 1-160 und 2-160, die zu dem Typ *CNC-Drehmaschine* zusammengefasst werden. Auf Basis des eingegangenen Fertigungsauftrages wird es eventuell erforderlich, die CNC-Drehmaschine zu rüsten. Daher beginnt der Ausschnitt mit dem übergeordneten Ablaufprozess *Rüsten veranlassen* und dem Ablaufprozess *Maschine rüsten* als optionale Abläufe. Der nächste Schritt ist das Senden der Bearbeitungsprogramme aus einer übergeordneten Ebene und das Laden des Bearbeitungsprogramms auf Maschinenebene. Das Material zur Erfüllung des Fertigungsauftrags wird im folgenden Schritt von einer übergeordneten Ebene angefordert und in den Ablaufprozessen *Material kommissionieren* und *Material auslagern* von der Ressource Lager bereitgestellt. Als Reaktion auf den übergeordneten Ablaufprozess *Transport anfordern* wird die Prozesskette *Shuttle zu Lager fahren, Shuttle mit Rohmaterial beladen* und *Rohmaterial zu Drehmaschine fahren* des Monorail Transportsystems definiert. Nachdem der Transportstatus erfasst und die Abweichungen verarbeitet wurden, wird die Drehmaschine beladen. Da diese Prozessschritte prinzipiell parallel stattfinden könnten, sind sie mit dem dementsprechenden Verweis gekennzeichnet.

#### 5.4.2 Konzipierung des Grundmodells des Verhaltens

In diesem Schritt wird das Grundmodell des Verhaltens des Produktionssystems konzipiert. Das Ziel ist die Spezifikation des Grundmodells der Fertigungssteuerung des geplanten Produktionssystems. Es beschreibt die Funktionsweise der Fertigungssteuerung und bildet eine Basis für die Erstellung notwendiger Steuerungsmethoden in einem Simulationsmodell (vgl. Kapitel 5.6.2). Im Folgenden wird zunächst der zweite Schritt der entwickelten Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells erklärt. Gemäß dieser Vorschrift wird anschließend das Verhaltensmodell der Fertigungssteuerung des Anwendungsbeispiels spezifiziert und erläutert.

##### Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells – Schritt 2

Grundsätzlich besteht das entwickelte Verhaltensmodell aus sechs Konstrukten (Bild 5-19). Die Konstrukte Ereignis und Funktion sowie die Beschreibungsform in einem Vorgangskettendiagramm (VKD) wurden direkt aus der Methode ARIS<sup>48</sup> (vgl. Kapitel 3.2.2) übernommen. Das Konstrukt Datenelement, welches in der ARIS Methode auf der obersten Ebene generischen bzw. auf der sehr detaillierten Ebene als ERM<sup>49</sup> modelliert wird [Sch01], wurde unterteilt in Informationen und Datenquellen. Des Weiteren wurden die Konstrukte Routine und Abfrage ergänzt. Die Darstellung in einem Vorgangskettendiagramm hat den wesentlichen Vorteil, dass jedes Ereignis und jede Funktion schrittweise mit den notwendigen Informationen und Abfragen verknüpft werden. Die Abbildung der

---

<sup>48</sup> ARIS: Architektur Integrierter Informationssysteme

<sup>49</sup> ERM: Entity-Relationship-Modell [Gad01, S. 110ff.]

notwendigen Grundlagen für den Aufbau der Steuerungsmethoden in einem Simulationsmodell (vgl. Kapitel 5.6.2) geht mit diesem systematischen Vorgehen einher. Im Folgenden werden die einzelnen Konstrukte zur Beschreibung des Verhaltens der Fertigungssteuerung erläutert.

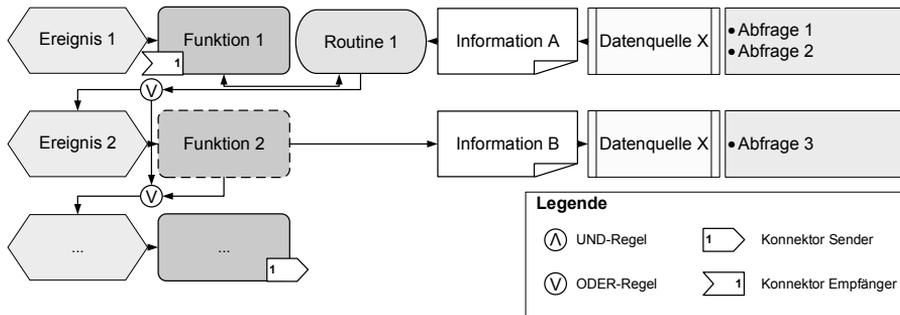


Bild 5-19: Aufbau der Konstrukte des Verhaltensmodells des Produktionssystems

- **Ereignisse** beschreiben eingetretene Zustände, wie bspw. *Fertigungsauftrag erhalten* und können eine oder mehrere Funktionen auslösen. Funktionen können wiederum ein oder mehrere Ereignisse auslösen.
- **Funktionen** definieren die Umwandlung von einem Eingangszustand in einen Ausgangszustand. Meist können Funktionen in weitere Sub-Funktionen unterteilt werden. Diese Sub-Funktionen werden, falls dies erforderlich ist, in Form einer Funktionshierarchie abgebildet.
- **Routinen** sind Verhaltenselemente, die in einem Muster hinterlegt werden, da sie mehrfach ablaufen können. Des Weiteren können Abläufe in Routinen hinterlegt werden, die nicht im Detail durch die Fertigungssteuerung beeinflusst werden können, wie bspw. die internen Abläufe einer Ressource. Routinen haben immer die gleichen Ein- und Ausgangsgrößen und lösen immer die gleichen Ereignisse aus. Routinen werden direkt durch eine Funktion aktiviert.
- **Informationen** enthalten konkrete Werte oder Datenmengen, die von der Fertigungssteuerung verarbeitet werden können und notwendig sind, um eine Funktion oder eine Routine durchzuführen.
- **Datenquellen** beschreiben die Systeme oder Datenbanken, in denen die benötigten Informationen zur Durchführung von Funktionen bzw. Routinen enthalten sind.
- **Abfragen** enthalten die Fragestellungen, die wesentlich für die Reaktionen der Fertigungssteuerung auf die vorliegende Situation sind. Die Abfragen werden möglichst kurz, aber aussagekräftig beschrieben, wie bspw. *Ressource einsatzbereit?*. Es ist möglich, dass mehrere Abfragen zur Erfüllung einer Funktion bzw. einer Routine beantwortet werden müssen.

Die **Beschreibungsform** des Modells richtet sich nach dem Vorgangskettendiagramm. Die Ereignisse sind dabei die Auslöser der Funktionen und können wiederum von Funktionen ausgelöst werden. Es ist möglich, die Verbindungen zwischen den Konstrukten mit Regeln zu ergänzen. Es besteht die Möglichkeit, eine **UND-Regel** sowie eine **ODER-Regel** zu verwenden. Des Weiteren wird ein **Konnektor** mit einem Sender- und einem Empfänger-Symbol eingeführt. Dieser ermöglicht es, die Übersichtlichkeit der Verhaltensbeschreibung zu wahren, indem er Rücksprünge und das Überspringen von Funktionen ermöglicht.

Die erste Aufgabe in der Konzipierung des Verhaltens ist die **Überführung der übergeordneten Ablaufprozesse** der Verhaltenskonzipierung. Diese beschreiben die notwendigen Funktionen der Fertigungssteuerung zur Herstellung der Produkte. Hierzu werden zunächst alle übergeordneten Ablaufprozesse aufgelistet und redundante Funktionen identifiziert. Diese redundanten Steuerungsfunktionen (z. B. Bearbeitungsstatus erfassen) werden im späteren Verlauf in Verhaltens-Routinen zusammengefasst, um somit die Komplexität des Verhaltensmodells zu minimieren. Die überführten Funktionen der Steuerung zeigt Bild 5-20. Zu den identifizierten Funktionen, die der Steuerung und Überwachung dienen, sind ergänzende Standardfunktionen einer Fertigungssteuerung aufgelistet. Diese Funktionen spiegeln die Merkmale einer Fertigungssteuerung<sup>50</sup> wider und müssen dementsprechend bei der Konzipierung des Verhaltens berücksichtigt werden. Auf Basis der aufgelisteten Funktionen wird im nächsten Schritt das Verhaltensmodell der Fertigungssteuerung erstellt.

---

<sup>50</sup> Merkmale einer Fertigungssteuerung: Feindisposition (Zuordnung der Aufträge zu den Ressourcen), Kompensation von Störungen sowie Steuerung und Überwachung der Herstellprozesse [GP14, S. 35f.].

Funktionen zur Steuerung und Überwachung			Redundante Funktionen	Ergänzende Standardfunktionen
Fertigungsauftrag erfassen	Transport anfordern	Bearbeitungsstatus erfassen	Transport anfordern	
Fertigungsauftrag verarbeiten	Bearbeitungsprogramm senden	Fertigstellung überwachen	Transportstatus erfassen	Feindisposition durchführen
Rüsten veranlassen	Transportstatus erfassen	Fertigungsauftrag als fertig melden	Bearbeitungsstatus erfassen	Störungen kompensieren
Material anfordern	Abweichungen verarbeiten		Abweichungen verarbeiten	

Bild 5-20: Aufstellung der Steuerungsfunktionen der Taschenlampenproduktion

Gemäß der erläuterten Vorschrift wird die Fertigungssteuerung in diesem zweiten Schritt der Verhaltensbeschreibung konzipiert. Dabei wird zunächst das Grundmodell der Fertigungssteuerung, das dem FIFO-Prinzip<sup>51</sup> zugrunde liegt und den Kern der Steuerung bildet, erstellt. Dieses so erarbeitete Grundmodell der Fertigungssteuerung wird im dritten Schritt um die Funktionen der Selbstoptimierung erweitert. Bild 5-21 zeigt das Ergebnis der Verhaltensmodellierung<sup>52</sup> beginnend mit dem Ereignis der erfolgten Feindisposition. Den Ausgangspunkt für die Entwicklung der Fertigungssteuerung bilden die zuvor aufgestellten Steuerungsfunktionen. Schrittweise werden diese erweitert, um die Fragestellungen, die Datenquelle, die spezifische Information, das auslösende Ereignis und ggf. um ablaufende Routinen. Anhand der Funktion *Bearbeitungsprogramm senden* wird das Vorgehen nachfolgend exemplarisch erläutert. Diese Funktion löst direkt die Routine *Bearbeitungsprogramm laden* aus, die an der jeweils adressierten Ressource durchgeführt wird und lediglich von der Fertigungssteuerung überwacht wird. Hierzu müssen zunächst zwei wesentliche Abfragen beantwortet werden. *Welche Ressourcen* werden verwendet und *welche Bauteile* sollen auf der Ressource bearbeitet werden? Auf Basis der Beantwortung und anhand der Informationen des Arbeitsplanes kann die Fertigungssteuerung das benötigte *CNC-Programm* über das *Direct Numerical Control (DNC)* System an die

<sup>51</sup> FIFO (First in - First out) bezeichnet eine Regel der Reihenfolgebildung, bei der die Bearbeitung an den Ressourcen in der Reihenfolge durchgeführt werden, in der die Werkstücke an den Ressourcen eintreffen [LW05, S. 445].

<sup>52</sup> Vollständiges Grundmodell des Verhaltens inklusive paralleler Abläufe (z. B. Störung kompensieren) vgl. Anhang (Bild A-13)

relevanten Ressourcen senden. Ist der Vorgang abgeschlossen, wird das Ereignis *Bearbeitungsprogram geladen* ausgelöst.

Die Vorschrift zur Beschreibung des Vorgehensmodells versetzt den Planer somit in die Lage, bereits in der Phase der Konzipierung des Produktionssystems detaillierte Vorgaben zu dem angestrebten dynamischen Verhalten des geplanten Produktionssystems zu erstellen. Das Grundmodell des Verhaltens ist im weiteren Verlauf der Planung der Kern der Steuerung, auf den die Funktionen der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung zurückgreifen werden.

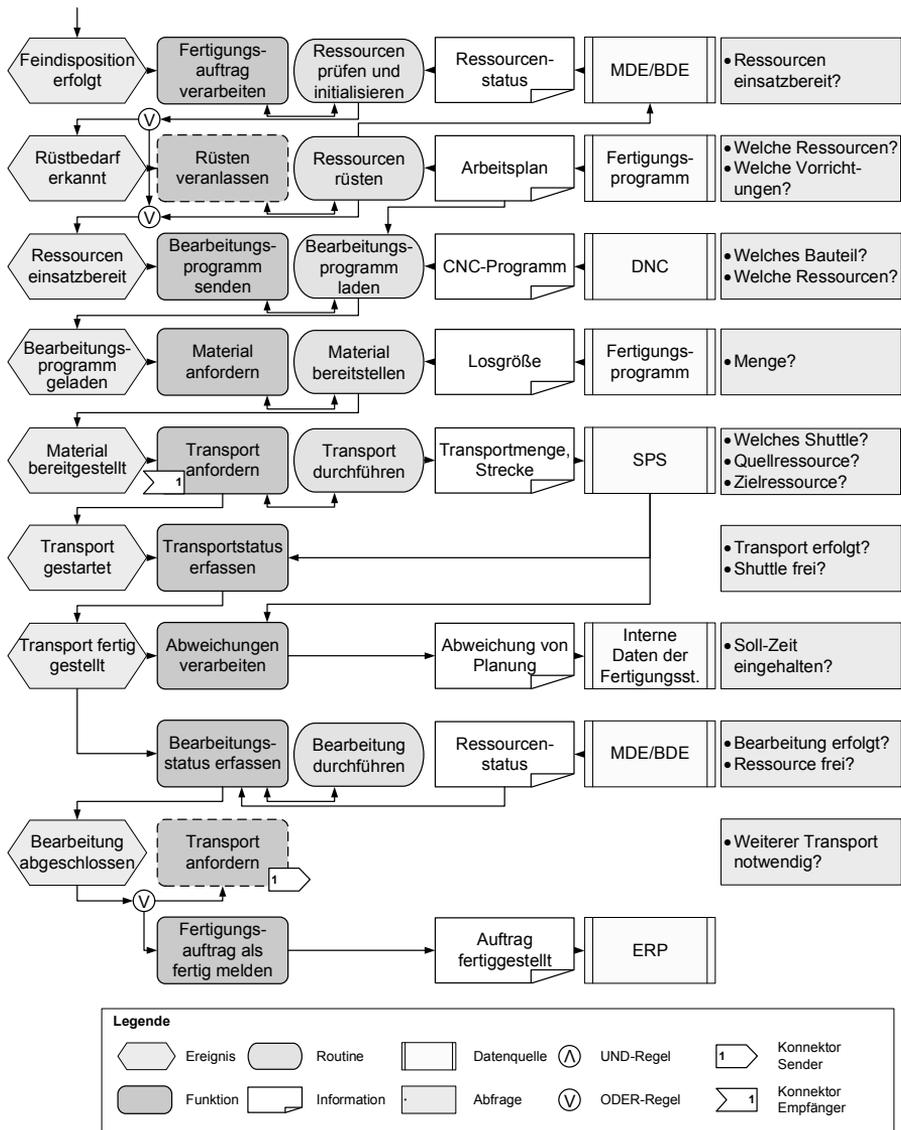


Bild 5-21: Grundmodell der Fertigungssteuerung der Taschenlampenproduktion

### 5.4.3 Erweiterung des Verhaltens um Funktionen zur Selbstoptimierung

Zur Erweiterung des Verhaltens um Funktionen zur Selbstoptimierung muss zunächst die Struktur der Produktion näher betrachtet werden. Das selbstoptimierende Verhalten einer Produktion ergibt sich aus einer Kombination des strukturellen internen Aufbaus der

selbstoptimierenden Fertigungssteuerung<sup>53</sup>, der zugeführten Daten der Informationssysteme der Produktion und der Anbindung der Fertigung. Bild 5-22 zeigt eine vereinfachte Darstellung einer selbstoptimierenden Fertigungssteuerung (SOFS) im Kontext der Informationsverarbeitung der Produktion. Die CRM- und ERP-Systeme liefern zum einen notwendige Eingangsinformationen für den Ablauf der SOFS, zum anderen werden die Rückmeldungen zum Status, Abweichungen und fertiggestellte Fertigungsaufträge an das ERP-System gesendet. Des Weiteren sind aktuelle Status- und Störmeldungen der Fertigung sowie eventuell auftretende externe Störeinflüsse (z. B. starker Energiepreisanstieg) Eingangsgrößen der SOFS.

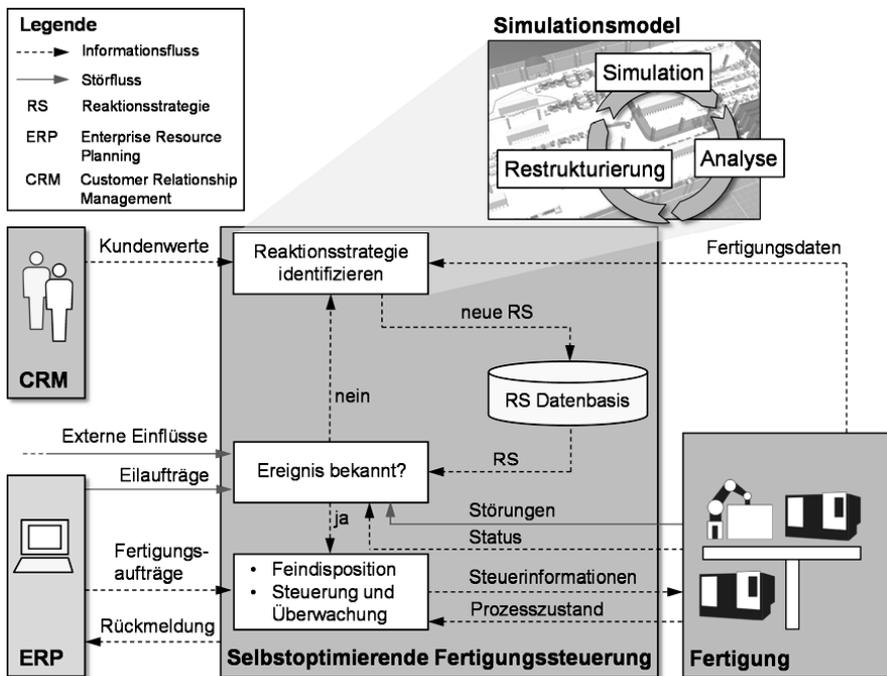


Bild 5-22: Struktur einer selbstoptimierenden Produktion in Anlehnung an [MGG+14]

Die interne Struktur der SOFS besteht aus vier Hauptelementen. Auf der untersten Ebene befindet sich die **Feinplanung** sowie die **Steuerung und Überwachung der Ressourcen**. Dieses ist ein rein reaktives Element, das lediglich nach festen Vorgaben agiert. Störungen, Eilaufträge und externe Störeinflüsse werden im reflexiven Element **Ereignis bekannt?** bearbeitet. Hierzu wird auf die **Reaktionsstrategie-Datenbasis** zugegriffen

<sup>53</sup> Die grundsätzliche Funktionsweise einer selbstoptimierenden Fertigungssteuerung wurde in [KGJ+16], [KGJ18] vorgestellt.

und die aktuelle Situation mit den vorhandenen Reaktionsstrategien abgeglichen. Als Reaktionsstrategie können alternative Arbeitspläne oder vollständige Fertigungsprogramme sein, die in der vorliegenden Situation eingesetzt werden können. Die **Identifikation von Reaktionsstrategien** bei unbekanntem Ereignissen wird mittels Materialflusssimulation in der Simulationssoftware Plant Simulation (vgl. Kapitel 3.5.2) realisiert. Hier kommt ein evolutionärer Algorithmus zum Einsatz, der hingehend eines Konvergenzkriteriums das Simulationsmodell optimiert. Das Konvergenzkriterium leitet sich hierbei aus dem Zielsystem ab (vgl. Kapitel 5.4.4). Falls eine Reaktionsstrategie identifiziert werden konnte, wird diese in der Reaktionsstrategie-Datenbasis abgelegt. Somit ist die selbstoptimierende Fertigungssteuerung in der Lage, aus unbekanntem Situationen zu lernen und das erlangte Wissen abzulegen. Der **Selbstoptimierungsprozess** vollzieht sich hierbei in drei Schritten. Zunächst findet die *Analyse der Ist-Situation* auf Basis der vorliegenden Informationen der Produktion statt. Die Optimierung des Fertigungsprogramms auf Basis des Zielsystems erfolgt im zweiten Schritt, der *Bestimmung der Systemziele*. In letzten Schritt, der *Anpassung des Systemverhaltens*, wird das Produktionssystemverhalten hingehend der Vorgaben des optimierten Fertigungsprogramms modifiziert [KGJ+16, S. 1035ff.], [KGJ18].

Den Ausgangspunkt für die **Erweiterung des Verhaltens um Funktionen zur Selbstoptimierung** bildet die zuvor vorgestellte Struktur der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung. Die Abläufe innerhalb dieser Struktur werden im Folgenden unter Berücksichtigung der Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells spezifiziert. Das Ziel ist es, die notwendigen Inhalte und Abfragen für Steuerungen (Methoden<sup>54</sup>) und Datenspeicher (Listen oder Tabellen<sup>55</sup>) zu identifizieren, die in dem aufzubauenden Simulationsmodell benötigt werden. Bild 5-23 zeigt einen Ausschnitt der Verhaltensbeschreibung<sup>56</sup> zur Analyse der Ist-Situation. Dem Ausschnitt voraus ging die Funktion „*Fertigungsauftrag erfassen*“. Es folgt die Erfassung und Speicherung der in Kapitel 5.3 eingeführten Planungsmatrizen. Die in den Planungsmatrizen hinterlegten Informationen über Zusammenhänge und Restriktionen werden für die automatisierte Generierung alternativer Arbeitspläne benötigt. Hierzu zählt bspw. die Zuordnung von Bauteilen und alternativen Ressourcen, die in der Lage sind, Prozessschritte der Bauteilbearbeitung durchzuführen. Die abgeleiteten alternativen Arbeitspläne werden im späteren Verlauf für die Optimierung des Fertigungsprogramms benötigt. Dementsprechend muss eine Tabelle *Arbeitspläne* im Simulationsmodell (SM) erzeugt werden, in der alle alternativen Arbeitspläne abgelegt werden können. Die Funktion *alternative Arbeitspläne ableiten* stellt zudem eine Grundlage für

---

<sup>54</sup> Methoden sind Simulations-Bausteine, die es in *Plant Simulation* ermöglichen, ein realistisches Systemverhalten mittels komplexen Steuerungen zu generieren. Hierzu kommt die Informationsflusssprache SimTalk zum Einsatz [Ban11, S. 9].

