

*Christian Bremer*

***Systematik zur Modellierung  
flexibler Produktionsanlagen im  
Model-Based Systems Engineering***

***Concept for modelling  
flexible production plants in  
Model-Based Systems Engineering***



## Geleitwort

Advanced Systems Engineering – neue Methoden und Werkzeuge für die Wertschöpfung von Morgen – ist die verbindende Leitidee unserer Forschungsarbeiten. Am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn sowie am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM arbeiten wir an dieser Leitidee. Unser generelles Ziel ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen. Zentrale Schwerpunkte der Forschung an den beiden Instituten sind die Strategische Planung und das Systems Engineering.

Zukünftig werden Produktionsanlagen hochgradig flexibel sein und Maschinen mit hohem Vernetzungsgrad und intelligenter Funktionen beinhalten. Die beschriebenen neuen Funktionen schaffen jedoch auch neue Komplexität in einer Produktionsanlage und insbesondere Abhängigkeiten – innerhalb der Anlage und zu dessen Umfeld. Planung und Entwicklung solcher flexiblen Anlagen birgt daher neue Herausforderungen. Das Paradigma des Model-Based Systems Engineering (MBSE) adressiert diese Problematik. Im MBSE werden Systeme disziplinübergreifend entwickelt. Dabei werden durchgängige Modelle genutzt um die Entwicklungstätigkeiten zu unterstützen, den Entwicklungsstand zu beschreiben und die Entwicklungsartefakte auch rechnergestützt auszuwerten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering. Hierzu wird ein Modellierungskonzept vorgestellt, das die notwendigen Aspekte definiert und entsprechende Modellierungsvorschriften liefert. Ein Vorgehensmodell zur konkreten Erstellung des Modells leitet den Benutzer an. Eine SysML-basierte Werkzeugunterstützung, die Erstellung der Modelle und die Verknüpfung der Informationen ermöglicht, ergänzt den Ansatz. Die Validierung erfolgt anhand des Beispiels einer industriellen Großwäscherei.

Herr Bremer hat mit seiner Arbeit die Vision des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 ein Stück in die Gegenwart gerückt. Im Kern leistet er fundamentale Beiträge zu unserem Forschungsschwerpunkt MBSE, die hohe Anerkennung in der Fachcommunity finden. Zudem ist es ihm gelungen, diese Ergebnisse geschickt in die aktuelle Industrie 4.0 Herausforderungen einfließen zu lassen. Das unterstreicht die hohe Relevanz für die Praxis.

Ich wünsche Herrn Bremer auf seinem weiteren beruflichen Weg alles Gute und freue mich, wenn er über seine Promotion hinaus an der Weitergestaltung des MBSE mitwirkt.

Mit den besten Wünschen,

Paderborn, im April 2020

Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu



# **Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering**

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

genehmigte  
DISSERTATION

von  
M.Sc. Christian Bremer  
aus Bielefeld

Tag des Kolloquiums: 5. Februar 2020  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu  
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit am Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM) im Bereich Produktentstehung. Die Grundlage hierfür bildeten verschiedene Industrie- und Forschungsprojekte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, der mich überhaupt für das Thema Model-Based Systems Engineering begeistert hat. Roman, ich kann ehrlich sagen, dass du meinen beruflichen Werdegang entscheidend geprägt hast. Danke für dein entgegengebrachtes Vertrauen und deine Förderung. Ich freue mich, dass wir auch weiterhin beruflich zusammenarbeiten.

Mein Dank gilt auch dem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier. Das von ihm geschaffene Umfeld bildet die Grundlage dieser Arbeit und der Ausbildung, die ich genießen konnte. Bedanken möchte ich mich auch bei dem weiteren Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers. Seine Begeisterung für die Produktentstehung und das Systems Engineering ist inspirierend.

Die Zeit am Fraunhofer IEM wird mir in guter Erinnerung bleiben. Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen, von denen ich an dieser Stelle nicht jeden namentlich nennen kann, für die großartige Zusammenarbeit. Ich habe in dieser Zeit viel gelernt – und auch viel Spaß gehabt. Für den wichtigen Input und das Feedback zu dieser Dissertation möchte ich mich insbesondere bei Harald Anacker bedanken. Ein großer Dank gilt auch meinen studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern, allen voran Florian Schröder und Alan Shavani, die auch zum Input für diese Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gebührt jedoch meiner Familie. Vielen Dank an meine Eltern, die mir immer den Rücken gestärkt und meine Ausbildung ermöglicht haben. Meiner Frau Katharina danke von ganzem Herzen. Du musstest in den vergangenen Jahren häufig zurückstecken und hast mich dennoch immer motiviert und bestärkt. Danke, dass du mir immer mit Rat zur Seite stehst.