<sup>55</sup> Listen und Tabellen sind Informationsbausteine und werden in *Plant Simulation* verwendet, um Daten zu speichern [Ban11, S. 124ff.].

<sup>56</sup> Vollständige Verhaltensbeschreibung des Schrittes *Analyse der Ist-Situation* vgl. Anhang (Bild A-14)

die Erstellung einer Methode im Simulationsmodell dar. Zum einen wird klar, auf welche Informationen durch die Methode zugegriffen werden muss. Zum anderen wird die Fragestellung aufgezeigt, die prägnant den Kern der zu erstellenden Methode beschreibt.

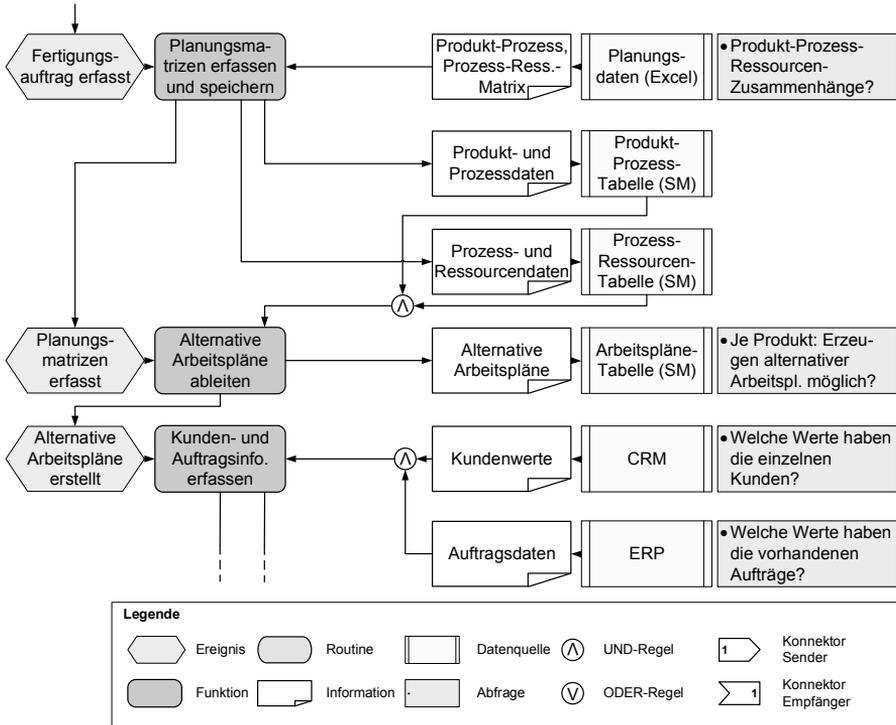


Bild 5-23: Ausschnitt der Verhaltensbeschreibung der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im ersten Schritt: Analyse der Ist-Situation

Bild 5-24 zeigt die abschließenden Schritte der Optimierung in dem zweiten Schritt des Selbstoptimierungsprozesses. Der Ausgangspunkt des Ausschnittes der Verhaltensbeschreibung<sup>57</sup> ist das Ereignis *Fertigungsprogramm variiert*. Dem Ereignis gehen mehrere Funktionen voraus u. a. zur Analyse der Durchlaufzeit, der Bestände und der Auslastung im Simulationsmodell sowie die Funktionen *Verschiebungsintervalle festlegen* zur Berücksichtigung der Kunden-Auftrags-Priorität. Die Kunden-Auftrags-Priorität legt hierbei fest, wie weit Fertigungsaufträge zeitlich im Fertigungsprogramm verschoben werden dürfen ohne zu hohe negative Auswirkungen für die Kundenbeziehungen (vgl. Kapitel 5.5). Das Verhaltensmodell zeigt zwei optionale Funktionen, die jeweils mit einem Konnektor Sender verknüpft sind. Diese Konnektoren führen die Simulation bei einem

<sup>57</sup> Vollständige Verhaltensbeschreibung des Schrittes *Bestimmung der Systemziele* vgl. Anhang (Bild A-15, Bild A-16)

Aufruf einer der Funktionen direkt zurück zu der Funktion *Ergebnisse der Materialflusssimulation analysieren*. Es wird so lange ein iterativer Ablauf der Simulation durchgeführt, bis das optimierte Fertigungsprogramm identifiziert wurde. Dieses Verhalten gibt die generelle Struktur des Simulationsmodells vor und fordert insbesondere ein Modell, das in der Lage ist, diese Rücksprünge und Analysen durchzuführen (vgl. Kapitel 5.6).

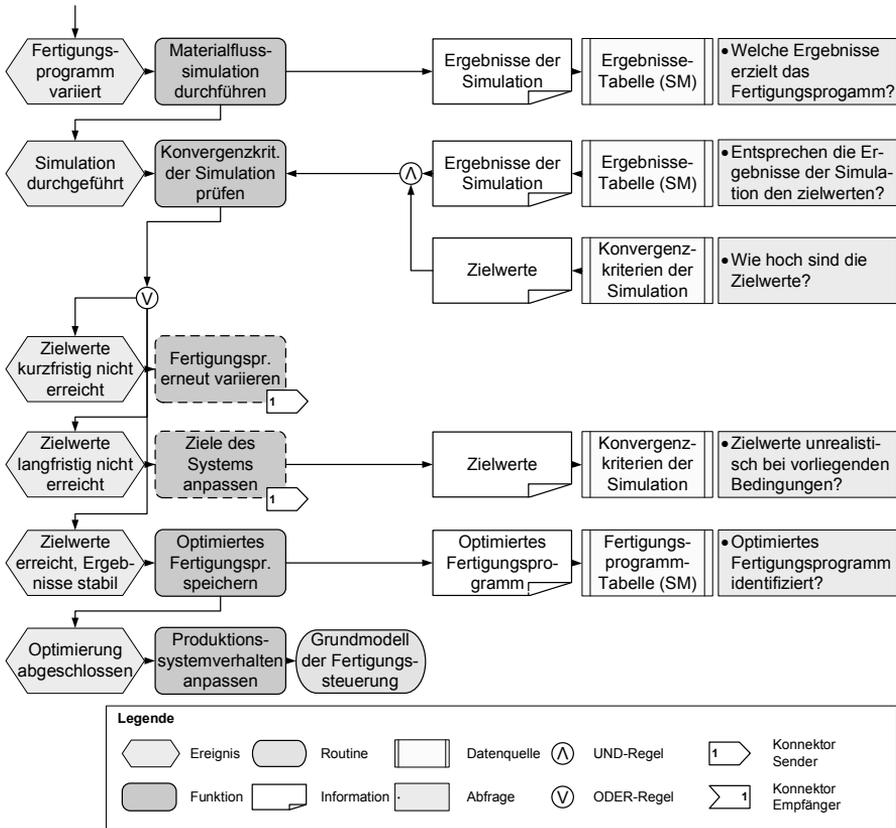


Bild 5-24: Ausschnitt der Verhaltensbeschreibung der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im zweiten Schritt: Bestimmung der Systemziele

Die Verhaltensanpassung geschieht über das Grundmodell der Steuerung, das bereits in Kapitel 5.4.2 erstellt wurde (Bild 5-21). Hierbei erweitert die Optimierung des Fertigungsprogrammes den Schritt der Feindisposition. Neben dem routinemäßigen Aufruf bei dem Eintreffen eines neuen Fertigungsauftrages ist das Auftreten einer Störung ein weiterer Auslöser für die Optimierung des Fertigungsprogramms. Die Beschreibung des Verhaltens der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im Fall einer Störung kann Anhang A-3 (Bild A-16) entnommen werden.

#### 5.4.4 Definition und initiale Gewichtung des Zielsystems

Nachdem das Verhaltensmodell aufgestellt wurde und somit die Funktionsweise der Steuerung definiert wurde, gilt es nun, das Zielsystem der selbstoptimierenden Produktion aufzubauen. Ein Zielsystem repräsentiert hierzu die inhärenten, externen und internen Ziele sowie deren Verknüpfungen. Zur Entwicklung einer selbstoptimierenden Produktion muss das Zielsystem zunächst definiert werden. In einem zweiten Schritt ist die initiale Gewichtung<sup>58</sup> des erstellten Zielsystems erforderlich. Diese Gewichtung ist auf Basis der individuellen Zielstellung des Unternehmens auszuprägen.

Für die Beschreibung des Zielsystems wird die Struktur nach POOK verwendet. Hierbei werden die externen und die inhärenten Ziele gegenübergestellt und jeweils hierarchisch strukturiert. Die unterste Ebene der Zielhierarchien bildet die Ziel-Mittel-Ebene (Bild 5-25). Ziele auf dieser Ebene können sowohl externe als auch inhärente Ziele adressieren. Die Ziele auf der Ziel-Mittel-Ebene setzen die abstrakten Ziele mit technischen Mitteln in Beziehung, die in der Lage sind, das Systemverhalten anzupassen [Poo11, S. 11].

Folgend der Definition nach ADEL T ET AL. [ADG+09, S. 20] werden als **externe Ziele** einer selbstoptimierenden Fertigungssteuerung die Ziele der Produktion verstanden. Diese Ziele geben die von außen gestellten Forderungen an die selbstoptimierende Fertigungssteuerung wieder. Des Weiteren werden die **inhärenten Ziele** der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung entsprechend dessen Entwurfszweck aufgestellt. Im Folgenden werden die externen und inhärenten Ziele der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung detailliert beschrieben.

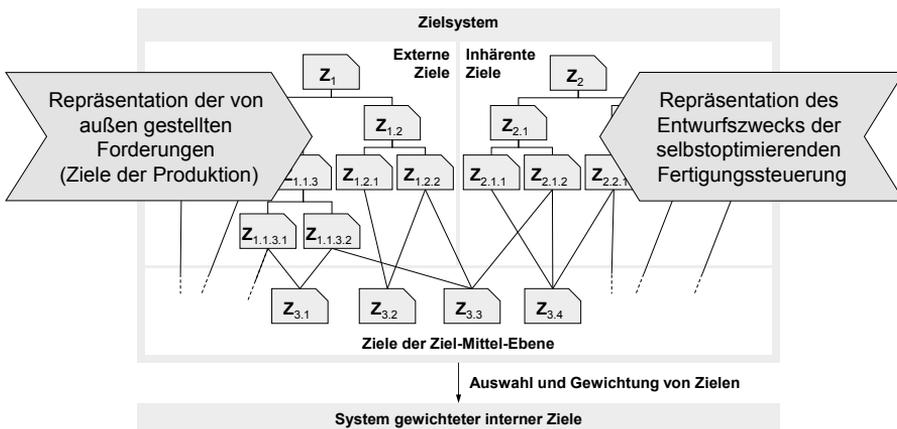


Bild 5-25: Struktureller Aufbau des Zielsystems nach [Poo11, S. 19]

<sup>58</sup> vgl. Kapitel 3.3.2

## Externe Ziele

Als Ausgangsbasis für die Definition der externen Ziele der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung wird das Zielsystem der Produktion nach KRAMER [Kra02] verwendet (vgl. Kapitel 3.4.5). Es vereint die relevanten Ansätze der Zieldefinition in der Produktion zu einem Zielsystem. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um ein statisches Zielsystem handelt, mit dem Entwurfszweck einer manuellen Einleitung von Verbesserungsprozessen. Bild 5-26 zeigt die abgeleitete Zielhierarchie der Produktion. Es wird differenziert in operative Ziele und planungsorientierte Ziele der Produktion. Die planungsorientierten Ziele werden in den Phasen der Produktionssystementwicklung berücksichtigt, wie bspw. das Ziel *max. Fertigungsmittelredundanz* (vgl. Kapitel 5.3.2). Relevant für die Funktion einer selbstoptimierenden Fertigungssteuerung sind die operativen Ziele. Dies sind die Ziele, die im Betrieb einer Produktion geändert bzw. umpriorisiert werden können und somit das Verhalten eines Produktionssystems bestimmen. Die operativen Ziele bilden dementsprechend die externen Ziele in dem zu definierenden Zielsystem. Die inhärenten Ziele des Systems sind Gegenstand des folgenden Abschnittes.

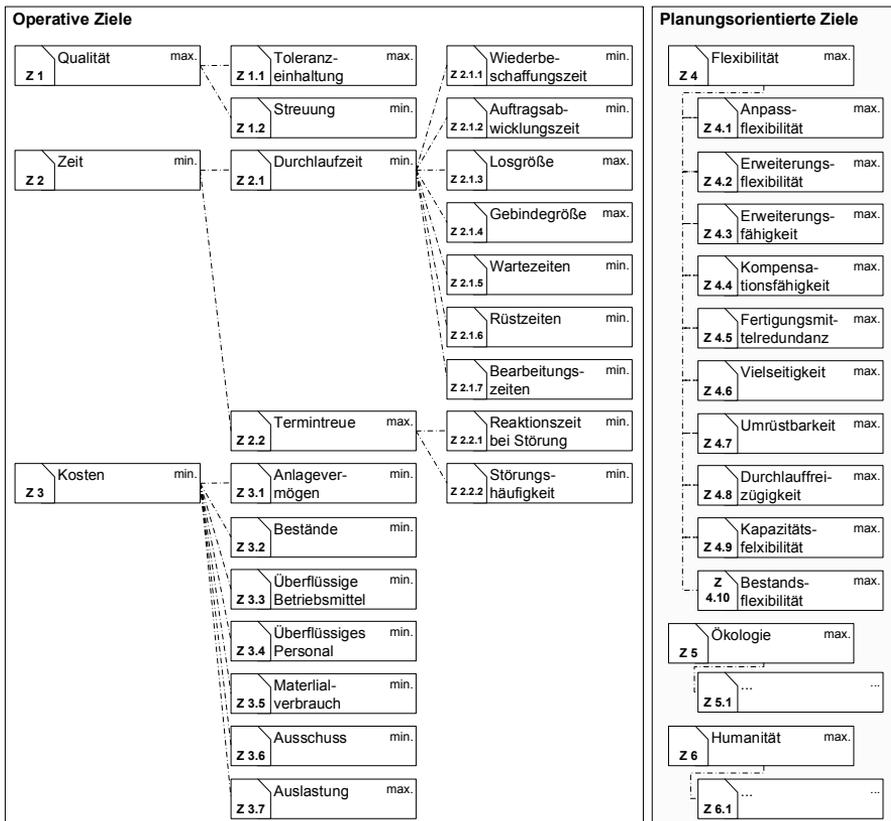


Bild 5-26: Hierarchie externer Ziele der Produktion in Anlehnung an [Kra02, S. 104]

### Inhärente Ziele

Die inhärenten Ziele der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung ergeben sich aus dem in Kapitel 5.4.3 erläuterten Verhalten. Bild 5-27 zeigt die aufgestellte Zielhierarchie der inhärenten Ziele. Es werden drei Ziele auf der obersten Ebene beschrieben, diese drei Ziele korrelieren mit den Hauptaufgaben der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung. Zur Realisierung einer zuverlässigen Feindisposition ist es erforderlich, sowohl Fertigungsaufträge als auch Eilaufträge kosten- und zeitorientiert sowie kundenorientiert einzulasten. Die kostenorientierte Zuordnung von Fertigungsaufträgen bedingt bspw. das bevorzugte Verwenden von Ressourcen, die geringe Energiekosten verursachen. Die kundenorientierte Zuordnung fokussiert hingegen z. B. die Berücksichtigung von Kundenbedürfnissen (z. B. Lieferdatum) und die Ausrichtung des Fertigungsprogrammes auf diese. Eine zeitorientierte Zuordnung wird bspw. durch die Minimierung von Durchlaufzeiten fokussiert. Einige Ziele des Zielsystems wie bspw. *minimale Ressourcenauslastung* widersprechen den externen Zielen der Produktion, führen jedoch ggf. zu dem Erfüllen eines übergeordneten Zieles. In diesem Fall führt es zu dem übergeordneten Ziel *maximale*

*Verfügbarkeit* und somit zu einem Maximum an Handlungsoptionen für eine zuverlässige Feindisposition. Im nächsten Abschnitt werden die Ziele des Systems auf der Ziel-Mittel-Ebene beschrieben.

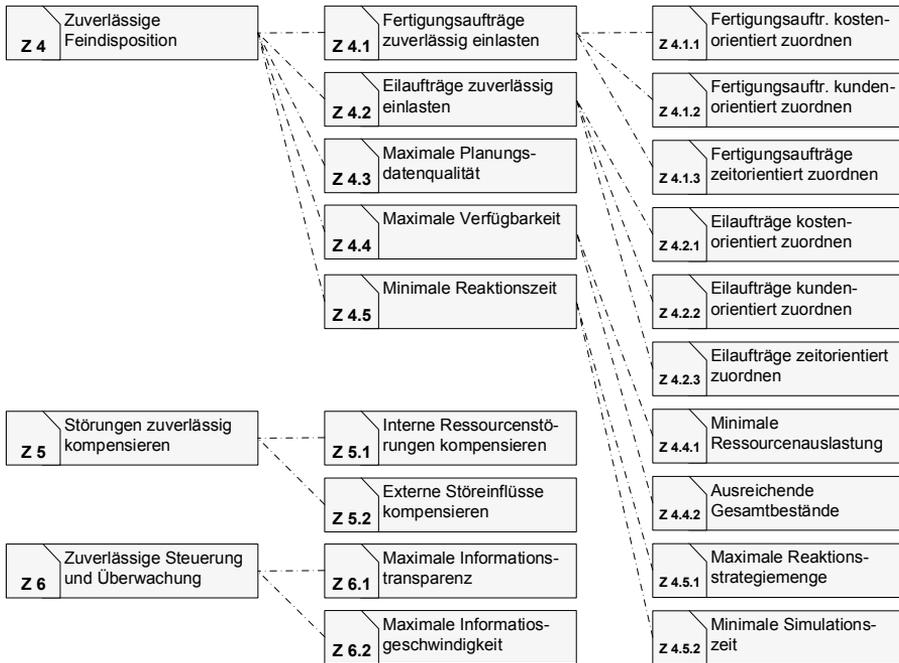


Bild 5-27: Hierarchie inhärenter Ziele der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung

**Ziele der Ziel-Mittel-Ebene**

Die Ziel-Mittel-Ebene enthält Ziele, die zur Verfolgung externer als auch inhärenter Ziele einen Beitrag leisten. Bild 5-28 zeigt eine Gegenüberstellung der externen und inhärenten Ziele auf der Ziel-Mittel-Ebene. Zu Steigerung der Übersichtlichkeit wurden ausgewählte Ziele in der Ziel-Mittel-Ebene dargestellt, die mit mehr als einem inhärenten oder externen Ziel übereinstimmen. Die Zusammenhänge zwischen zwei konfliktbehafteten Zielen des Systems wurden in Rot dargestellt und mit einem Ausrufezeichen versehen. Beispielsweise besteht ein Zielkonflikt zwischen einer *max. Leistung* und dem Ziel *min. Energiekosten*. Der Grund hierfür liegt darin, dass eine Maximierung der Leistung die Ressourcen mit einer geringen Durchlaufzeit adressiert, diese sind oftmals Energieintensiv. Somit erhöht sich der Energieverbrauch des Gesamtsystems. Das Ziel *min. Bestände an den Ressourcen* wurde in Unterziele, wie z. B. *min. Puffer an der Drehmaschine 1-160* detailliert. Dies stellt die direkte konkrete Beziehung der Ziele auf der Ziel-Mittel-Ebene mit den Produktionsressourcen exemplarisch dar.

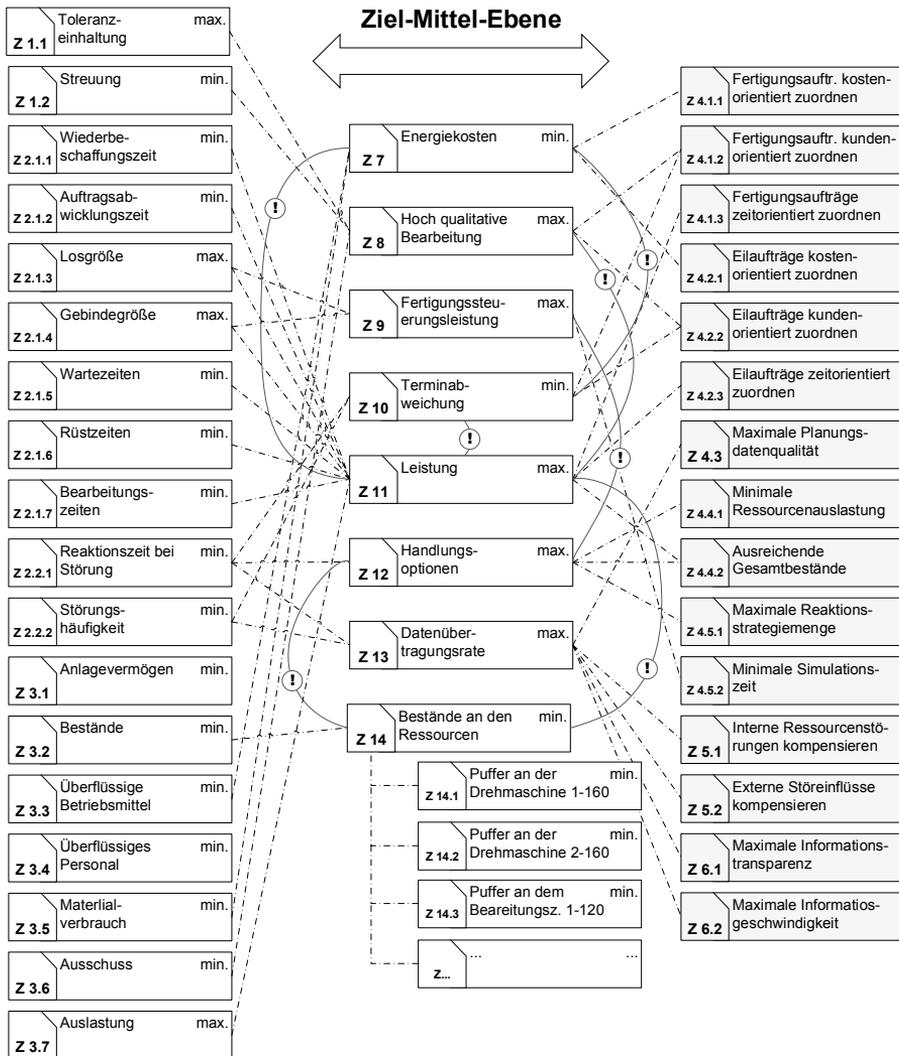


Bild 5-28: Ziele der Ziel-Mittel-Ebene mit möglichen Zielkonflikten

Die **Auswahl und Gewichtung der Ziele** ist ein iterativer Schritt, der durch die selbstoptimierende Fertigungssteuerung auf Basis der Ergebnisse der Simulation durchgeführt wird. Die Zielstellung des Unternehmens muss jedoch zuvor berücksichtigt werden. Dies geschieht über eine initiale Gewichtung der externen Ziele der Produktion. Diese Gewichtung wirkt sich anhand der Zielbeziehungen auf die internen Ziele des Systems aus. Die initiale Gewichtung der externen Ziele wird auf der obersten Ebene der Ziele der Produktion vorgenommen. Anhand der Zielstellung des fiktiven Leuchtmittelherstellers SPSE-Lights (vgl. Kapitel 4) wird dies im Folgenden erläutert.

Die Ziele der Produktion auf der obersten Hierarchieebene sind *max. Qualität*, *min. Zeit* und *min. Kosten*. Diese Ziele gilt es auf Basis der Unternehmenscharakteristik zu gewichten. Eine Gewichtung bedingt hierbei nicht, dass eines der drei Ziele vollständig vernachlässigt werden kann. Es dient vielmehr der Bildung einer Reihenfolge der Prioritäten für den wahrscheinlichen Fall, dass nicht alle Ziele im gleichen Maße erfüllt werden können und es zu einem Zielkonflikt kommt. Die SPSE-Lights ist ein Unternehmen, das ihren Kunden hoch individuelle Produkte in einer sehr geringen Lieferzeit verspricht. Daher ist die Zeit von der Bestellung bis zur Auslieferung an den Kunden der wesentliche Faktor für den Unternehmenserfolg. Die Produkte müssen in einer ausreichenden Qualität produziert werden, um keinen Imageschaden zu erleiden. Somit überwiegt das Ziel *min. Zeit* dem Ziel *max. Qualität*. Das Ziel *min. Kosten* ist für das Unternehmen SPSE-Lights der zentrale Erfolgsfaktor. Aus diesem Grund wird dieses Ziel wichtiger als die Maximierung der Qualität und die Minimierung der Zeit angesehen. Es ergibt sich folgende Reihenfolge der Gewichtung:

- 1) Minimale Kosten
- 2) Minimale Zeit
- 3) Maximale Qualität

Die Gewichtung wird über die Hierarchie der Ziele bis zur Ziel-Mittel-Ebene und somit zu den internen Zielen des Systems übertragen. Zum Beispiel wird die Gewichtung des Ziels *min. Zeit* auf die internen Ziele *max. Leistung* und *min. Terminabweichung* übertragen. Wie Bild 5-28 zu entnehmen ist, besteht zwischen diesen Zielen ein potentieller Zielkonflikt. Da das Ziel *max. Leistung* ebenfalls eine indirekte Zielbeziehung zu dem Ziel *min. Kosten* über das Ziel *max. Auslastung* besitzt, würde in diesem Fall das Ziel *min. Terminabweichung* niedriger gewichtet werden.

## 5.5 Kundenbeziehungen und Auftragslage analysieren

Die vierte Phase der Systematik ist die Analyse der Kundenbeziehungen und der aktuellen Auftragslage. Die Analyse liefert notwendige Informationen über die Kunden- und Auftragsprioritäten des Unternehmens. Das Ziel ist die Identifikation von Aufträgen, die innerhalb des Fertigungsprogrammes ohne negative Effekte auf das Gesamtunternehmen verschoben werden können. Die verschiebbaren Fertigungsaufträge werden durch die Analyse der Kundenbeziehungen und der Auftragslage dementsprechend klassifiziert. Diese Klassifikation findet anhand eines Wertes statt, der sog. Kunden-Auftrags-Priorität (KAP). Diese KAP beschreibt die Kombination aus der Priorität des Kunden und des einzelnen Auftrages für das Unternehmen [KGJ+16], [KGJ18]. Zur Analyse der Kundenbeziehungen werden hierzu zum einen die Daten des Customer Relationship Management Systems herangezogen. Zum anderen werden die Daten der Geschäftsanalyse sowie der Markt- und Umfeldprognose [Ihm10, S. 87ff.], die in der Phase der Strategischen Produktplanung ermittelt wurden, verwendet. Die benötigten Auftragsdaten der aktuell zu fertigenden Produkte liegen in der Produktionsplanung- und steuerung (PPS) bzw. im Enterprise Resource Planning (ERP) System vor. Des Weiteren werden die geplanten Absatzmengen für das konzipierte Produkt berücksichtigt. Bild 5-29 fasst den Ablauf und die erforderlichen Informationen zur Kunden-Auftrags-Priorisierung zusammen. Es bestehen keine direkten Wechselwirkungen zwischen der Ermittlung der Kundenpriorität (Kapitel 5.5.1) und der Auftragspriorität (Kapitel 5.5.2). Dementsprechend liegt keine Zwangsreihenfolge bei der Ermittlung der Prioritäten vor. Auf Basis der Kundenpriorität und der Auftragspriorität wird im Folgenden die Kunden-Auftrags-Priorität (Kapitel 5.5.3) gebildet. Als Ergebnis liegt eine detaillierte Aussage über die Größe tolerierbarer Lieferterminabweichungen auf Basis der KAP-Werte vor.

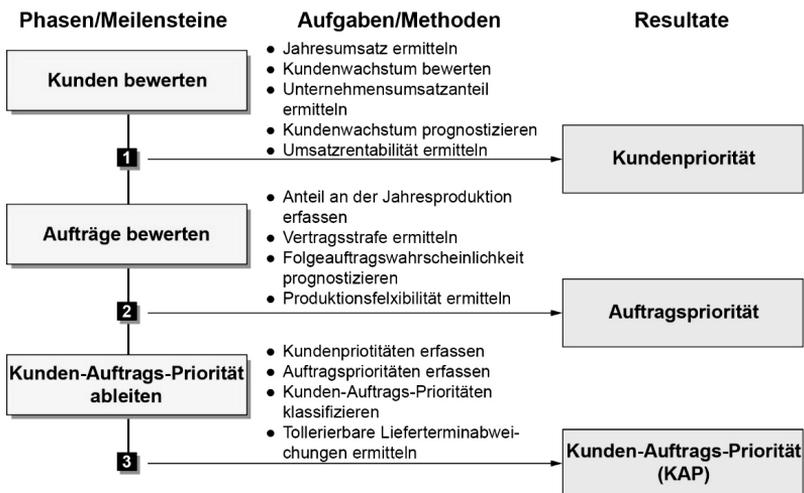


Bild 5-29: Vorgehen bei der Analyse von Kundenbeziehungen und Auftragslage

### 5.5.1 Kundenpriorität ermitteln

Die **Kundenpriorität** setzt sich aus den Kennzahlen **Kundenattraktivität** und **Kundennutzen** zusammen. Beide Kennzahlen sind unabhängig von der Auftragslage und dienen der transparenten Darstellung der Kundenbeziehung. Das Ziel ist es, die Kunden so zu bewerten, dass Aussagen über die Relevanz der Kunden ermöglicht werden.

Zur Erfassung der **Kundenattraktivität** werden die Faktoren *Jahresumsatz* und *Unternehmenswachstum* des jeweiligen Kunden bewertet. Als Datenbasis dienen die Informationen, die im Rahmen von Markt- und Kundenanalysen in der strategischen Produktplanung bereits generiert wurden. Der **Kundennutzen** setzt sich aus dem *Anteil am Unternehmensumsatz*, dem *zu erwartenden Kundenumsatzwachstum* und der *Umsatzrentabilität* zusammen. Der Anteil des Kundenumsatzes am eigenen Unternehmen wird der internen Finanzbuchhaltung<sup>59</sup> entnommen. Das zu erwartende Kundenumsatzwachstum in den nächsten fünf Jahren wird anschließend anhand von Controlling Methoden, wie bspw. der kleinsten Quadrate Methode [Men09, S. 86], prognostiziert. Im letzten Schritt wird die Umsatzrentabilität<sup>60</sup> (*return on sales*) des Kunden ermittelt [Ber02, S. 52].

Tabelle 5-1 zeigt ein unternehmensspezifisches Bewertungsschema zur Ermittlung der Kundenattraktivität am Beispiel des fiktiven Leuchtmittelherstellers SPSE-Lights. Hierzu werden zunächst die Bewertungsbereiche der einzelnen Faktoren in Expertendiskussionen definiert. Zum Beispiel erhält ein Kunde mit einem Jahresumsatz über 500 Mio. Euro aus Sicht des Unternehmens SPSE-Lights die höchste Bewertung von 5. Ein weiteres Beispiel ist ein Kunde mit einem Anteil am Unternehmensumsatz zwischen 1,5 % und 3 %. Dieser wird von SPSE-Lights initial mit einer geringen Bewertungskennzahl von 2 eingestuft.

---

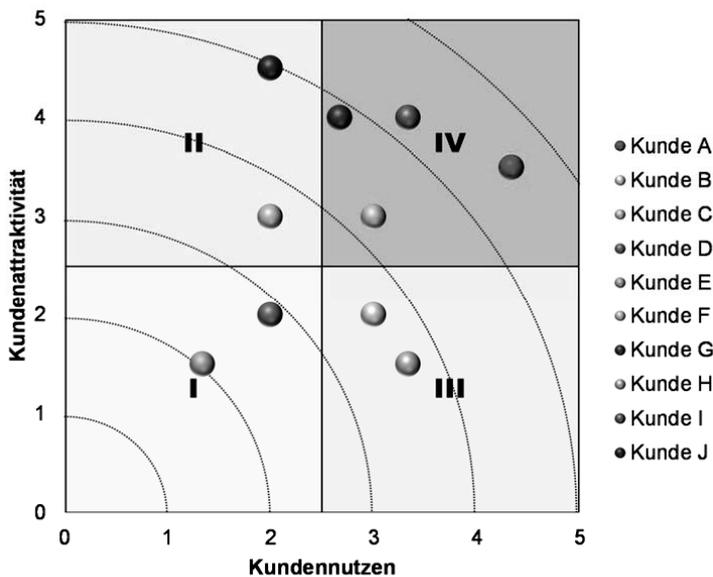
<sup>59</sup> Finanzbuchhaltung: „erfasst den Werteverkehr einer Unternehmung (den äußeren Kreis) aus Geschäftsbeziehungen zur Umwelt (Kunden, Lieferanten, Schuldner, Gläubiger) und die dadurch bedingten Veränderungen der Vermögens- und Kapitalverhältnisse“ [Wis16-ol].

<sup>60</sup> Umsatzrentabilität = Gewinn / Umsatz \* 100 [Ber02, S. 52]

Tabelle 5-1: Bewertungsschema zur Ermittlung der Kundenpriorität (SPSE-Lights)

Bewertungs-kenn-zahl	Kundenattraktivität		Kundennutzen		
	Jahres-umsatz des Kunden in Mio. €	Kunden-wachstum pro Jahr in %	Anteil am Un-ternehmensum-satz in %	Erwartetes Kundenum-satzwachstum in %	Umsatzrenta-bilität in %
1	<= 1	<= 0	<= 1,5	<= 0	<= 0
2	> 1 <= 25	> 0 <= 1	> 1,5 <= 3	> 0 <= 50	> 0 <= 3
3	> 25 <= 200	> 1 <= 5	> 3 <= 10	> 50 <= 75	> 3 <= 6
4	> 200 <= 500	> 5 <= 20	> 10 <= 25	> 75 <= 100	> 6 <= 12
5	> 500	> 20	> 25	> 100	> 12

Nachdem das Bewertungsschema unternehmensspezifisch definiert wurde, folgt im nächsten Schritt die **Ermittlung der Kundenpriorität** auf Basis der zuvor erfassten Daten. Zum besseren Verständnis und einer einfacheren Interpretation der Ergebnisse wurde hierzu eine Darstellung in einem Portfolio mit den Achsen Kundenattraktivität und Kundennutzen (Bild 5-30) gewählt. Die Position der Kreise wird ermittelt, indem jeweils der Mittelwert der einzelnen Bewertungen für die Kundenattraktivität und für den Kundennutzen gebildet wird. Zur Erläuterung der Methode wird der SPSE-Lights Kunde A, welcher ein potentieller Abnehmer des neuen Produktes ist, verwendet. Dieser hat einen Jahresumsatz von 327 Mio. Euro, ein Wachstum von 3,2 %, einen Anteil am Unternehmensumsatz von 31,1 %, ein erwartetes Wachstum am Umsatz des betrachteten Unternehmens von 85,0 % und eine Umsatzrentabilität von 7,8 %. Die Auswertung dieser Kennzahlen anhand des vorgestellten Bewertungsschemas ergibt eine Kundenattraktivität von 3,5  $((4 + 3) / 2)$  und einen Kundennutzen von 4,333  $((5 + 4 + 4) / 3)$ .

**Legende**

- I = Nachrangige Kunden
- II = Potentialkunden
- III = Bestandskunden
- IV = zukunftsfähige Bestandskunden

Bild 5-30: Kundenprioritätsportfolio der SPSE-Lights

Die Aufteilung des Portfolios in die Bereiche I – IV erleichtert die schnelle Interpretation der Ergebnisse. Die radiale Skala stellt den Wert der Kundenpriorität dar. Die folgenden Gleichungen 5-1 und 5-2 erläutern die Berechnung der Kundenpriorität von 5,6 für den Kunden A in dem vorgestellten Beispiel.

$$\text{Gleichung 5-1: Kundenpriorität} = \sqrt{\text{Kundenattraktivität}^2 + \text{Kundennutzen}^2}$$

$$\text{Gleichung 5-2: } 5,6 = \sqrt{\left(\frac{4+3}{2}\right)^2 + \left(\frac{5+4+4}{3}\right)^2}$$

Die erfassten Kundenprioritäten werden in Kapitel 5.5.3 als Grundlage für die Kunden-Auftrags-Priorität genutzt. Auf die Erläuterung der Bewertung der Kunden B bis J<sup>61</sup> wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit an dieser Stelle verzichtet.

<sup>61</sup> vgl. Anhang (Tabelle A-1, Tabelle A-2)

### 5.5.2 Auftragspriorität ermitteln

Analog zu der Kundenpriorität setzt sich die **Auftragspriorität** aus zwei Kenngrößen zusammen; der **operative Auftragsrelevanz** und der **strategischen Auftragsrelevanz**.

Die **operative Auftragsrelevanz** wird anhand von zwei Faktoren beschrieben. Der *Anteil an der Jahresproduktion* beschreibt dabei die herzustellende Menge des Produktes innerhalb eines Jahres im Verhältnis zur Produktionskapazität. Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) liefert die notwendigen Daten zur Ermittlung der Auftragsvolumen. Für das neu konzipierte Produkt werden die geplanten Absatzmengen der strategischen Produktplanung herangezogen, um die zukünftigen Auftragsvolumen und somit den Anteil an der Jahresproduktion initial zu definieren. Des Weiteren wird die *Vertragsstrafe*, die bei Kapazitätsengpässen oder Störungen und einer damit einhergehenden Überschreitung der Lieferfristen anfällt, betrachtet. Die Angabe erfolgt hierbei in Prozent des Verkaufspreises des Produktes.

Die zweite Kenngröße ist die **strategische Auftragsrelevanz**, welche sich aus den Faktoren *Folgeauftragswahrscheinlichkeit* und *Produktionsflexibilität* zusammensetzt. Da die Faktoren nicht ausschließlich aus Unternehmensdaten ermittelt werden können, sind zusätzlich Expertenworkshops notwendig, um den Wert der Faktoren zu ermitteln. Die *Folgeauftragswahrscheinlichkeit* beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der weitere Folgeaufträge nach Beendigung des betrachteten Auftrags erwartet werden in Prozent. Zur Ermittlung der Folgeauftragswahrscheinlichkeit werden die Einschätzungen des Vertriebs, das Ergebnis von Marktanalysen und Vergangenheitsdaten herangezogen. Die Frage, inwieweit der Auftrag bzw. dementsprechend das herzustellende Produkt die Produktion flexibel durchlaufen kann, wird durch den Faktor *Produktionsflexibilität* zum Ausdruck gebracht. Aufträge mit einer niedrigen Flexibilität zeichnen sich durch die Belegung von Sondermaschinen bzw. bekannten Engpassressourcen aus. Dementsprechend können Aufträge mit einer hohen Produktionsflexibilität leichter umgeplant werden.

Die Werte der Kenngrößen werden anhand eines Bewertungsschemas ermittelt. Wie in Kapitel 5.5.1 werden in Expertendiskussionen für die einzelnen Faktoren zunächst Bewertungsbereiche definiert. Das Ergebnis dieser Definition für das Beispielunternehmen SPSE-Lights ist in der folgenden Tabelle 5-2 dargestellt. Beispielsweise definiert das Unternehmen, dass Aufträge mit einer hohen Folgeauftragswahrscheinlichkeit von über 80 % die höchste Bewertung von 5 erhalten. Dies resultiert aus der Maßgabe des Unternehmens, dass die Kundenbindung ein wichtiger Erfolgsfaktor ist.

Tabelle 5-2: Bewertungsschema zur Ermittlung der Auftragspriorität (SPSE-Lights)

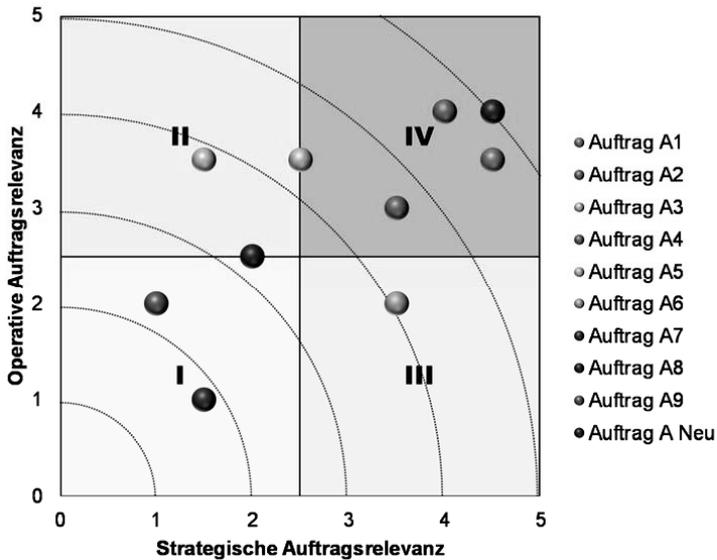
Bewertungs-kenn-zahl	operative Auftragsrelevanz		strategische Auftragsrelevanz	
	Anteil an der Jahresproduktion in %	Vertragsstrafe in %	Folgeauftrags-wahrscheinlichkeit in %	Produktions-flexibilität
1	$\leq 0,1$	$> 50$	$\leq 10$	sehr gering
2	$> 0,1 \leq 0,5$	$> 25 \leq 50$	$> 10 \leq 30$	gering
3	$> 0,5 \leq 1$	$> 10 \leq 25$	$> 30 \leq 60$	mittel
4	$> 1 \leq 1,5$	$> 5 \leq 10$	$> 60 \leq 80$	hoch
5	$> 1,5$	$\leq 5$	$> 80$	sehr hoch

Anhand des definierten Bewertungsschemas wird nun die **Auftragspriorität** jedes vorhandenen Auftrages ermittelt. Als Beispiel dienen hier die Aufträge des Kunden A (Tabelle 5-3). Wie in Kapitel 5.5.1 erläutert, wird davon ausgegangen, dass der Kunde A Abnehmer des neu zu entwickelnden Produktes ist. Dementsprechend ist dies wie eingehend erläutert in Form einer Prognose der Auftragsfaktoren (Auftrag - A Neu) zu betrachten.

Tabelle 5-3: Werte der Auftragsfaktoren des Kunden A

Bezeichnung des Auftrages	operative Auftragsrelevanz		strategische Auftragsrelevanz	
	Anteil an der Jahresproduktion in %	Vertragsstrafe in %	Folgeauftrags-wahrscheinlichkeit in %	Produktions-flexibilität
A1	2,6	35	75	sehr hoch
A2	1,7	12	65	hoch
A3	0,53	6	25	mittel
A4	0,65	18	70	mittel
A5	0,24	0	3	gering
A6	0,27	37	50	hoch
A7	0,09	58	15	sehr gering
A8	0,14	22	20	gering
A9	0,07	15	0	sehr gering
A Neu	1,2	5	90	hoch

Analog zu dem Vorgehen in Kapitel 5.5.1 wird auf Basis dieser Daten aus Tabelle 5-3 die Bewertung der Auftragsprioritäten durchgeführt. Das Ergebnis wird ebenfalls in einem Portfolio mit vier Quadranten dargestellt (Bild 5-31). Auf Basis des Portfolios können die Auftragslagen einzelner Kunden analysiert werden. Zudem können die Auftragsprioritäten der Einzelaufträge anhand der radialen Skala ermittelt werden.



Legende	
I =	Aufträge mit geringer Relevanz
II =	Kosten- bzw. zeitintensive Aufträge
III =	Perspektivisch bzw. strategisch wichtige Aufträge
IV =	Fokusaufträge mit hoher Zukunftsrelevanz

Bild 5-31: Auftragsprioritätsportfolio des Kunden A der SPSE-Lights

Die Aufträge des Kunden A werden an dieser Stelle näher betrachtet. Die höchsten Auftragsprioritäten besitzen die **Aufträge A1** und **A Neu**, welche im Folgenden erläutert werden. **Auftrag A1** ist ein Auftrag mit einem sehr hohen Anteil an der Jahresproduktion von 2,6 %, der auf Standardressourcen gefertigt werden kann und dementsprechend eine sehr hohe Produktionsflexibilität aufweist. Der Vertrieb schätzt die Folgeauftragswahrscheinlichkeit auf 75 % ein. Jedoch ist die Vertragsstrafe von 35 % des Verkaufspreises je Stück hoch. Insgesamt ergibt sich somit eine Auftragspriorität von 5,7. Die ermittelte Auftragspriorität des **Auftrags A Neu** von 6,0 für das sich in der Entwicklung befindende Produkt ergibt sich aus den prognostizierten Produktionsfaktoren.