Bielefeld, im Mai 2020

Christian Bremer



## **Zusammenfassung**

Die Digitalisierung treibt den Wandel von modernen Produkten und Dienstleistungen. Der Übertrag der Digitalisierung auf die industrielle Produktion verspricht nichts geringeres als die vierte Industrielle Revolution. Zukünftig werden Produktionsanlagen hochgradig flexibel sein und Maschinen mit hohem Vernetzungsgrad und intelligenter Funktionen beinhalten. Dies steigert jedoch auch die Komplexität einer Produktionsanlage und insbesondere die Abhängigkeiten – innerhalb der Anlage und zu dessen Umfeld. Planung und Entwicklung solcher flexiblen Anlagen birgt daher neue Herausforderungen. Das Paradigma des Model-Based Systems Engineering (MBSE) adressiert diese Problematik. Im MBSE werden Systeme disziplinübergreifend entwickelt. Dabei werden durchgängige Modelle genutzt, um die Entwicklungstätigkeiten zu unterstützen, den Entwicklungsstand zu beschreiben und die Entwicklungsartefakte auch rechnergestützt auszuwerten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering. Hierzu wird ein Modellierungskonzept vorgestellt, das die notwendigen Aspekte definiert und entsprechende Modellierungsvorschriften liefert. Ein Vorgehensmodell zur konkreten Erstellung des Modells sowie eine SysML-basierte Werkzeugunterstützung ergänzen den Ansatz. Die Validierung erfolgt anhand des Beispiels einer industriellen Großwäscherei.

## **Summary**

The Digitalization is driving the change of modern products and services. The transfer of the digitalization towards the industrial production will enable a fourth industrial revolution. In future, production plants will be highly flexible and will contain machines that are linked with each other will have intelligent functions. However, this will also increase the complexity and the dependencies of such plants – within the plant but also to its environment. Planning and Development of such flexible plants will thus bring new challenges. The paradigm of Model-Based Systems Engineering (MBSE) addresses this challenge. In MBSE, systems are developed in an interdisciplinary manner. Doing so, models are used holistically to support the development processes, describe the development artefacts and to use is for computer-aided functions.

The goal of this present thesis is a systematics for the modeling of flexible production plants within Model-Based Systems Engineering. In order to achieve this, it presents a concept for modeling, describing the necessary model aspects and the according rules. A procedure model guides the user to create the systems model. A SysML based tool support enables the concrete application. The validation of the approach is done using the example of an industrial laundry.



## Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [ABB+15] ALBERS, A. A.; BREMER, C.; BRUNS, T.; DUMITRESCU, R.; KRÜGER, M.: Modellbasierte Analyse und Simulation industrieller Großwäschereien. Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WinTeSys), Paderborn, 2015
- [BDG15] BREMER, C.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Zustandsorientierte Modellierung flexibler Produktionssysteme. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2015, Stuttgart, 2015
- [DBK+15] DUMITRESCU, R.; BREMER, C.; KÜHN, A.; TRÄCHTLER, A.; FRIEBEN, T.: Model-based development of products, processes and production resources - A state oriented approach for an integrated system model of objects, processes and systems. In: at Automatisierungstechnik 2015, No. 63(10), DE GRUYTER, Oldenbourg, 2015, pp. 844-857
- [RSR+15] ROBMANN J.; SCHLUSE, M.; RAST, M.; HOPPEN, M.; DUMITRESCU, R.; BREMER, C.; HILLEBRAND, M.; STERN, O.; BLÜMEL, F.; AVERDUNG, C.: Integrated development of complex systems with model-based system specification and simulation. Proceedings of ASME/CIE 2015, Bosten, USA, 2015
- [RSR+17] ROBMANN, J.; SCHLUSE, M.; RAST, M.; HOPPEN, M.; ATORF, L.; DUMITRESCU, R.; BREMER, C.; HILLEBRAND, M.; STERN, O.; SCHMITTER, P.: Integrierte modellbasierte Systemspezifikation und -simulation – Eine Fallstudie zur Sensorauslegung in der Raumfahrt. Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WinTeSys), Paderborn, 2017
- [WDB+17] WOHLERS, B.; DZIWOK, S.; BREMER, C.; SCHMELTER, D.; LORENZ, W.: Improving the product control of mechatronic systems using key performance indicators. Proceedings of 24th international conference on production research (ICPR), Poznan, Poland, 2017
- [TAB+18] TRÄCHTLER, A.; ALBERS, A.A.; BREMER, C.; DUMITRESCU, R.; GRÄLER, M.; JUST, V. TSCHIRNER, C.; WANG, S.: Modellbasierter Entwurf intelligenter Systeme. In: TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Ressourceneffiziente selbstoptimierende Wäscherei – Ergebnisse des ReSerW-Projekts. Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2018