### 5.5.3 Kunden- und Auftragspriorität ableiten und voraussagen

Zur Analyse der Kundenprioritäten (vgl. Kapitel 5.5.1) und der Auftragsprioritäten (vgl. Kapitel 5.5.2) werden diese in einem Portfolio zusammengefasst (Bild 5-32). Somit ist es möglich, die Zusammenhänge aller Aufträge mit den zugehörigen Kundenbeziehungen prägnant darzustellen.

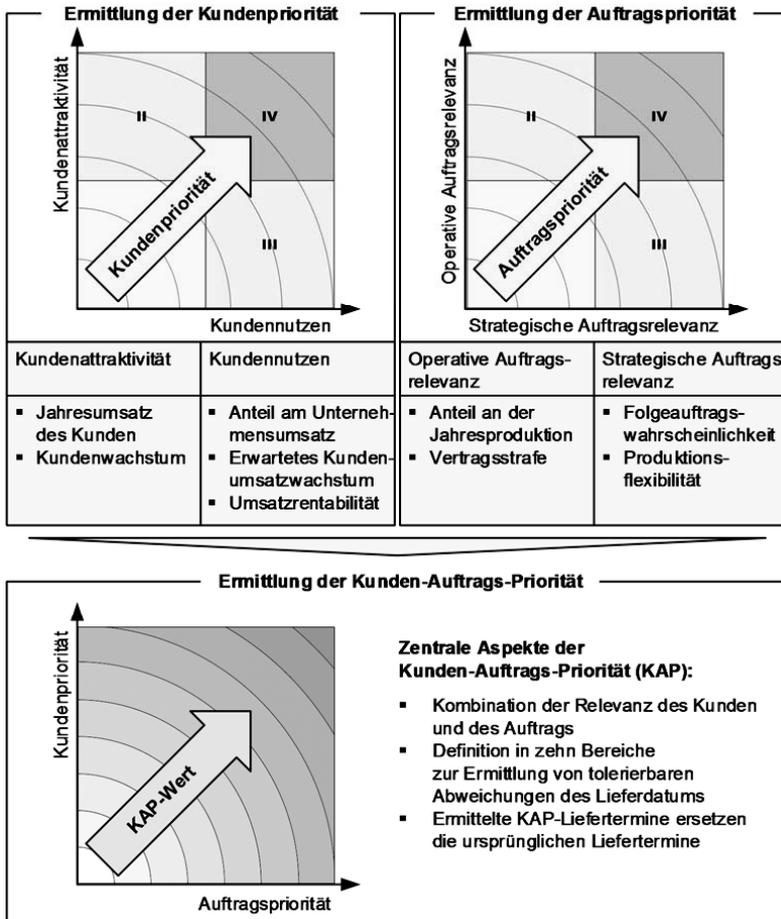


Bild 5-32: Ablauf der Ermittlung der Kunden-Auftrags-Priorität nach [KGJ+16, S. 4]

Die radiale Skala des kombinierten Kunden-Auftrags-Prioritäten-Portfolios (Bild 5-33) stellt die zehn Bereiche<sup>62</sup> der sogenannten KAP-Werte dar. Diese Werte definieren die

<sup>62</sup> Nicht ganzzahlige Ergebnisse des KAP-Wertes werden aufgerundet, bspw. liegt ein KAP-Wert von 7,6 im Bereich 8.

tolerierbare Abweichung von dem ursprünglichen Liefertermin für jeden Kundenauftrag (Tabelle 5-4).

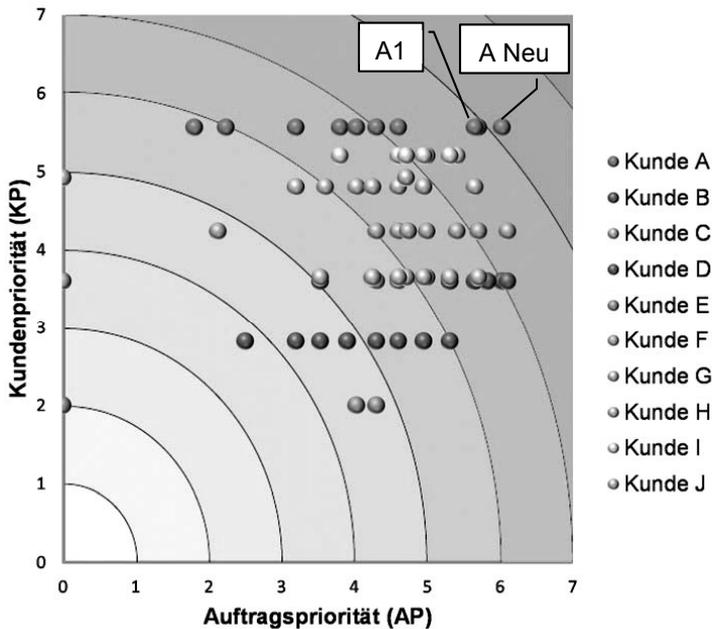


Bild 5-33: Kunden-Auftrags-Prioritäten-Portfolio der SPSE-Lights

Ein KAP-Wert im KAP-Bereich 8, wie der des Kundenauftrages A1, entspricht bspw. einer tolerierbaren Abweichung des Liefertermins von 5 %. Diese Abweichung wird in der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung als zulässig angesehen.

Tabelle 5-4: Zulässige Abweichungen des Liefertermins je KAP-Bereich

KAP-Bereich	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tolerierbare Abweichung in %	100	65	40	25	15	10	7,5	5	2,5	0

Die vorgegebenen Liefertermine der einzelnen Aufträge können unter Berücksichtigung der tolerierbaren Abweichung bei Bedarf modifiziert werden. Die Modifikation basiert auf der Durchlaufzeit der vorgegebenen Liefertermine. Dementsprechend ist es bspw. zulässig, den Auftrag A1 mit einer vorgegebenen Durchlaufzeit von 40 Tagen auf eine tolerierbare Durchlaufzeit von 43 Tagen zu korrigieren. Diese neuen KAP-Liefertermine definieren die Größe der möglichen Verschiebungsintervalle von Fertigungsaufträgen innerhalb des Fertigungsprogramms (vgl. Kapitel 5.4.3). Anhand dieser Vorgehensweise

wird gewährleistet, dass die Aufträge, die für den Unternehmenserfolg die größte Bedeutung haben, nicht im Rahmen der Variierung des Fertigungsprogramms gleichgesetzt werden mit unbedeutenden Aufträgen.

## 5.6 Selbstoptimierendes Produktionssystem modellieren

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell des konzipierten Produktionssystems auf Basis der im Vorfeld spezifizierten Informationen erstellt. Als Simulationsprogramm wird Plant Simulation [Sie16-ol] genutzt (vgl. Kapitel 3.5.2). Diese Software von Siemens PLM ermöglicht die Modellierung, Simulation und Analyse der Materialflussbeziehungen eines Produktionssystems. Im Rahmen der Modellierung mit Plant Simulation werden zum einen Standardbausteine verwendet, dies vereinfacht die objektorientierte Modellbildung stark und unterstützt den Aufbau von Modellen intuitiv. Zum anderen ist es möglich, durch gezielte Methoden und Modellstrukturen ein höchst komplexes Produktionssystemmodell zu erstellen, das in der Lage ist, das Fertigungsprogramm eines Produktionssystems selbstständig zu optimieren.

Zur Modellierung des Simulationsmodells sind drei Phasen zu durchlaufen (Bild 5-34). Zunächst wird die grundsätzliche Struktur des Simulationsmodells (Kapitel 5.6.1) definiert. Hierzu gehören bspw. Datenbanken oder auch Schnittstellen zur Betriebsdatenerfassung. In der zweiten Phase wird das Simulationsmodell detailliert (Kapitel 5.6.2). In diesem Schritt wird das Simulationsmodell auf Basis des Produktionssystemkonzeptes sowie des Verhaltensmodells ausgearbeitet. In der abschließenden Phase wird definiert, wie die Informationen der Verhaltensanpassung operativ übertragen werden (Kapitel 5.6.3).

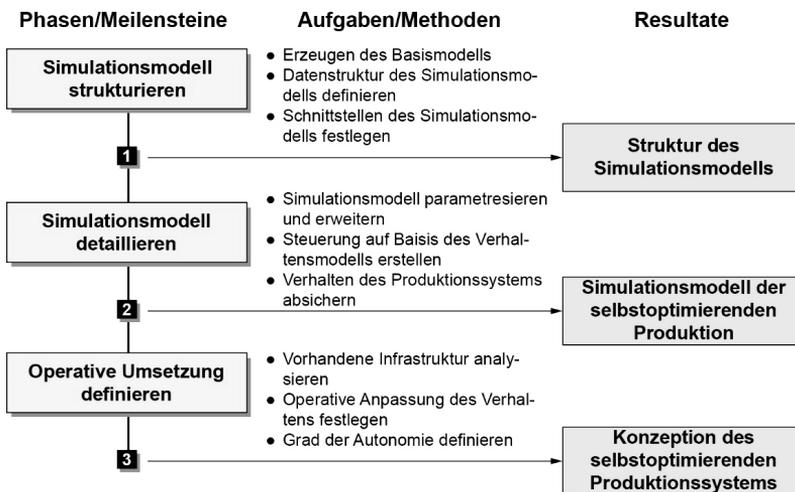


Bild 5-34: Vorgehen der Produktionssystemmodellierung

### 5.6.1 Simulationsmodell strukturieren

Ein wesentlicher Vorteil von Plant Simulation ist die objektorientierte Modellierung von Simulationsmodellen mittels Bibliotheken aus standardisierten Produktionssystembausteinen und Methoden (vgl. Kapitel 3.5.2). Diese Bibliotheken werden im ersten Schritt genutzt, um die detaillierte Grundstruktur (vgl. Kapitel 5.2.4) in das Simulationsmodell zu übertragen. Des Weiteren wird die Datenstruktur des Simulationsmodells definiert und die notwendigen Schnittstellen zur Datenerfassung betrachtet.

#### Erzeugen des Basismodells

Die Überführung des Produktionssystemkonzeptes in ein grundsätzliches Simulationsmodell kann nach BAUER mittels AutomationML aus der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystems durchgeführt werden. Hierzu werden die relevanten Daten der spezifizierten Partialmodelle des Produktionssystems in der Modellierungssoftware (Microsoft Visio) in einer AutomationML-Datei gespeichert. Diese wird anschließend in der Simulationssoftware (Plant Simulation) eingelesen [Bau15, S. 140f.]. Das Ergebnis ist ein erster Aufbau mittels Standardbausteinen im Simulationsmodell auf Basis der Plant Simulation Bibliothek. Solch ein Vorgehen reduziert erheblich den Modellierungsaufwand für den Anwender, ersetzt jedoch nicht die weitere Detaillierung des Simulationsmodells (vgl. [BGK+13]). Die verwendeten Standardbausteine zur Repräsentation der Ressourcen sind hierbei Lager, Puffer, Transportwege, bewegliche Einheiten (BE) und Einzelstationen.

Im Anwendungsbeispiel ist es somit möglich, ein erstes Modell des Produktionssystems des Unternehmens SPSE-Lights in Plant Simulation zu generieren. Auf der obersten Modellebene werden die Drehmaschinen, Bearbeitungszentren, Handarbeitsplätze und das Lager angelegt und parametrisiert. Der Vorgang kann auch manuell durchgeführt werden, dies geht lediglich mit einem erhöhten Modellierungsaufwand einher. Die Erstellung der Methoden zur Steuerung des Modells ist Gegenstand der Phase der Detaillierung des Simulationsmodells (vgl. Kapitel 5.6.2).

#### Datenstruktur des Simulationsmodells definieren

Bevor Steuerungsmethoden programmiert werden können, muss die Datenstruktur des Simulationsmodells definiert werden. Der Grund hierfür ist, dass die Methoden in Plant Simulation regelmäßig Daten verarbeiten, welche sie aus Datenspeichern bzw. Datenquellen beziehen. Die Resultate der einzelnen Methoden wiederum werden in Zwischenspeichern abgelegt. Dies kann in Variablen, in Listen oder in Tabellen erfolgen. Zur Datenablage und Zwischenspeicherung in komplexeren Modellen wird der Plant Simulation Standardbaustein Tabelle verwendet. Die Informationen der Verhaltensmodelle aus Kapitel 5.4 können nun genutzt werden, um die notwendigen Datenspeicher in Form von Tabellen abzuleiten. Hierzu werden die erarbeiteten Verhaltensmodelle hingehend der spezifizierten Datenquellen analysiert.

Bild 5-35 zeigt die abgeleitete Datenstruktur des Simulationsmodells im Rahmen des Anwendungsbeispiels. Die Hierarchie des Aufbaus ergibt sich aus der zu erwartenden Schreib- und Lesefrequenz der Tabellen. Auf der obersten Ebene der Datenstruktur ist das Fertigungsprogramm, da in dieser Tabelle die Endresultate aller Teilergebnisse der Simulation zusammengeführt werden. Auf der zweiten Ebene befinden sich die Tabellen *Arbeitspläne*, *Kunden-Auftrags-Prioritäten* und *Ergebnisse*. Während eines Optimierungsdurchlaufes sind diese Tabellen die wesentlichen Informationsträger zur Variierung des Fertigungsprogramms. Auf der untersten Ebene befinden sich die Tabellen, die zum einen primär zur Datenerfassung vorgesehen sind (*Produkt-Prozess*, *Prozess-Ressourcen*, *Aufträge* und *Kunden*) und zum anderen als reine Zwischenspeicher (*Bestände*, *Zeiten* und *Auslastung*) fungieren.

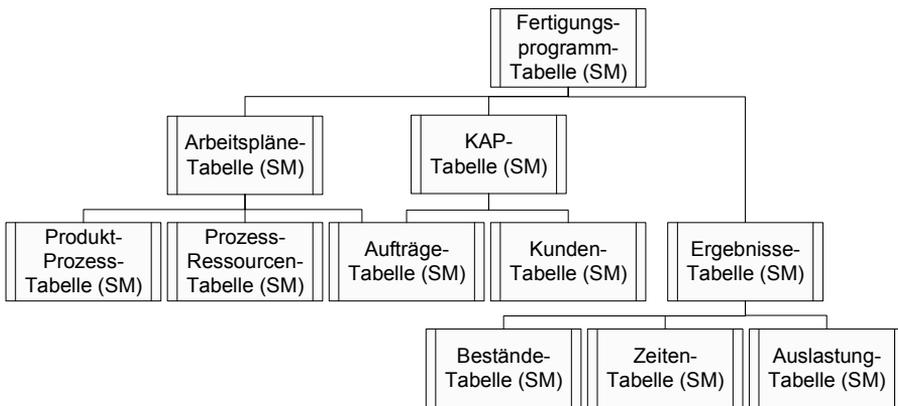


Bild 5-35: Hierarchische Datenstruktur des Simulationsmodells

### Notwendige Schnittstellen des Simulationsmodells festlegen

Der nächste Schritt ist die Ableitung der benötigten Schnittstellen zu Informationsmengen bzw. Datenquellen, die außerhalb des Simulationsmodells liegen. Die Daten aus diesen Datenquellen werden den oben stehenden Tabellen gemäß der Spezifikation des Verhaltens in Kapitel 5.4 im Simulationsmodell zugewiesen. Des Weiteren muss die Rückübertragung von Informationen<sup>63</sup> in die Informationssysteme der Produktion sichergestellt werden. Plant Simulation stellt hierzu eine Vielzahl an Schnittstellen bereit, die zum Datenimport und -export genutzt werden können. Dies ermöglicht bspw. Daten direkt aus verschiedenen Programmen zu lesen und zu schreiben oder z. B. auf Datenbanken zuzu-

<sup>63</sup> Die Implementierung einer Schnittstelle zur Synchronisierung eines Plant Simulation Modells und einem Informationssystem zu Visualisierung der Resultate während der Laufzeit wurde in [KBS+16] vorgestellt.

greifen und innerhalb dieser Daten zu editieren [Ban11, S. 367ff.]. Somit stellt die Anbindung verschiedenster Informationssysteme oder das Einlesen und Schreiben von Datenmengen systemtechnisch kein Problem dar. Es müssen jedoch die unternehmensspezifischen Informationssysteme ggf. an die neuen Anforderungen der Datenübertragung (z. B. Sendungs- und Abrufintervalle von Daten) angepasst werden.

Ausgehend von dem spezifizierten Produktionssystemverhalten des Anwendungsbeispiels, werden die externen Datenquellen identifiziert. Bild 5-36 zeigt die identifizierten Informationssysteme unterteilt in der relevanten Leitebene der industriellen Produktion sowie weitere Datenmengen. Zu den weiteren Datenmengen gehören die Excel-Tabellen der Planungsdaten sowie die Reaktionsstrategie Datenbasis, welche die Fertigungsprogramme für bekannte Situationen enthält. Aus dieser Datenbasis kann die selbstoptimierende Fertigungssteuerung bspw. bei dem Eintreten einer bekannten Ressourcenstörung eine Reaktionsstrategie laden und für die Feindisposition nutzen. Zudem werden in dieser Datenbasis die optimierten Fertigungsprogramme abgespeichert, die auf Basis einer bis dahin unbekannt Situation von der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung identifiziert wurden. Für die Informationssysteme auf Betriebsleitebene reicht es aus, eine Schnittstelle zu implementieren, die aus dem Simulationsmodell heraus zur Datenübertragung angefordert wird. Die Informationssysteme der Fertigungsleitebene müssen vielmehr so eingebunden werden, dass jede Information, die von ihnen ausgeht, direkt in dem Modell verarbeitet werden kann. Eine Besonderheit ist die Anbindung an die Speicherprogrammierbare Steuerung des Monoschienens Transportsystems Montratec. Diese Steuerung wird über den Leitreechner angebunden, stellt jedoch ebenso wie die Systeme der Fertigungsleitebene eine permanente Eingangsgröße des Simulationsmodells dar.

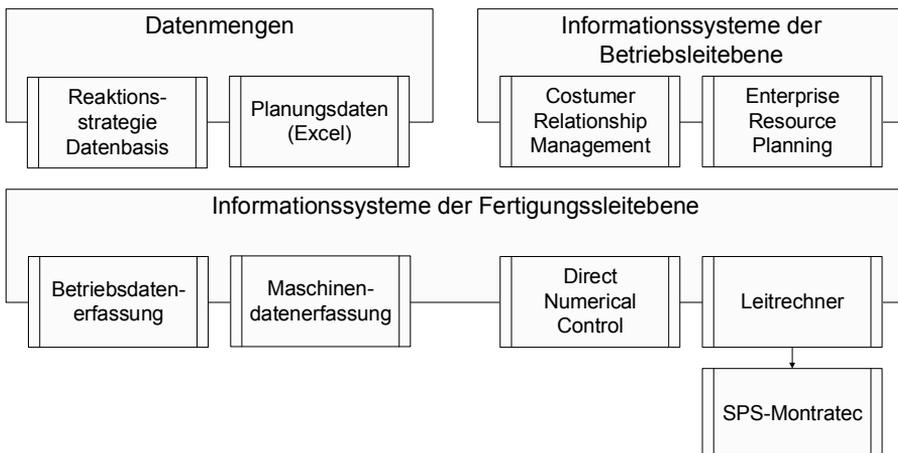


Bild 5-36: Informationssysteme und Datenquellen außerhalb des Simulationsmodells

## 5.6.2 Simulationsmodell detaillieren

Das Ziel dieser Phase ist ein simulationsfähiges Modell des zu planenden Produktionssystems. Hierzu werden die Ressourcen des Simulationsmodells erweitert und parametrisiert sowie die Steuerung des Produktionssystems in Form von Methoden implementiert.

### Parametrisierung und Erweiterung

Die Parametrisierung der Ressourcen geschieht auf flexible Art und Weise mittels Variablen. Im späteren Betrieb des Simulationsmodells ist es erforderlich, dass Parameter wie bspw. die Bearbeitungszeit eines Bauteils an einer bestimmten Ressource dynamisch gesetzt werden können. Hierzu werden die Parameter der Ressourcen mit einer Variablen ersetzt. Diese Variable wird immer dann aktualisiert, wenn ein Wechsel des Bauteils erfolgt. Der Wert der Variablen wird hierzu in Abhängigkeit vom Produkt aus den in Kapitel 5.3 entwickelten und in Kapitel 5.6.1 erstellten Planungsmatrizen geladen.

Des Weiteren ist es ggf. erforderlich, das Simulationsmodell um Ressourcen zu erweitern, die nicht unmittelbar durch die Planung des neuen Produktionssystems betroffen sind und bereits im Unternehmen bestehen. Diese Ressourcen werden eventuell durch andere Produkte belegt und können Transport-, Personal- und Lagerkapazitäten binden. Die Ausgangsbasis für diese Erweiterung ist die Gestalt der Produktion aus Kapitel 5.3.2. Alle grau hinterlegten Ressourcen werden in diesem Schritt in das Simulationsmodell überführt. Im Anwendungsbeispiel sind dies die Lackieranlage und das Montagesystem. Bild 5-37 zeigt die Gegenüberstellung des Gestaltmodells der SPSE-Lights Produktion und des erstellten Plant Simulation Modells dieser.

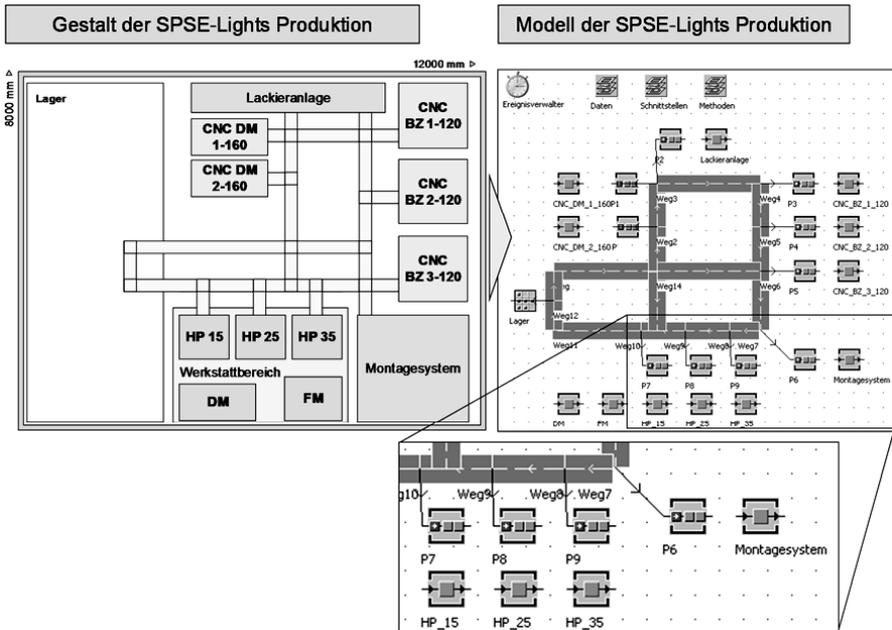


Bild 5-37: Erweiterung des Plant Simulation Modells auf Basis der Gestalt der Produktion

### Steuerungsmethoden erstellen

Die Methoden in Plant Simulation sind Simulations-Bausteine und werden zum Steuern aller Abläufe im Simulationsmodell verwendet. Der Aufbau dieser Methoden wird mit der Modellierungssprache SimTalk realisiert. Diese Sprache ermöglicht es, ähnlich wie die Programmiersprachen C++ oder C# äußerst komplexe Sachverhalte in diesen Simulations-Baustein zu hinterlegen.

Bild 5-38 zeigt einen Auszug der Verhaltensbeschreibung des Anwendungsbeispiels. Zudem stellt es dar, wie die erstellten Informationen in die Methodenentwicklung einfließen. Es handelt sich um die Erfassung und Speicherung der Planungsdaten, die während der Planung in einer Excel Datei auf dem verwendeten Rechner abgelegt wurden. Die Funktionsbezeichnung in Kombination mit der Abfrage, welche die Kernfragestellung zusammenfasst, gibt dem Entwickler der Methode die Arbeitsaufgabe vor. Im ersten Schritt wird hierzu zunächst eine neue Methode erstellt mit der Bezeichnung *Planungsmatrizen\_erfassen\_und\_Inhalt\_speichern*. Im nächsten Schritt wird die erstellte Tabelle *produkt\_prozess\_tabelle* geöffnet, um die Funktionsweise der Methode direkt testen zu können. Da die Verhaltensbeschreibung einen Aufruf einer externen Excel Tabelle vorsieht, werden in SimTalk die Standardausdrücke verwendet zur Nutzung der Dynamic Data Exchange (DDE) Schnittstelle. Der Name der Datei (Planungsdaten) sowie die Bezeich-

nung der ausführenden Applikation (Excel) werden hierzu ergänzt. Die Produktdaten sollen laut Vorgabe nach der Erfassung in der Tabelle Produkt-Prozess gespeichert werden. Hierzu werden die erfassten Werte aus der Excel Datei den Zeilen und Spalten der Produkt-Prozess-Tabelle zugewiesen. Diese erstellte Methode wird immer dann ausgelöst, wenn ein Fertigungsauftrag erfasst wurde. Nach dem beschriebenen Vorgehen werden die weiteren Steuerungsmethoden des Simulationsmodells aufgebaut. Grundlegend ist das Vorgehen immer gleich. Indem zunächst die Funktion im Verhaltensmodell mit seinen Ein- und Ausgängen analysiert wird und die Informationen genutzt werden, um die einzelnen Methoden des Simulationsmodells aufzubauen.

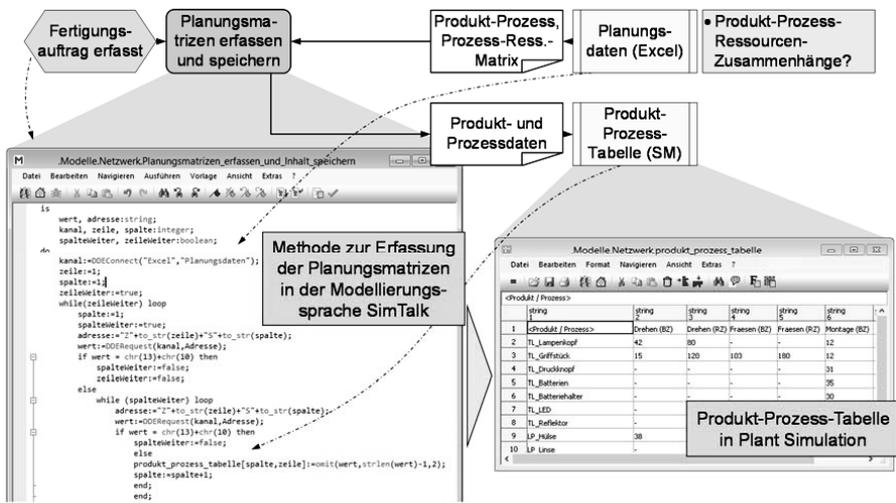


Bild 5-38: Verwendung der Informationen des Verhaltensmodells bei der Methodenentwicklung

Nachdem alle Methoden des Simulationsmodells aufgebaut wurden, kann das erstellte Modell getestet werden. Hierzu werden zunächst einige Testläufe durchgeführt, um die korrekte Funktionsweise zu überprüfen. Bild 5-39 zeigt die Ergebnisse einer prototypischen Umsetzung<sup>64</sup> der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung. Zu sehen sind die resultierenden Fertigungsprogramme aus den Simulationsdurchläufen sowie die ermittelte Pareto-Front. Das System ermittelt nachfolgend anhand des Abgleichs der Zielgewichtung, der Zielwerte und der Randbedingungen das optimierte Fertigungsprogramm in der vorliegenden Situation.

<sup>64</sup> Die prototypische Umsetzung wurde in [KGJ+16], [KGJ18] vorgestellt.

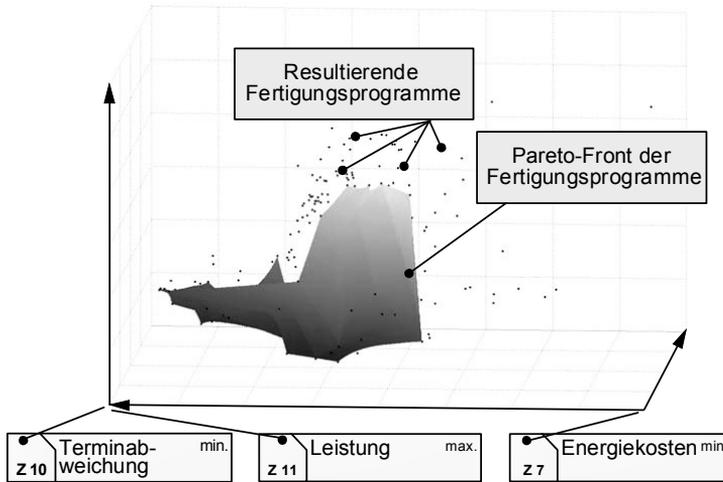


Bild 5-39: Ergebnisse der prototypischen Umsetzung nach [KGJ+16, S. 9], [KGJ18]

### Verhalten des Produktionssystems absichern

Die Absicherung des vollständigen Produktionssystemkonzeptes ist die nächste Aufgabe. Durch den Schritt der Modellbildung wird das Systemverständnis weiter vertieft. Dynamische Effekte wie z. B. das Blockieren einer Ressource aufgrund der Unterdimensionierung (Leistungsfähigkeit) einer nachfolgenden Ressource können aufgedeckt werden. Plant Simulation stellt für diese detaillierte Betrachtung der Materialflüsse Auswertungsdiagramme zur Verfügung. Engpassressourcen oder andere Hemmnisse, die eine starke Senkung der Leistung verursachen, können zu diesem Zeitpunkt bereits identifiziert werden. Solche Engpassressourcen würden im Betrieb die Handlungsoptionen der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung reduzieren. Aus diesem Grund werden die Simulationsergebnisse zurückgeführt auf das Produktionssystemkonzept und ggf. Anpassungen von Parametern oder Anpassungen der Grundstruktur vorgenommen. Dies könnte insbesondere auch eine Neuauslegung von Lager- oder Transportressourcen betreffen, da diese oft einen Engpass und somit starke Einbußen in der Flexibilität des Gesamtsystems darstellen können.

### 5.6.3 Operative Umsetzung definieren

Der abschließende Arbeitsschritt der Systematik ist die operative Umsetzung der Verhaltensanpassung. Hierzu können die Ergebnisse der Simulation wie im Anwendungsbeispiel direkt an die Informationssysteme der Fertigung gesendet werden, um so die Verhaltensanpassung zu realisieren. In diesem Fall steuert das Simulationsmodell die einzelnen Elemente des Produktionssystems, indem es das optimierte Fertigungsprogramm ermittelt und direkt Steueranweisungen an die Ressourcen sendet und diese überwacht.

In vielen Unternehmen ist bereits ein Manufacturing Execution System etabliert. Eine Möglichkeit der Koppelung von MES und der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung zeigt Bild 5-40. Die Ergebnisse der Optimierung werden in Form des Fertigungsprogramms an das MES gesendet. Das MES verarbeitet die Daten und leitet die Belegung der Ressourcen an die Fertigung weiter. Zudem leitet es die Informationen über Fertigungsaufträge, Eilaufträge, Störungen und aktuelle Fertigungsdaten direkt an die selbstoptimierende Fertigungssteuerung weiter. Der Informationsaustausch zwischen MES und Plant Simulation kann hierzu mit einer TCP/IP Schnittstelle realisiert werden.

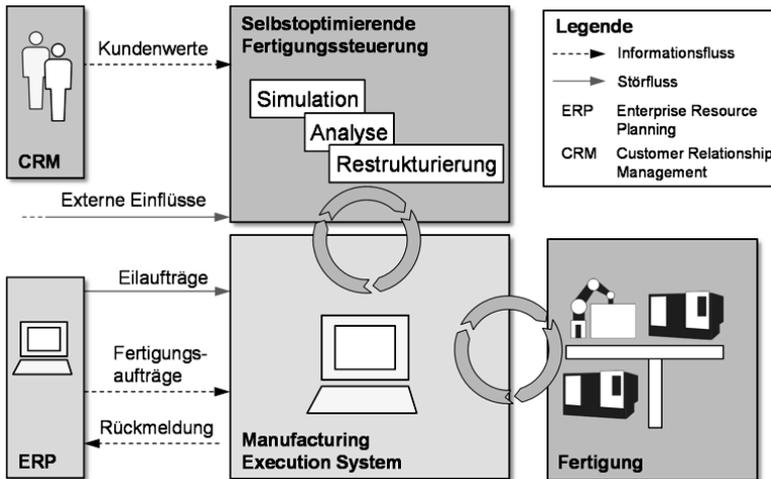


Bild 5-40: Struktur der selbstoptimierenden Produktion bei Verwendung eines MES

Es muss zudem in Betracht gezogen werden, dass viele KMU die Fertigung manuell durch eine verantwortliche Person steuern. Um diesen Unternehmen die Möglichkeit zu bieten, eine selbstoptimierende Fertigungssteuerung einzusetzen, wird vorgeschlagen die Optimierungsergebnisse nicht direkt einzuleiten. Vielmehr sollten nach festgelegten Zeitintervallen dem Verantwortlichen für die Planung die Ergebnisse der Optimierung visualisiert werden. Das zentrale Ergebnis der Optimierung ist hierbei die zeitliche Anordnung der Arbeitspläne im Fertigungsprogramm und somit die zeitliche Zuordnung der Produkte und Halbzeuge auf den jeweiligen Ressourcen. Dieses Fertigungsprogramm wird ausgeleitet und in Form eines Gantt-Diagramms dargestellt. Bild 5-41 zeigt die Struktur einer selbstoptimierenden Produktion bei der Verwendung einer manuellen Fertigungssteuerung. Wie dem Bild zu entnehmen ist, werden die Eingangsgrößen der Informationssysteme des Unternehmens weiterhin benötigt, um die Simulation mit den notwendigen Informationen zu versorgen.

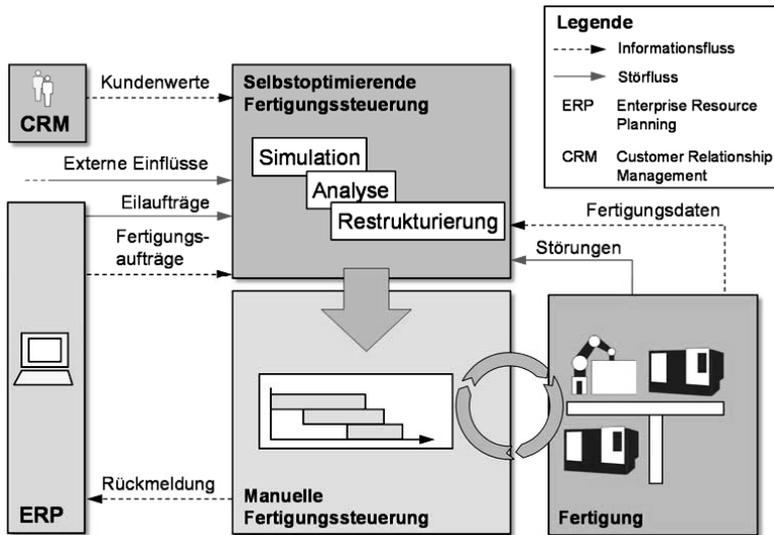


Bild 5-41: Struktur der selbstoptimierenden Produktion bei Verwendung einer manuellen Fertigungssteuerung

Nachdem die Verbindung zu den operativen Systemen geschlossen wurde, ist die Konzeption des selbstoptimierenden Produktionssystems vollständig. Dieses System ist nach der Inbetriebnahme in der Lage, auf Basis der im Rahmen der Systematik erarbeiteten Inhalte zu agieren und die Schritte der Selbstoptimierung (vgl. Kapitel 5.4.3) zu durchlaufen. Es obliegt nun dem Verantwortlichen der Produktion, wie autonom die selbstoptimierende Fertigungssteuerung in die Abläufe der Produktion eingreifen kann.

## 5.7 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Unterstützung des Planers bei der Konzeptionierung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Hierzu wurde eine *Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme* entwickelt. Die Systematik erfüllt die an sie gestellten Anforderungen. Im Folgenden wird dies anhand der Anforderung aus Kapitel 2.9 erläutert.

### A1) Einordnung in die integrative Produktionssystemplanung

Der Ausgangspunkt der Systematik ist das Resultat der Konzipierung des Produktes auf Systemebene. In den Schritten Planen und Klären der Aufgabe, Konzipierung der Prozesse, Konzipierung der Ressourcen und Detaillierung der Grundstruktur erfolgt die Produktionssystemplanung parallel und in enger Abstimmung mit der Weiterentwicklung des Produktkonzeptes. Anforderungen zu notwendigen Modifikationen des Produktionssystemkonzeptes, die im Schritt der Verhaltensabsicherung identifiziert werden, können auf das Produkt- und Produktionssystemkonzept zurückgeführt werden.

## **A2) Prinziplösung als Ausgangspunkt**

Die Systematik beginnt mit der Analyse der spezifizierten Prinziplösung des Produktes in CONSENS. Die relevanten Partialmodelle des Produktes sind hierbei die Anforderungen, die Funktionen, die Wirkstruktur und die Gestalt.

## **A3) Verhaltensbeschreibung in der Produktionssystemkonzipierung**

Mittels der Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells unterstützt die Systematik die Konzipierung des Verhaltens der Produktion. Das definierte Verhaltensmodell stellt ein bedarfsgerechtes Beschreibungsmittel dar, das es ermöglicht, alle erforderlichen Informationen einer klassischen Fertigungssteuerung sowie einer selbstoptimierenden Fertigungssteuerung zu spezifizieren.

## **A4) Abbildung der Zielvorgaben der Produktion**

Selbstoptimierende Systeme agieren auf Basis eines Zielsystems aus externen, inhärenten und internen Zielen. Im Rahmen der Definition und initialen Gewichtung des Zielsystems stellt die Systematik ein Verfahren bereit zur Abbildung des Zielsystems und der Zielvorgaben des selbstoptimierenden Produktionssystems.

## **A5) Unternehmerische Rahmenbedingungen berücksichtigen**

Im Rahmen der Systematik wird die Berücksichtigung von unternehmerischen Rahmenbedingungen in verschiedenen Schritten unterstützt. Die Ist-Situation der Produktion des Unternehmens wird durch die Phase der Analyse der aktuellen Produktion aufgenommen. Kunden- und Auftragsprioritäten werden ermittelt, um sicherzustellen, dass alle Rahmenbedingungen für ein selbstoptimierendes System bekannt sind. Zudem ermöglicht die initiale Zielgewichtung die Vorgabe von Zielwerten durch das Unternehmen.

## **A6) Absicherung des Produktionssystemkonzeptes**

Die Absicherung des Verhaltens des Produktionssystemkonzeptes wird im Rahmen der Systematik durch den Einsatz der Simulationssoftware Plant Simulation von Siemens PLM realisiert. Das notwendige Simulationsmodell wird auf Basis der Daten der detaillierten Grundstruktur des Produktionssystems und des Konzeptes des Produktionssystemverhaltens aufgebaut. Die Planungsmatrizen des Produktionssystems und die Kunden-Auftrags-Prioritäten vervollständigen die Datengrundlagen der Simulation.

### **A7) Systematische Vorgehensweise**

Ein detailliertes Vorgehensmodell bildet den Kern der Systematik und stellt einen Leitfaden für die integrative Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems dar. Es besteht aus den fünf Phasen Statisches Produktionssystem konzipieren, Aktuelle Produktion analysieren, Produktionssystemverhalten konzipieren, Kundenbeziehungen und Auftragslage analysieren sowie Selbstoptimierendes Produktionssystem modellieren. Anhand des Anwendungsbeispiels Taschenlampe wurde die Anwendbarkeit des Vorgehens dargestellt.

### **A8) Systemtechnische Umsetzung**

Die Systematik unterstützt die Umsetzung in heterogene Unternehmensstrukturen und die damit einhergehenden Systeme in dem Schritt Definition der operativen Umsetzung. Zudem wird die Simulationssoftware Plant Simulation zur Realisierung der Selbstoptimierung verwendet. Diese zeichnet sich durch ihre offene Systemarchitektur und eine hohe Integrationsfähigkeit aus.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Heutige Anforderungen wie die Steigerung der Volatilität der Märkte, kürzere Produktlebenszyklen oder ein hoher Kostendruck stellen produzierende Unternehmen vor Herausforderungen. In der Produktion sind eine hohe Flexibilität und insbesondere die schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen entscheidend für den Unternehmenserfolg. Das Wirkparadigma der Selbstoptimierung stellt einen Lösungsansatz dar, diesen Anforderungen zu begegnen. Eine selbstoptimierende Produktion ist in der Lage, die aktuelle Situation mit allen notwendigen Rahmenbedingungen zu analysieren, ihre Ziele eigenständig zu modifizieren und das Produktionssystemverhalten selbständig dem modifizierten Zielsystem entsprechend anzupassen.

Aufgrund der aufgezeigten Anforderungen ergibt sich ein hoher Zeit- und Innovationsdruck insbesondere in der Produkt- und Produktionssystementwicklung. Zudem steigt die Komplexität von Produkt und Produktionssystem stetig an, da die heutigen Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus mechatronische Systeme sind und der Wandel hin zu Intelligenten Technischen Systemen bereits voranschreitet. Dieser Komplexität muss mit einer frühzeitigen integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem entgegengewirkt werden. Die Basis hierzu bildet das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER ET AL., welches das Gesamtsystem betrachtet und dieses sukzessive konkretisiert.

Der Bedarf für eine Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme resultiert aus zwei wesentlichen Forderungen. Zum einen bietet das Wirkparadigma der Selbstoptimierung ein hohes Einsatzpotential im Rahmen der Produktion, welches es zu erschließen gilt. Zum anderen reicht der Detaillierungsgrad der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem aktuell nicht aus, um die notwendigen Entwicklungsaspekte für eine selbstoptimierende Produktion abzudecken. Hierzu zählen bspw. der Aufbau eines Zielsystems im Kontext der Produktion oder die Abbildung des Verhaltens des Produktionssystems.

Die untersuchten Ansätze der Literatur können diesen Forderungen nur bedingt gerecht werden. Defizite bestehen insbesondere in der Verhaltensspezifikation von Produktionssystemen sowie in der Berücksichtigung von unternehmerischen Rahmenbedingungen. Untersuchte Vorgehen zur Planung und Implementierung selbstoptimierender Ansätze im Kontext der Produktion setzen zu spät im Entwicklungsprozess an oder fokussieren sich lediglich auf eine Verbesserung einer bestehenden Produktion.

Die vorliegende Systematik unterstützt den Planer bei der Konzeptionierung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Die Systematik verwendet und modifiziert einige Teilaspekte der untersuchten Ansätze und erweitert die Methodik der integrativen Produkt und Produktionssystementwicklung nach GAUSEMEIER ET AL. um die erforderlichen Aspekte zur Planung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Als Ausgangspunkt

dienen die CONSENS Partialmodelle der Prinziplösung des Produktes. Die drei wesentlichen Bestandteile der Systematik sind ein Vorgehensmodell, eine Vorschrift zur Beschreibung des Verhaltensmodells der Produktion sowie Methoden und Werkzeuge, die das Lösen von Teilaufgaben ermöglichen. Das Vorgehensmodell bildet den Kern der Systematik und beschreibt detailliert die einzelnen Arbeitsschritte zur integrativen Planung des Verhaltens eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Hierzu wurden fünf Hauptphasen definiert:

- Die Konzipierung des statischen Produktionssystems wird in der ersten Phase durchgeführt. Auf Basis der Prinziplösung des Produktes wird die detaillierte Grundstruktur des Produktionssystems erarbeitet. In enger Abstimmung mit der Produktkonzipierung entsteht somit die Ausgangsbasis für die weitere Konkretisierung des Produktionssystems im Rahmen der Arbeitsplanung. Des Weiteren wird die Grundlage für die Übertragung des Produktionssystemkonzeptes in ein Simulationsmodell geschaffen.
- In der zweiten Phase wird die aktuelle Produktion analysiert. Hierzu wird das aktuelle Produktportfolio ebenso betrachtet wie die vorhandenen Ressourcen des Unternehmens, die nicht unmittelbar in der Grundstruktur des konzipierten Produktionssystems verwendet werden. Das Resultat sind Planungsmatrizen, die eine Generierung von alternativen Arbeitsplänen erlauben.
- Das Produktionssystemverhalten wird in der dritten Phase konzipiert. Beginnend mit der Konzipierung der Ablaufprozesse des Produktionssystemverhaltens auf Basis der Grundstruktur des Produktionssystems wird schrittweise das Verhaltensmodell des selbstoptimierenden Produktionssystems spezifiziert. Zudem wird das Zielsystem als ein wesentlicher Bestandteil des Verhaltens des selbstoptimierenden Produktionssystems definiert und initial aus Unternehmenssicht gewichtet.
- Die vierte Phase des Vorgehensmodells bildet die Analyse der Kundenbeziehungen und der Auftragslage. Auf Basis der Kundenattraktivität und dem Kundennutzen für das Unternehmen wird die Kundenpriorität abgeleitet. Die Auftragspriorität wird aus der operativen und der strategischen Auftragsrelevanz ermittelt. Die Kombination beider Prioritäten bildet den Kunden-Auftrags-Priorität (KAP)-Wert, der über die mögliche zeitliche Verschiebung von Aufträgen ohne negative Auswirkungen auf das Unternehmen entscheidet.
- In der abschließenden fünften Phase wird das selbstoptimierende Produktionssystem modelliert. Im ersten Schritt wird hierzu das Simulationsmodell in Plant Simulation auf Basis der Resultate der vorherigen Phasen strukturiert und modelliert. Das Verhalten des Produktionssystems wird nachfolgend abgesichert und ggf. notwendige Änderungen des Produktionssystemkonzeptes vorgenommen. Gemäß der vorliegenden Bedingungen im Unternehmen wird abschließend die operative Umsetzung des selbstoptimierenden Produktionssystems definiert.

Die vorgestellte Systematik unterstützt Unternehmen bei der Einführung eines selbstoptimierenden Produktionssystems. Das definierte Vorgehen wurde anhand eines Anwendungsbeispiels exemplarisch durchlaufen und gezeigt, dass die Systematik die an sie gerichteten Anforderungen erfüllt.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf in der automatisierten Modellbildung. Insbesondere im Bereich der Steuerungsmethoden des Simulationsmodells liegt das Potential, die Modellbildung auf Grundlage des Verhaltensmodells zu vereinfachen. Die erhöhte Automatisierung könnte die notwendige Expertise im Bereich der Modellbildung in Plant Simulation potentiell ersetzen. Zudem könnte langfristig die Übertragung des verwendeten Ansatzes der selbstoptimierenden Produktion auf eine Veränderung eines gesamten Wertschöpfungsnetzwerkes untersucht werden. Örtlich unveränderbare Ressourcen könnten auf Basis eines selbstoptimierenden Systems mit örtlich veränderbaren Ressourcen kombiniert und autonom zu effektiven Wertschöpfungsnetzwerken umstrukturiert werden.



## 7 Abkürzungsverzeichnis

BDE	Betriebsdatenerfassung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CRM	Customer Relationship Management
DDE	Dynamic Data Exchange
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNC	Direct Numerical Control
ERP	Enterprise Resource Planning
ERM	Entity Relationship Modell
ggf.	gegebenenfalls
FIFO	First-in first-out
IT	Informationstechnik
ITS	Intelligentes Technisches System
KAP	Kunden- und Auftragspriorität
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LED	light-emitting diode (Leuchtdiode)
max.	maximal
MDE	Maschinendatenerfassung
min.	minimal
Mio.	Millionen
MES	Manufacturing Execution System
NC	Numerical Control
ODBC	Open Database Connectivity
OCM	Operator Controller Module

---

OWL	Ostwestfalen-Lippe
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	REFA Bundesverband e.V. – Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RC	Robot Control
S.O.	Selbstoptimierung
SOFS	selbstoptimierende Fertigungssteuerung
SPSE	Strategische Produktplanung und Systems Engineering
SM	Simulationsmodell
sog.	sogenannte
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VKD	Vorgangskettendiagramm
XML	Extensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel

## 8 Literaturverzeichnis

- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2011
- [aca16] acatech (Hrsg.): Kompetenzen für Industrie 4.0 – Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze. Herbert Utz Verlag GmbH, München, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Herbert Utz Verlag GmbH, 2016
- [ADG+09] ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, J.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; Krupp, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSCHYKOW, O. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte ; Sonderforschungsbereich 614 'Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus'. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 234, 2009
- [Alt12] ALT, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2012
- [AWF07] ASHBY, M.F.; WANNER, A.; FLECK, C. (Hrsg.): Materials selection in mechanical design – Das Original mit Übersetzungshilfen. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 3. Auflage, 2007
- [Ban11] BANGSOW, S.: Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk – Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. Hanser Verlag, München, 2011
- [Bau15] BAUER, F.: Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 341, Paderborn, 2015
- [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, 11. - 13. March 2013. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- [Bau13] BAUHOFF, F.: Selbstoptimierende Regelung der artikelbezogenen Materialdisposition in der Beschaffung. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Apprimus-Verlag, Band 121, Aachen, 2013
- [Ber02] BERGMANN, M.: Zielkostenmanagement und Wertanalyse – Analogie oder Antagonismus ; eine vergleichende Gegenüberstellung mit integrativem Charakter. Tectum-Verl., Marburg, 2002
- [BGH+13] BIERMANN, D.; GAUSEMEIER, J.; HESS, S.; KÖCHLING, D.; PETERSEN, M.; WAGNER, T.: Foundations for Considering the Robustness within the CRC TRR 30. In: Heim, H.-P.; Biermann, D.; Homberg, W. (Hrsg.): Functionally graded materials in industrial mass production, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013
- [BSK+06] BÖCKER, J.; SCHULZ, B.; KNOKE, T.; FRÖHLEKE, N.: Self-Optimization as a Framework for Advanced Control Systems – In: 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 06), November 7-10, 2006, Paris, 2006
- [BGW11] BRACHT, U.; GECKLER, D.; WENZEL, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Berlin, New York, 2011
- [BGN+09] BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.; NORDSIEK, D.; REYES PEREZ, M.: A Holistic Approach for the Conceptual Design of Production Systems regarding the Interaction between Product and Production System. In: 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). October 5th - 7th 2009, Munich, Germany, 2009
- [Bre11] BRECHER, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011

- [Bre15] BRECHER, C.: *Advances in Production Technology*. Springer International Publishing, Cham, 2015
- [BSW+09] BULLINGER, H.-J.; SPATH, D.; WARNECKE, H.-J.; WESTKÄMPER, E.: *Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung*. Springer-Verlag, s.l., 3. neubearb. Aufl., 2009
- [Dah90] DAHL, B.: *Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1990
- [Dan99] DANGELMAIER, W.: *Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung; Grundlagen, Algorithmen und Beispiele*. Springer, Berlin, 1999
- [Dan03] DANGELMAIER, W.: *Produktion und Information – System und Modell*. Springer, Berlin, 2003
- [DIN8580] DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [Dud12] Duden: *Duden – die deutsche Rechtschreibung*. Dudenverlag, Mannheim, in zwölf Bänden; das Standardwerk zur deutschen Sprache ; Band 1, 25., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Nachdr., Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2012
- [Dud16-ola] DUDEN, K.: *Systematik*, unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Systematik>, 7. Januar 2016
- [Dud16-olb] DUDEN, K.: *Verhalten*, unter: [http://www.duden.de/rechtschreibung/verhalten\\_handeln\\_sein\\_reagieren](http://www.duden.de/rechtschreibung/verhalten_handeln_sein_reagieren), 11. Januar 2016
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: *Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [DJG12] DUMITRESCU, R.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: *Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe*. In: *Proceedings of the SysInt 2012*, 2012, S. 24–27, Paderborn, 2012
- [EM13] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser, München, 5. Auflage, 2013
- [Ele12] ELEY, M.: *Simulation in der Logistik – Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Springer Berlin, Heidelberg, 2012
- [Eur03] Europäische Union: *Amtsblatt der Europäischen Union - Definition der Kleinunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen – Aktenzeichen K(2003) 1422*, 2003
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik – Band 4 - Fertigungs und Montage*. VDI-Verl., Düsseldorf, 2. Auflage, 1989
- [Eve96] EVERSHEIM, W.: *Produktionstechnik und -verfahren*. In: Kern, W. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, Schäffer-Poeschel, Band 7, Stuttgart, 1996
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik Band 3 - Arbeitsvorbereitung*. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1997
- [Fah95] FAHRWINKEL, U.: *Methode zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering*. Dissertation, Fachbereich Maschinentechnik, Universität-Gesamthochschule Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995
- [Fra06] FRANK, U.: *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006

- [FGK+04] FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHLEP, O.; SCHNIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [Gad01] GADATSCH, A.: Management von Geschäftsprozessen – Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2001
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Hanser, München, 2010
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (HRSRG.). Design 2010 - 11th International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010, Zagreb, 2010
- [GDK+11] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; KAHL, S.; NORDSIEK, D.: Integrative Development of Product and Production System for Mechatronic Products. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Ausgabe 4/2011, S. 772 - 778, 2011
- [GDS13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis, Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT - Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik, UNITY AG, 2013
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. In: Research in Engineering Design. Springer-Verlag, London, 2009
- [GHK+06] GAUSEMEIER, J.; HAHN, A.; KESPOHL, H. D.; SEIFERT, L.: Vernetzte Produktentwicklung – Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. Hanser, München, 2006
- [GIK12] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.: Das Produktionssystem der Zukunft denkt mit und lernt. In: Industrieanzeiger, Band 30, S. 68-69. Konradin Verlag, 2012
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Hanser, München, 2014
- [GRS14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014
- [Geh19] GEHRING, J. M.: Glossen zum Texte meiner Erfahrung – Ein kleiner Beitrag zur Beförderung der Welt- und Menschenkenntniß : nebst einem Anhang vorzüglicher Stellen aus guten Schriften. Gebhardt, 1819
- [Gru00] GRUNDIG, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik, Methoden, Anwendungen. Hanser, München, 2000
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik; eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. Verlag Technik, Berlin, 1955
- [HD91] HEINEN, E.; DIETEL, B. (Hrsg.): Industriebetriebslehre – Entscheidungen im Industriebetrieb. Gabler, Wiesbaden, 1991
- [HGE17] HELM, S.; GÜNTER, B.; EGGERT, A. (Hrsg.): Kundenwert – Grundlagen - Innovative Konzepte - Praktische Umsetzungen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017

- [Hel13] HELMKE, S. (Hrsg.): Effektives Customer Relationship Management – Instrumente - Einföhrungskonzepte - Organisation. Springer, Wiesbaden, 5. Auflage, 2013
- [Hip11] HIPFNER, H.: Grundlagen des CRM. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2011
- [Ihm10] IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstötzung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010
- [Ker96] KERN, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, Band 7, 2. Auflage, 1996
- [KGI+13] KESSLER, J. H.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; KRÜGER, M.; TRÄCHTLER, A.: Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen. In: Internationales Forum Mechatronik 2013, 30. - 31. Oktober, Winterthur, 2013
- [KRS15] KIEF, H. B.; ROSCHIWAL, H. A.; SCHWARZ, K.: CNC-Handbuch 2015/2016 – CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis. Hanser, München, 2015
- [KD12] KLETTI, J.; DEISENROTH, R.: MES-Kompodium – Ein Leitfaden am Beispiel von HYDRA. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012
- [KBS+16] KÖCHLING, D.; BERSSENBRÜGGE, J.; SCHLÜSSLER, J.; STÖCKLEIN, J.: Intelligent Production System Planning with Virtual Design Reviews. In: 3rd International Conference on Systemintegrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, SysInt 2016, June 13 - 15 2016, Paderborn, Germany, 2016
- [KG14] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.: Approach for the Realization of a Self-Optimizing Production System. In: BIT's 3rd Annual World Congress of Emerging InfoTech, June 19. - 21. 2014, Dalian, China, 2014
- [KGJ18] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.: Verbesserung von Produktionssystemen. In: Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme - Selbstoptimierung in der Anwendung - Intelligente technische Systeme - Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL. Springer Verlag, 2018 (in Druck)
- [KGJ+16] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.; MITTAG, T.: Design of a self-optimising production control system. In: International Design Conference- DESIGN 2016, May 16 - 19 2016, Dubrovnik, Croatia, 2016
- [Kom14] KOMPA, S.: Auftragseinlastung in Überlastsituationen in der kundenindividuellen Serienfertigung. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Apprimus-Verlag, Band 123, Aachen, 2014
- [Kra02] KRAMER, O.: Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität München, Utz-Verlag, Band 173, München, 2002
- [Küh06] KÜHN, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Carl Hanser Fachbuchverlag, 2006
- [Lau10] LAU, C.: Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität München, Forschungsberichte IWB, Band 238, München, 2010
- [LW05] LÖDDING, H.; WIENDAHL, H.-P.: Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer, Berlin, 2005
- [Mar99] MARTIN, H.: Praxiswissen Materialflußplanung – Transportieren, Handhaben, Lagern, Kommissionieren. Vieweg, Braunschweig, 1999

- [Mar00] MARTIN, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Aufbau und Steuerung von Transport- und Lagersystemen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2000
- [McC58] MCCARTHY, J.: Mechanisation of Thought Processes. Proc. Symposium, National Physical Laboratory, London, 1958
- [McC68] MCCARTHY, J.: Programs with Common Sense. In: Minsky, M. (Hrsg.): Semantic Information Processing. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, S. 403-418, 1968
- [Mei13] MEIER, C.: Echtzeitfähige Produktionsplanung und -regelung in der Auftragsabwicklung des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Apprimus-Verlag, Band 117, Aachen, 2013
- [Men09] MENSCH, G.: Finanz-Controlling – Finanzplanung und -kontrolle ; Controlling zur finanziellen Unternehmensführung ; [mit Übungen, Fallstudien, Glossar]. Oldenbourg, München, 2. Auflage, 2009
- [MGG+14] MITTAG, T.; GAUSEMEIER, J.; GRÄBLER, I.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; PETERSEN, M.: Conceptual Design of a Self-Optimising Production Control System. In: International Conference on Digital Enterprise Technology, March 25. - 28. 2014, Stuttgart, Germany, 2014
- [Nau00] NAUMANN, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich Maschinentechnik, Universität-Gesamthochschule Paderborn, Paderborn, 2000
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [PBF+05] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, Heidelberg, 6. Auflage, 2005
- [PBG+14] PETERSEN, M.; BANDAK, S.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; SCHNEIDER, M.: Methodik zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem in den frühen Phasen der Produktentwicklung – Ein Praxisbeispiel. In: Digitales Engineering zum planen, testen und betreiben technischer Systeme, 17. IFF-Wissenschaftstage 24. -26. Juni 2014, Magdeburg, 2014
- [PGK+15] PETERSEN, M.; GAUSEMEIER, J.; KÖCHLING, D.; SCHNEIDER, M.; WELLPOTT, M.: Industrie 4.0 – Dezentralisierung bestehender Produktionssysteme durch kostengünstige Einplatinenrechner. In: 24. Deutscher Materialfluss-Kongress, 26. - 27. März 2015, Düsseldorf, 2015
- [Poo11] POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011
- [Ref87] REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Hanser, München, 1987
- [RLH96] REINHART, G.; LINDEMANN, U.; HEINZL, J.: Qualitätsmanagement – Ein Kurs für Studium und Praxis. Springer Berlin, Heidelberg, 1996
- [Sab96] SABISCH, H.: Produkte und Produktgestaltung. In: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Schäffer-Poeschel, Band 7, Stuttgart, 1996
- [Sch01] SCHEER, A.-W.: ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen. Springer, Berlin, 4. Auflage, 2001
- [SB07] SCHMITT, R.; BEAUJEAN, P.: Selbstoptimierende Produktionssysteme - Eine neue dimension von Flexibilität, Transparenz und Qualität. In: ZWF Jahr. 102 (2007) 9. Hanser Verlag, München, 2007

- [SLW+10] SCHMITT, R.; LAASS, M. C.; WAGELS, C.; ISERMANN, M.; Matuschek N.: Selbstoptimierende Produktionssysteme durch kognitive Technologien. In: wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100 (2010) 1/2, S. 28-29, 2010
- [Sch11] SCHÖNSLEBEN, P.: Integrales Logistikmanagement – Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 6. Auflage, 2011
- [SK12] SCHUH, G.; KOMPA, S.: Selbstoptimierende Gestaltung der Auftrageinlastung in Überlastsituationen. In: ZWF Jahr. 107 (2012) 6. Hanser Verlag, München, 2012
- [Sei79] SEIWERT, L. J.: Mitbestimmung und Zielsystem der Unternehmung – Ansätze zu einem erweiterten Unternehmungsmodell der Betriebswirtschaftslehre. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1979
- [Sie16-ol] Siemens Industry Software GmbH: Plant Simulation, unter: [https://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml), 7. September 2016
- [Spu79] SPUR, G.: Produktionstechnik im Wandel. Carl Hanser Verlag, München, 1979
- [Sta01] STACH, H.: Zwischen Organismus und Notation – Zur kulturellen Konstruktion des Computer-Programms. Dt. Univ.-Verlag, Wiesbaden, 2001
- [SB03] SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D.: Process Selection – From Design to Manufacture. Elsevier, Oxford, 2003
- [TAG+17] THOMMEN, J.-P.; ACHLEITNER, A.-K.; GILBERT, D. U.; HACHMEISTER, D.; KAISER, G.: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. Springer Gabler, Wiesbaden, / Jean-Paul Thommen, Ann-Kristin Achleitner ; Hauptband, 8. Auflage, 2017
- [Tro01] TROMMER, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation, Reinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [VDI2206] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004
- [VDI2221] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1993
- [VDI2860] VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1990
- [VDI4499] VDI-Richtlinie 4499: Digitale Fabrik - Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2008
- [VDI5600] VDI-Richtlinie 5600: Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES). Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2016
- [VDI3633] VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2013
- [War95] WARNECKE, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3. unveränderte Auflage, 1995
- [WCP+08] WENZEL, S.; COLLISI-BÖHMER, S.; PITTSCH, H.; ROSE, O.; WEIß, M.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008
- [Wie14] WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure – Mit 3 Tabellen. Hanser, München, 8. Auflage, 2014

- 
- [WRN09] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.: Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 1. Auflage, 2009
- [Wis16-ol] WISCHERMANN, B.: Finanzbuchhaltung, unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/461/finanzbuchhaltung-v8.html>, 2016
- [ZS96] ZAHN, E. O. K.: Produktionswirtschaft. Lucius & Lucius, Stuttgart, 1996



## **Anhang**

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
A1 Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel.....	A-1
A2 Ergänzungen zur statischen P.S.-Konzipierung .....	A-3
A3 Ergänzungen zur Konzipierung des P.S.-Verhalten .....	A-10
A4 Ergänzungen zur Analyse von Kundenbeziehungen und Auftragslage ..	A-18



## A1 Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel

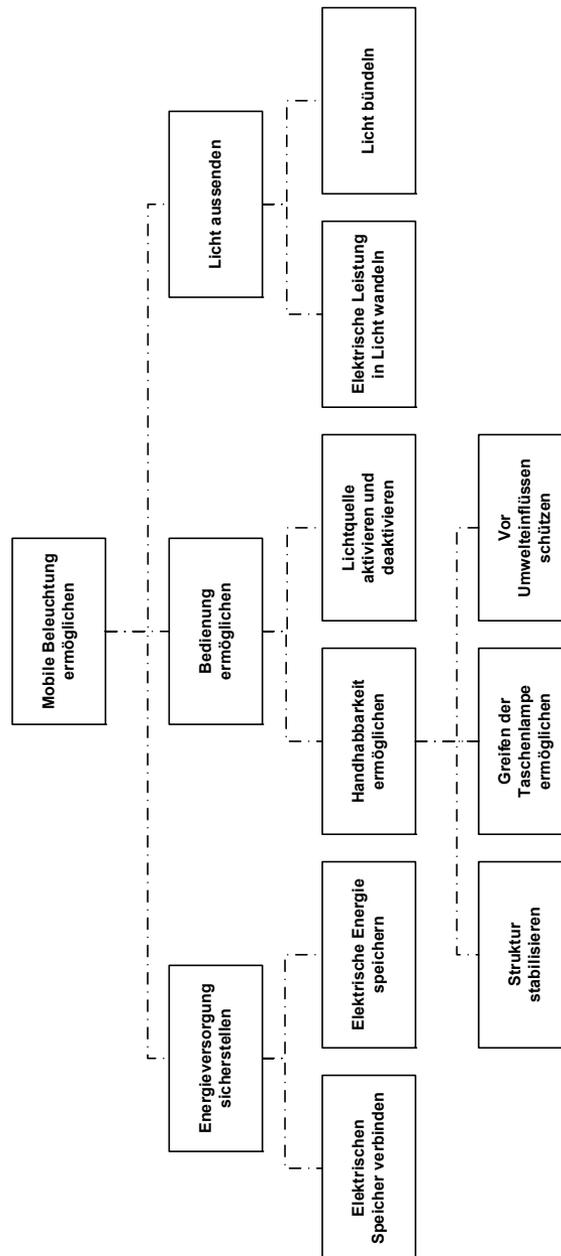


Bild A-1: Funktionsstruktur des Anwendungsbeispiels Taschenlampe

Stand: 2. Mai 2016 ersetzt:				<b>Anforderungsliste Taschenlampe</b>	Blatt 1	Seite 1
Aenderung	F/W		Anforderungen	Verantw.	Bemerkungen	
		<b>1</b>	<b>Geometrie</b>			
	F	1.1	Länge: 120 - 300 mm			
	F	1.2	Durchmesser: 30 - 60 mm			
		<b>2</b>	<b>Merkmale</b>			
	F	2.1	Mindestens 12 h durchgängig verwendbar			
	F	2.2	Lichtstrom: 500 - 800 Lumen			
	F	2.3	Hoher Individualisierungsgrad			
	F	2.4	Unkomplizierter Energiespeicheraustausch			
	F	2.5	Witterungsbeständig			
	F	2.6	Schmutzresistent			
	F	2.7	Schlagfest			
	F	2.8	Hohe Lebensdauer			
	F	4.4	Leicht verständlich in der Bedienung			
	F	4.5	Automatische Abschaltung			
		4.6	SOS Signalfolge			
		4.7	Stroboskop-Funktion			
		<b>5</b>	<b>Material</b>			
	F	5.1	Geringe Korrosionsgefahr			
	F	5.2	Geringes Gewicht			
	F	5.3	Beschichtungsfähig			
	F	5.4	Minimale Festigkeit 200 N/mm <sup>2</sup>			
		<b>6</b>	<b>Kosten</b>			
	F	6.1	Preis 35 - 60 €			

Bild A-2: Anforderungsliste des Anwendungsbeispiels Taschenlampe (Ausschnitt)

## A2 Ergänzungen zur statischen P.S.-Konzipierung

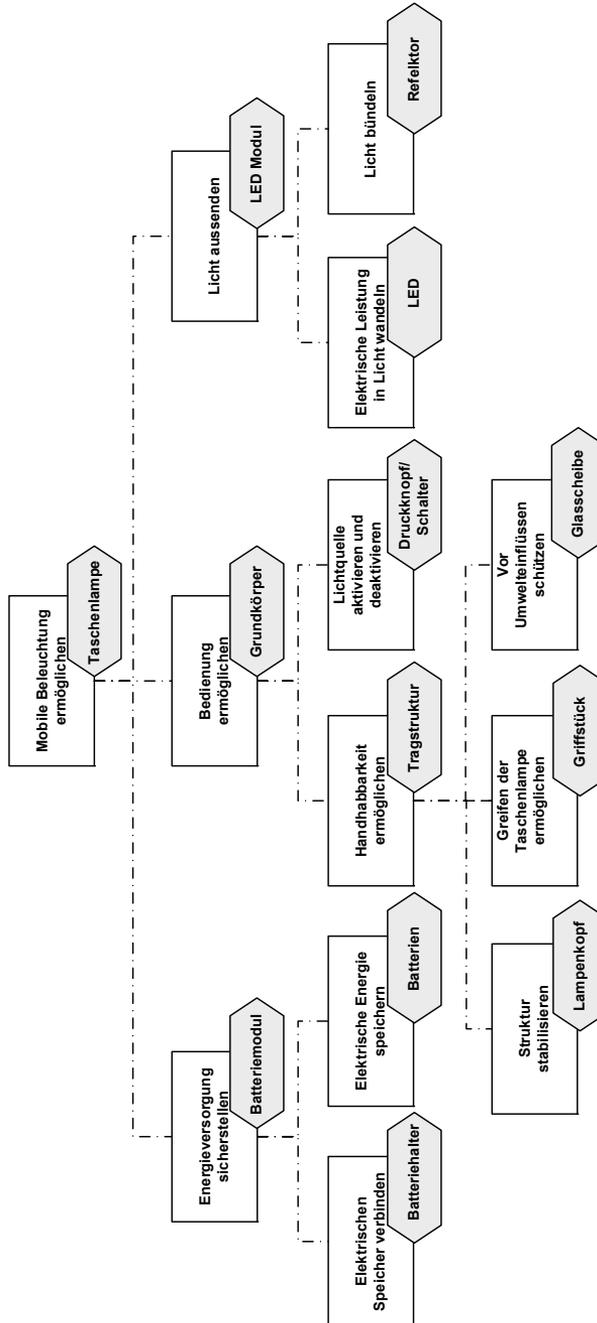


Bild A-3: Funktionaler Zusammenhang der Taschenlampe nach [Nor12, S. 112]

Die Bewertungen der relevanten Montagebeziehungen der Systemelemente der Taschenlampe wurde in der Beziehungsmatrix eingetragen (Bild A-4). Wie der Matrix entnommen werden kann wurden hierzu die Systemelemente auf ihre Beziehung zueinander untersucht. Für eine elektrische Verbindung zueinander wird hierzu eine Eins in das jeweilige Feld eingetragen. Bei einer mechanischen Wirkbeziehung wird eine Zwei eingetragen, da diese Beziehung eine höhere Relevanz für die Montage hat. Nachdem die Matrix vollständig ausgefüllt ist können die Summen der Bewertungen je Systemelement gebildet werden. Diese Summen dienen der Rangfolgebildung der Systemelemente zu einer produktionsorientierten Erzeugnisstruktur. Bild A-4 zeigt diese und die einzelnen Bewertungssummen und Montageziffern der Systemelemente. Die Bewertungssummen von sich detaillierenden Systemelementen werden dabei zusammengefasst. Beispielsweise bilden die Batterien (Bewertung = 3) und die Batteriehalter (Bewertung = 8) das Batteriemodul mit einer Bewertung von 7. Der Wert 7 ergibt sich aus der Tatsache, dass eine mechanische Wirkbeziehung zwischen den Batterien und dem Batteriehalter mit einem Wert von 2 vorliegt. Diese wird bei der Zusammenfassung der Einzelsummen nicht berücksichtigt.

		Beziehungsmatrix		Systemelemente								
				Glasscheibe	Reflektor	LED	Lampenkopf	Batteriehalter	Batterien	Durckknopf	Griffstück	
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Systemelemente	Glasscheibe	1	■	2		2						
	Reflektor	2	2	■								
	LED	3			■	2				1		
	Lampenkopf	4	2		2	■	2					2
	Batteriehalter	5				2	■	2	2	2	2	
	Batterien	6					2	■	1			
	Durckknopf	7			1		2	1	■	2		
	Griffstück	8				2	2			2	■	

Bild A-4: Beziehungsmatrix des Anwendungsbeispiels Taschenlampe nach [Nor12, S. 105]

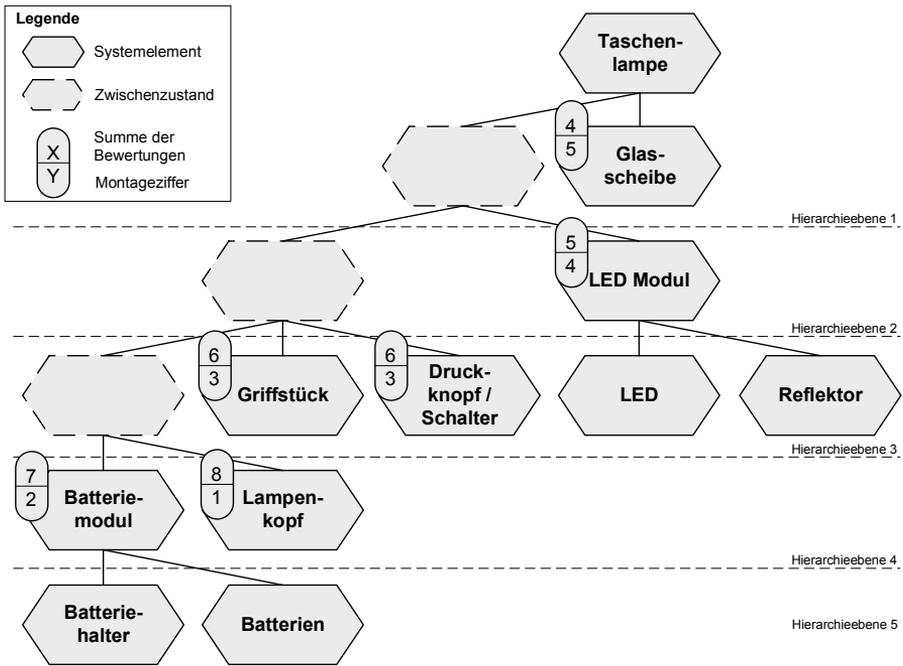


Bild A-5: Produktionsorientierte Erzeugnisstruktur der Taschenlampe auf Basis der Prinziplösung nach [Nor12, S. 112]

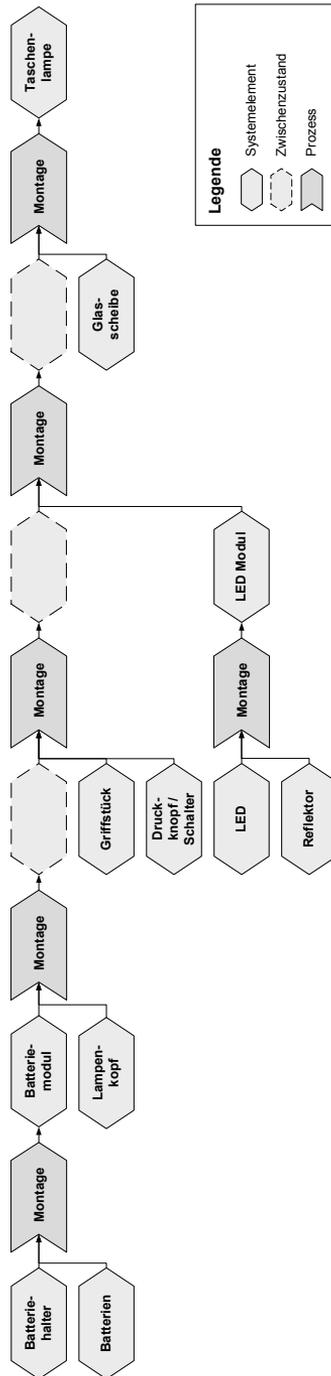


Bild A-6: Erste Prozessfolge mit Montagevorgängen nach [Nor12, S. 114]



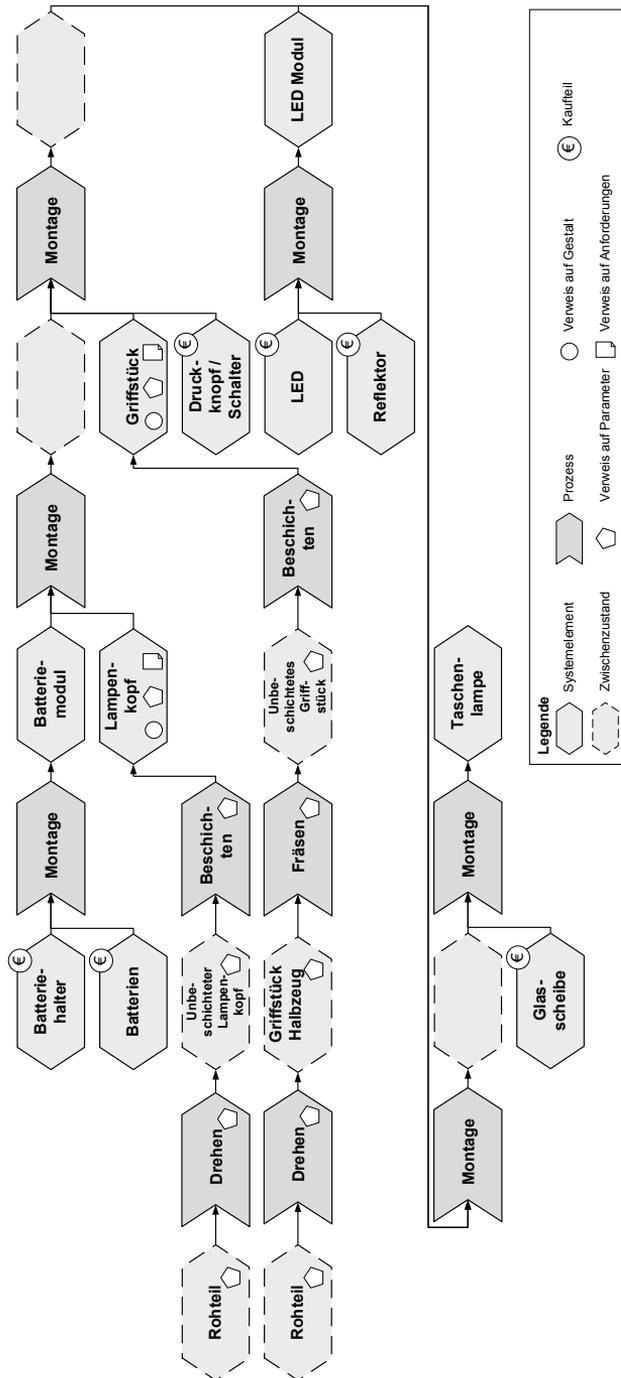


Bild A-8: Prozessfolge der Taschenlampe nach [Nor12, S. 131]

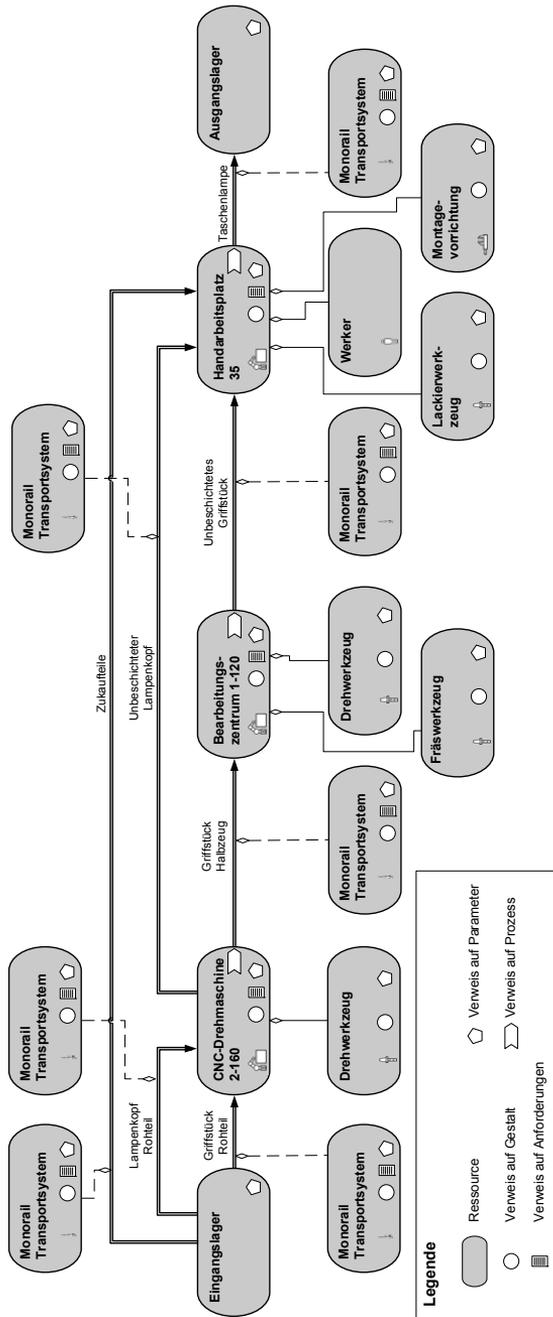


Bild A-9: Ressourcenfolge der Taschenlampe nach [Bau15, S. 140]

### A3 Ergänzungen zur Konzipierung des P.S.-Verhalten

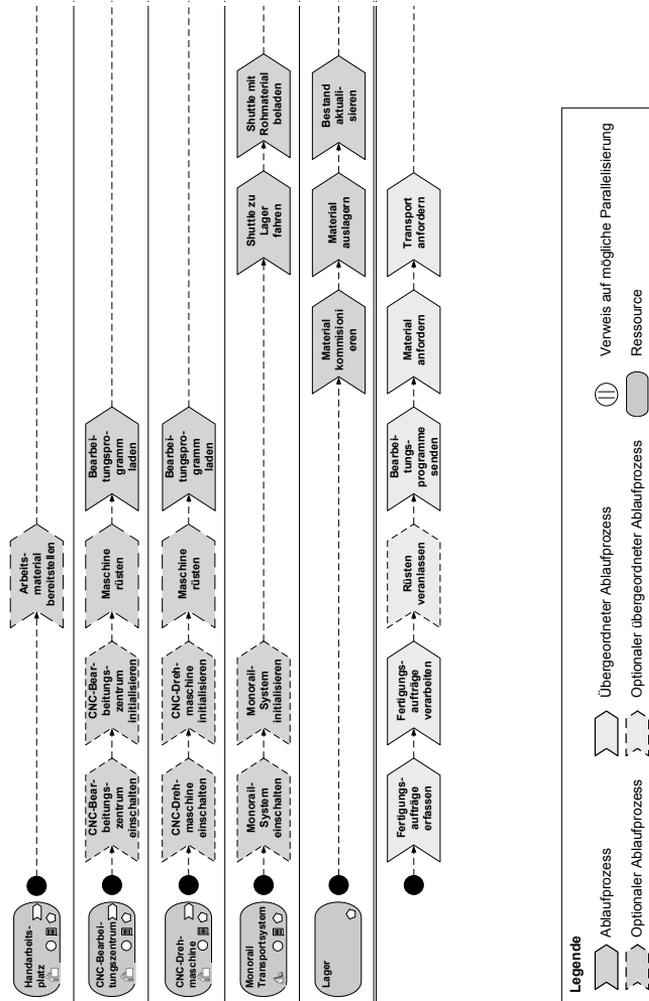


Bild A-10: Ablaufprozesse der Taschenlampe - Fokus Griffstück (1/3)

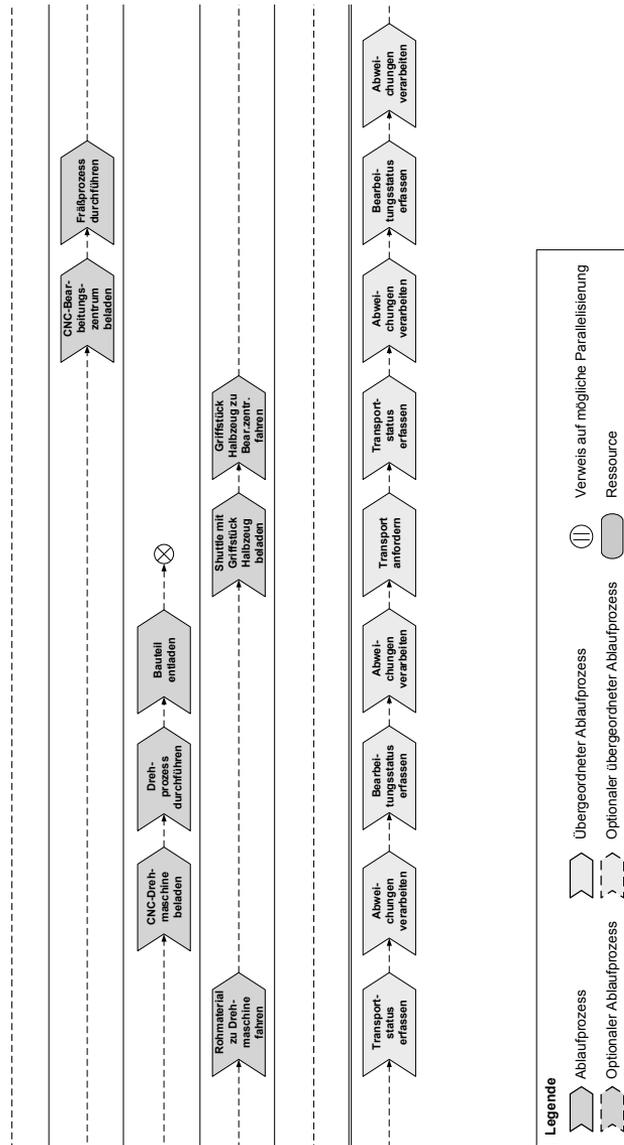


Bild A-11: Ablaufprozesse der Taschenlampe - Fokus Griffstück (2/3)

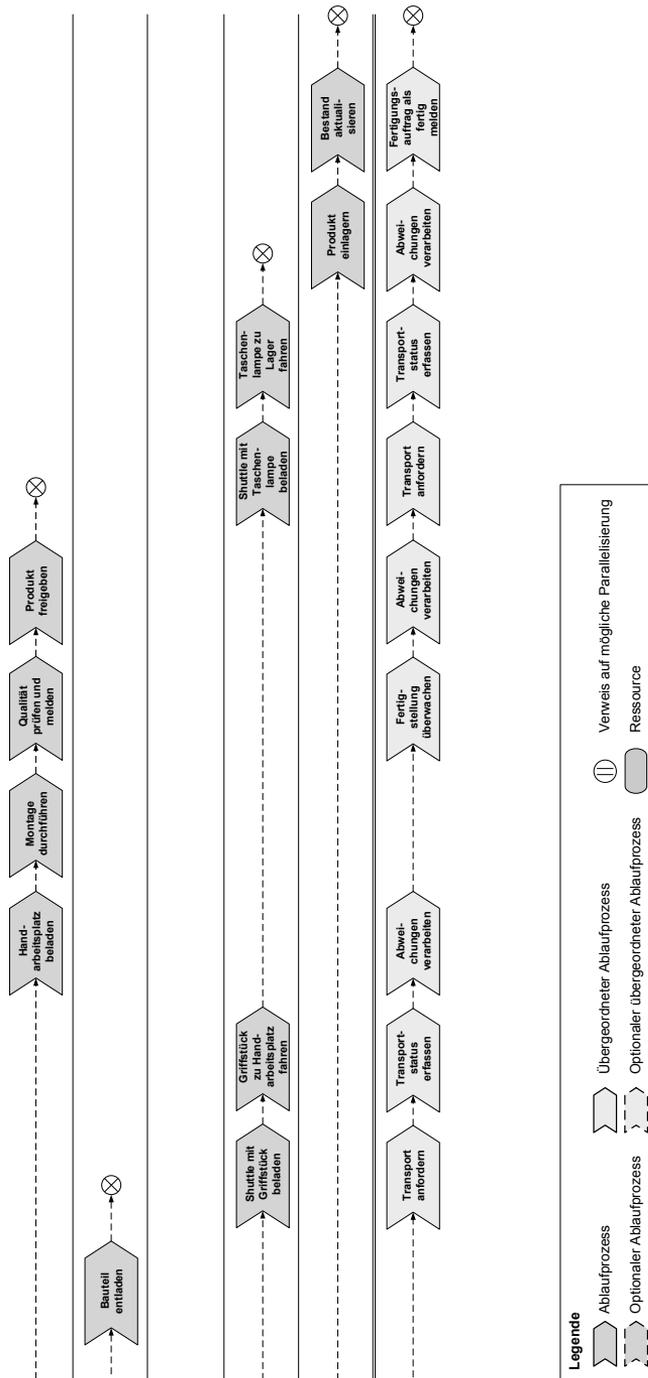


Bild A-12: Ablaufprozesse der Taschenlampe - Fokus Griffstück (3/3)

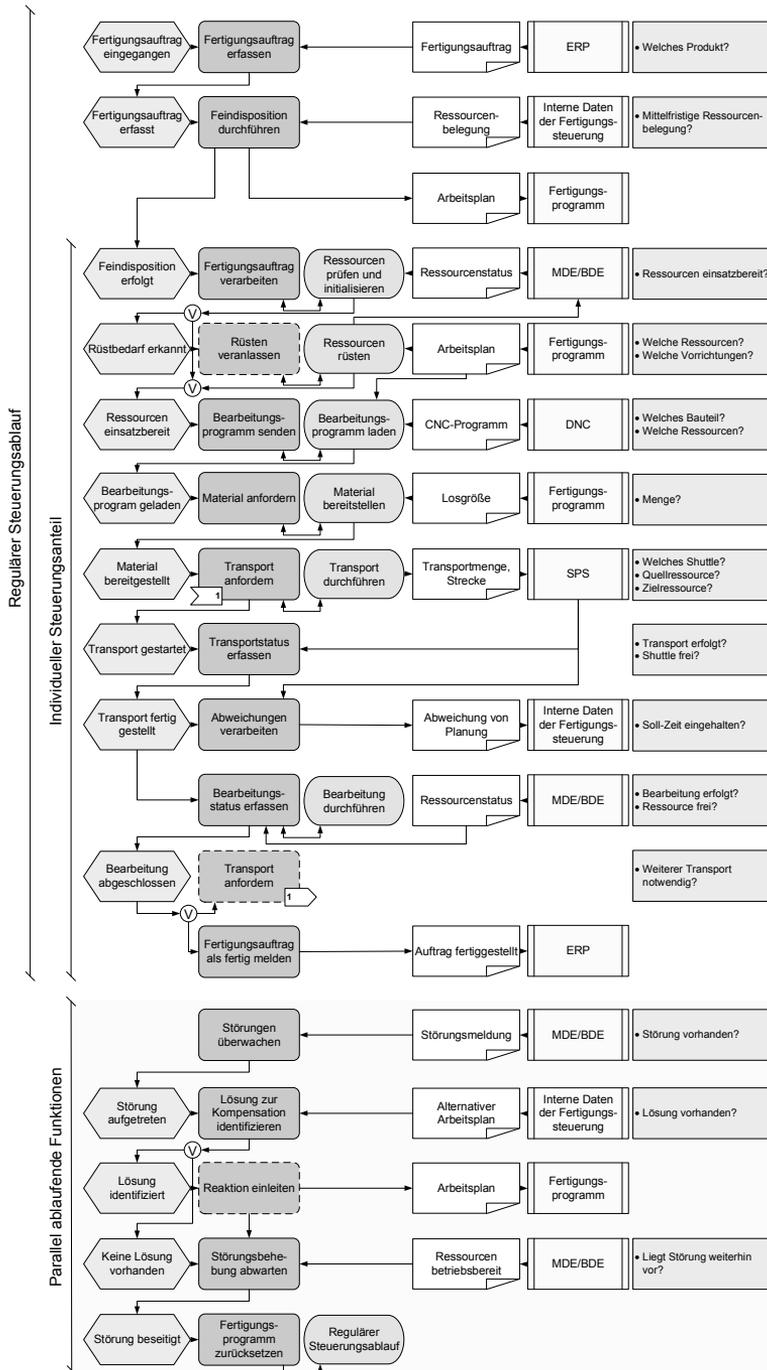


Bild A-13: Grundmodell des Verhaltens der Taschenlampenproduktion

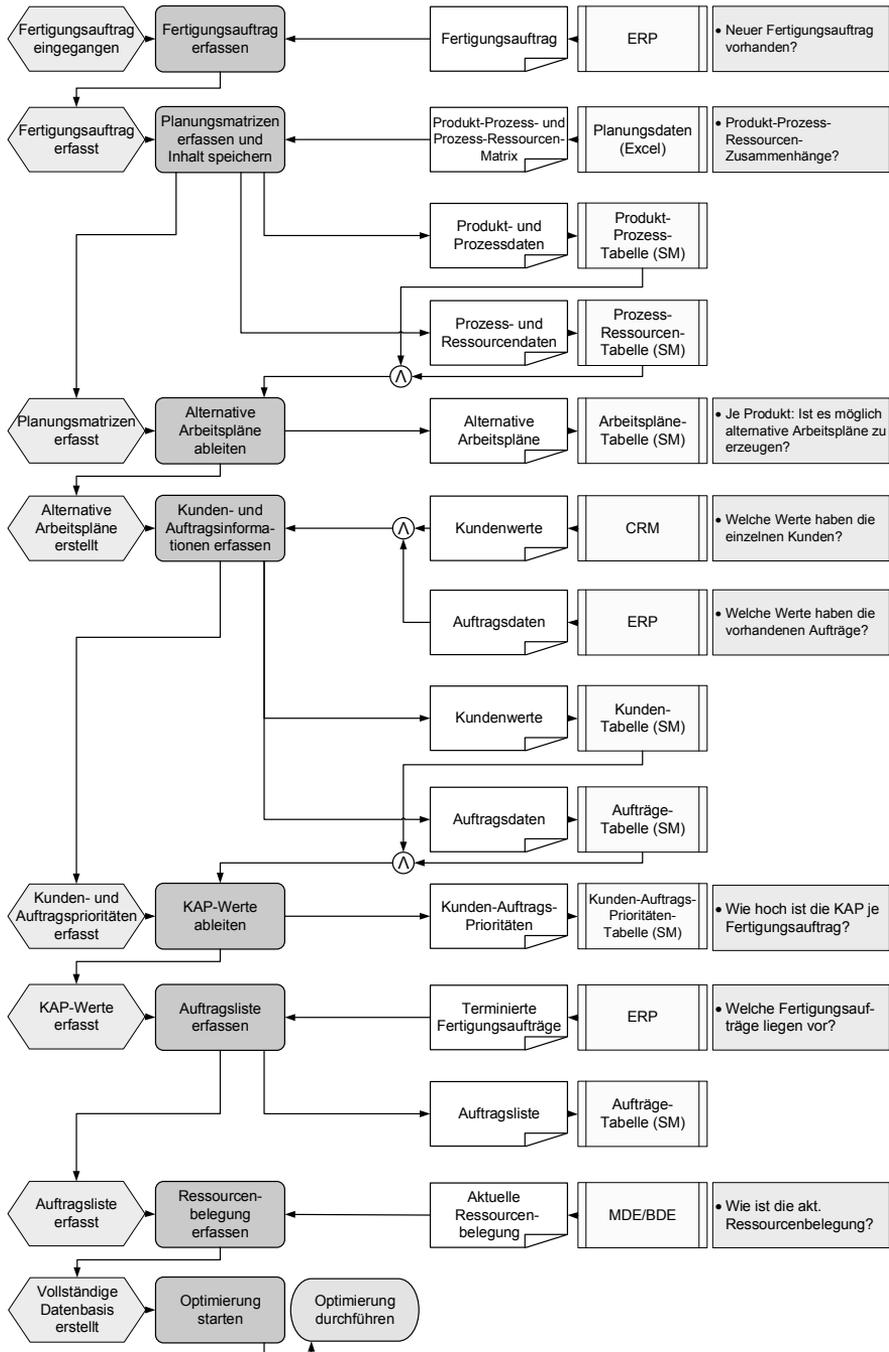


Bild A-14: Verhaltensbeschreibung der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im ersten Schritt: Analyse der Ist-Situation

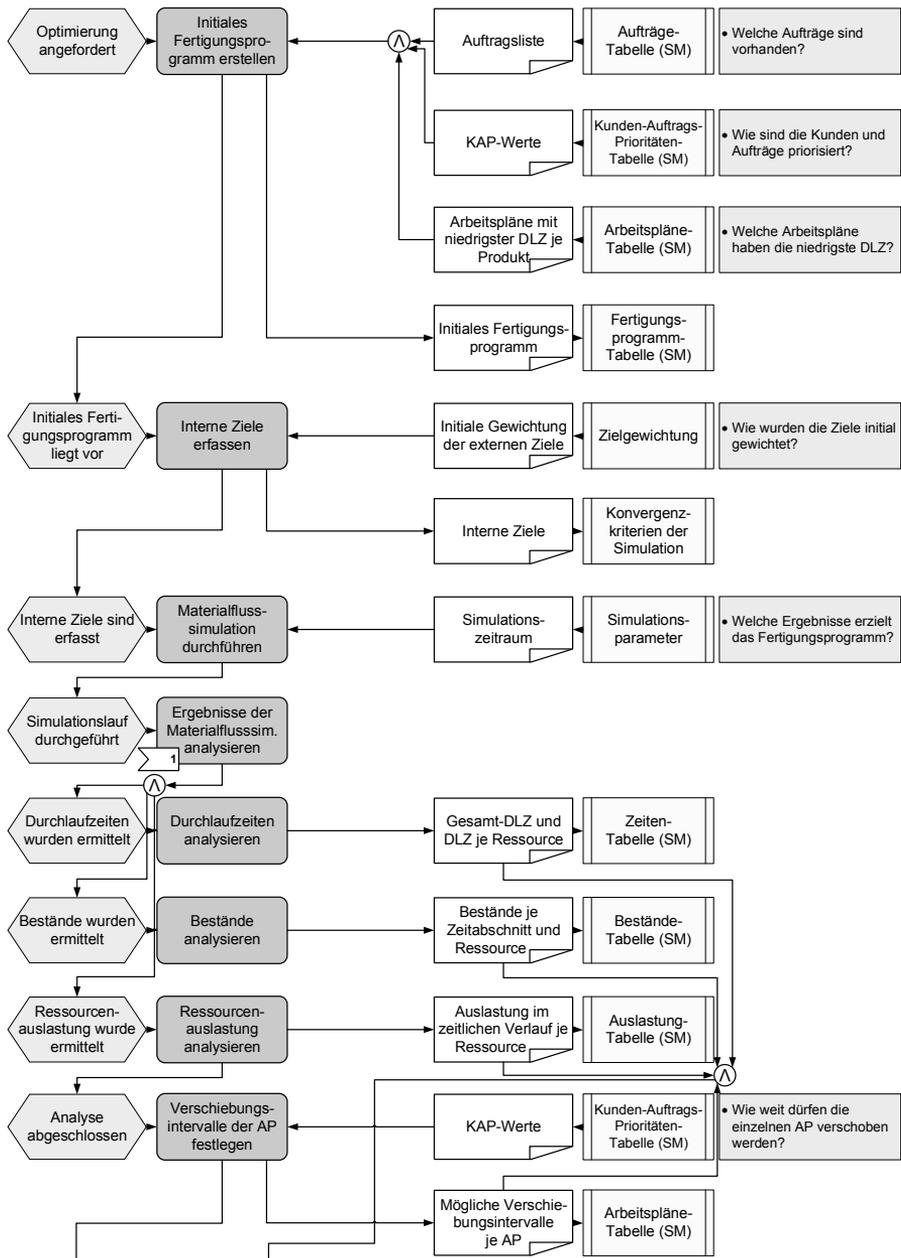


Bild A-15: Verhaltensbeschreibung der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im zweiten Schritt: Bestimmung der Systemziele (1/2)

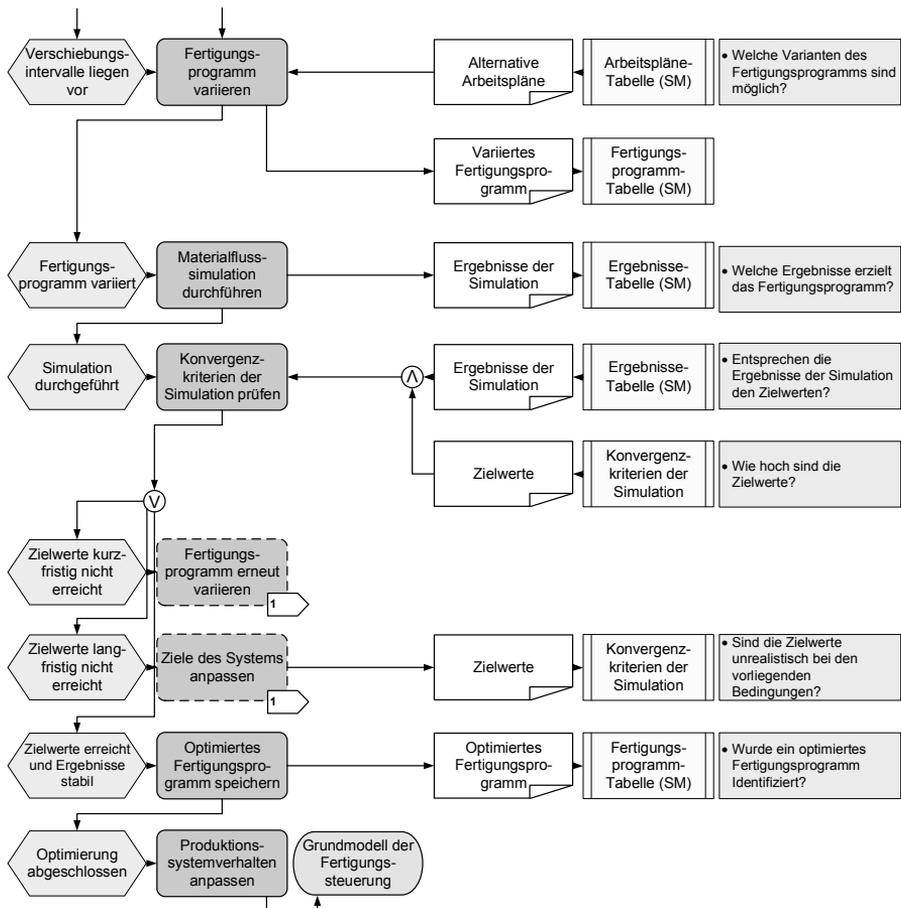


Bild A-16: Verhaltensbeschreibung der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung im zweiten Schritt: Bestimmung der Systemziele (2/2)

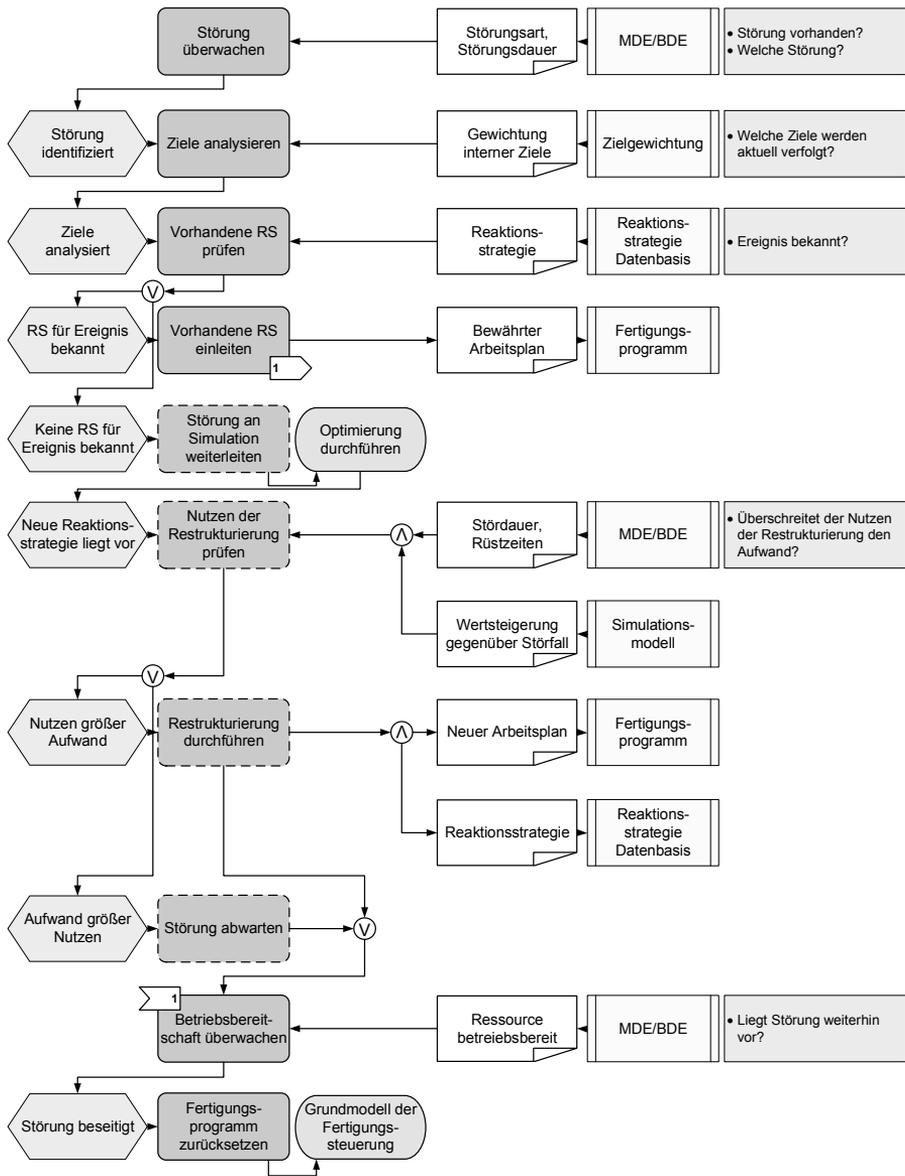


Bild A-17: Verhaltensbeschreibung der parallelen Funktionen zur Überwachung von Störungen in der selbstoptimierenden Fertigungssteuerung

## A4 Ergänzungen zur Analyse der Kundenbeziehungen und der Auftragslage

Tabelle A-1: Kundendaten des Unternehmens SPSE-Lights

	Jahresumsatz des Kunden in Mio. €	Kundenwachstum pro Jahr in %	Anteil am Unternehmensumsatz in %	Erwartetes Kundenumsatzwachstum in %	Umsatzrentabilität in %
Kunde A	327	3,2	31,1	85,0	7,8
Kunde B	13	0,7	7,5	78,0	2,3
Kunde C	31	4,1	8,1	62,0	4,1
Kunde D	11	0,3	5,4	27,0	-0,4
Kunde E	0,5	0,6	1,3	34,0	0,0
Kunde F	11	17,2	2,2	19,0	1,8
Kunde G	261	18,1	6,0	41,0	5,2
Kunde H	2,8	-1,7	8,2	69,0	9,1
Kunde I	424	9,4	2,3	89,0	8,0
Kunde J	319	22,1	0,8	12,0	4,9

Tabelle A-2: Bewertung der Kundenprioritäten (SPSE-Lights)

	Jahresumsatz des Kunden	Kundenwachstum pro Jahr	Anteil am Unternehmensumsatz	Erwartetes Kundenumsatzwachstum	Umsatzrentabilität
Kunde A	4	3	5	4	4
Kunde B	2	2	3	4	2
Kunde C	3	3	3	3	3
Kunde D	2	2	3	2	1
Kunde E	1	2	1	2	1
Kunde F	2	4	2	2	2
Kunde G	4	4	3	2	3
Kunde H	2	1	3	3	4
Kunde I	4	4	2	4	4
Kunde J	4	5	1	2	3

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name: Daniel Köchling  
Geburtsdatum: 8. Juli 1982  
Geburtsort: Geseke  
Familienstand: verheiratet  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### **Schulbildung**

08/1989 – 07/1993      Nikolaischule-Grundschule, Lippstadt  
08/1993 – 06/1999      Graf-Bernhard-Realschule, Lippstadt-Lipperode  
   *Abschluss: Fachoberschulreife*  
08/2003 – 06/2004      Lippe Berufskolleg, Lippstadt  
   *Abschluss: Fachhochschulreife*

### **Berufsausbildung**

08/1999 – 07/2002      Hella KG Hueck & Co., Lippstadt  
   *Abschluss: Verfahrensmechaniker*

### **Studium**

09/2004 – 03/2012      Maschinenbau, Universität Paderborn  
   *Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)*

### **Berufliche Tätigkeit**

07/2002 – 07/2003      Kunststoff-Formgeber, Hella KG Hueck & Co., Lippstadt  
06/2012 – 07/2016      Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Universität Paderborn,  
   Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Strategische Produkt-  
   planung und Systems Engineering, Prof. Dr.-Ing. Gause-  
   meier  
10/2016 – heute      Projektleiter Industrie 4.0, Benteler Automobiltechnik  
   GmbH, Paderborn

Paderborn, 2. Mai 2018



## **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 neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 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: Enroute 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 tomorrows economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.



## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 354 ANACKER, H.: Instrumentarium für einen Lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 354, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-73-1
- Bd. 355 RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 355, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-74-8
- Bd. 356 SÖLLNER, C.: Methode zur Planung eines zukunftsfähigen Produktportfolios. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5
- Bd. 357 AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 357, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-76-2
- Bd. 358 LÖFFLER, A.: Entwicklung einer modellbasierten In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 358, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-77-9
- Bd. 359 LEHNER, A.: Systematik zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 359, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-78-6
- Bd. 360 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. Dezember 2016, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 360, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-79-3
- Bd. 361 PETER, S.: Systematik zur Antizipation von Stakeholder-Reaktionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 361, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-80-9
- Bd. 362 ECHTERHOFF, O.: Systematik zur Erarbeitung modellbasierter Entwicklungsaufträge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 362, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-81-6
- Bd. 363 TSCHIRNER, C.: Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 363, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-82-3
- Bd. 364 KNOOP, S.: Flachheitsbasierte Positionsregelungen für Parallelkinematiken am Beispiel eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 364, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-83-0
- Bd. 365 KLIEWE, D.: Entwurfssystematik für den präventiven Schutz intelligenter Technischer Systeme vor Produktpiraterie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 365, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-84-7
- Bd. 366 IWANEK, P.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 366, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-85-4
- Bd. 367 SCHWEERS, C.: Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 367, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-86-1

## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 368 SCHIERBAUM, T.: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 368, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-87-8
- Bd. 369 BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Intelligente technische Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 369, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-88-5
- Bd. 370 KÜHN, A.: Systematik zur Release-Planung intelligenter technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 370, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-89-2
- Bd. 371 REINOLD, P.: Integrierte, selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 371, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-90-8
- Bd. 372 BÄUMER, F. S.: Indikatorbasierte Erkennung und Kompensation von ungenauen und unvollständig beschriebenen Softwareanforderungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 372, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-91-5
- Bd. 373 ECKELT, D.: Systematik zum innovationsorientierten Intellectual Property Management. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 373, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-92-2
- Bd. 374 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 13. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 23. und 24. November 2017, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 374, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-93-9
- Bd. 375 WESTERMANN, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierter Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 375, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-94-6
- Bd. 376 JÜRGENHAKE, C.: Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 376, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-95-3
- Bd. 377 WEBER, J.: Modellbasierte Werkstück- und Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit in NC-Programmen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 377, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-96-0
- Bd. 378 OESTERSÖTEBIER, F.: Modellbasierter Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme mithilfe semantischer Technologien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 378, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-97-7
- Bd. 379 ABELDGAWAD, K.: A System-Level Design Framework for Networked Driving Simulation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 379, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-98-4
- Bd. 380 JUNG, D.: Local Strategies for Swarm Formations on a Grid. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 380, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-99-1
- Bd. 381 PLACZEK, M.: Systematik zur geschäftsmodellorientierten Technologiefrüh-aufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 381, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-00-2