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1 Einleitung.....	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Vorgehensweise .....	3
2 Problemanalyse.....	5
2.1 Begriffsbestimmungen .....	5
2.2 Veränderungen der Produktion hin zur Industrie 4.0 .....	9
2.2.1 Cyber-Physical Systems.....	10
2.2.2 Integration von Wertschöpfungsketten und Smart Factory .....	12
2.2.3 Durchgängiges Engineering.....	14
2.2.4 Fazit.....	17
2.3 Aufbau und Funktionsweise industrieller Produktion.....	17
2.3.1 Funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens.....	18
2.3.2 Das 4-Zyklen Modell der Produktentstehung .....	19
2.3.3 Herausforderungen bei der Entwicklung von Produkten und ihren Produktionssystemen .....	21
2.3.4 Fazit.....	23
2.4 Planung flexibler Produktionsanlagen.....	23
2.4.1 Prozesse der Arbeitsvorbereitung.....	23
2.4.2 Planung von Produktionsanlagen .....	26
2.4.3 Flexible Produktionssysteme .....	30
2.4.4 Fazit.....	33
2.5 Model-Based Systems Engineering .....	33
2.5.1 Systems Engineering .....	34
2.5.2 Objektorientierte Systemgestaltung .....	36
2.5.3 Nutzung des Systemmodells im MBSE .....	38
2.5.4 SysML – Systems Modeling Language.....	42
2.5.5 Fazit.....	44
2.6 Problemabgrenzung.....	44
2.7 Anforderungen an die Arbeit .....	48
3 Stand der Technik .....	49
3.1 Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung.....	49

---

3.1.1	Sprachkonzepte.....	49
3.1.1.1	PPR-Modell nach FELDMANN et al.....	49
3.1.1.2	SysML4Mechatronics nach VOGEL-HEUSER.....	51
3.1.1.3	Sichtenkonzept nach SCHAEFER et al.....	53
3.1.1.4	Integrative Spezifikation von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER et al. ....	54
3.1.1.5	Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse in der Produktion nach SCHOLZ-REITER .....	57
3.1.2	Methoden zur modellbasierten Anlagenplanung.....	59
3.1.2.1	Modellierungsmethodik für Produktionsanlagen nach BASSI et al.....	59
3.1.2.2	Entwicklungsprozess für verteilte Automatisierungssysteme nach FAY et al. ....	62
3.1.2.3	MecPro <sup>2</sup> Referenzprozess für Cybertronische Produktionssysteme .....	63
3.1.2.4	SysML basierte MES-Konzipierung nach PIÉTRAC et al.....	66
3.2	Methoden des Model-Based Systems Engineering .....	68
3.2.1	SysMod – System Modeling Process .....	68
3.2.2	FAS – Funktionale Architekturen für Systeme .....	71
3.2.3	OOSEM – Object-Oriented Systems Engineering Method .....	73
3.3	Ansätze der Prozessbeschreibung .....	76
3.3.1	Vorranggraphen.....	76
3.3.2	Beschreibungssprachen für Geschäftsprozesse.....	77
3.3.3	Aktivitätsdiagramm der UML/SysML.....	81
3.3.4	Wertstrom-Diagramm .....	83
3.4	Handlungsbedarf .....	85
4	Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering.....	89
4.1	Die Systematik im Überblick .....	89
4.2	MBSE-Modellierungskonzept.....	90
4.2.1	Modellarchitektur .....	91
4.2.2	Modellierung der Sichten .....	96
4.2.2.1	Prozessebene.....	96
4.2.2.2	Anlagenebene .....	102
4.2.2.3	Teilsystemebene .....	107
4.3	Vorgehensmodell zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen.....	111
4.3.1	Phase 1: Produktionsobjektbeschreibung.....	112
4.3.2	Phase 2: Erarbeitung der Produktionsprozesse.....	113
4.3.3	Phase 3: Architekturbeschreibung .....	114
4.3.4	Phase 4: Teilsystemdetaillierung .....	115

---

4.4	Werkzeugunterstützung .....	116
4.4.1	SysML Profil: SysML4ProductionPlants.....	116
4.4.2	Vorstellung der Werkzeugunterstützung.....	119
5	Anwendung und Bewertung.....	125
5.1	Exemplarische Anwendung anhand einer industriellen Großwäscherei .....	125
5.1.1	Vorstellung des Beispiels.....	125
5.1.2	Phase 1: Produktionsobjektbeschreibung.....	127
5.1.3	Phase 2: Erarbeitung der Produktionsprozesse.....	129
5.1.4	Phase 3: Architekturbeschreibung .....	130
5.1.5	Phase 4: Teilsystemdetaillieren .....	132
5.1.6	Beispielhafte Erläuterungen zur weiteren Anwendung der Werkzeugunterstützung.....	134
5.2	Bewertung der Arbeit .....	136
5.2.1	Erläuterungen zu den Einsatzpotentialen .....	136
5.2.2	Bewertung anhand der Anforderungen.....	138
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	141
	Literaturverzeichnis .....	147

## Anhang

A1	Modelle der Industriellen Wäscherei.....	A-1
A2	Profil SysML4CONSENS.....	A-5



# 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der anwendungsorientierten Forschung am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM. Die Ergebnisse wurden in verschiedenen Forschungs- und Industrieprojekten erarbeitet. Insbesondere sei an dieser Stelle das Projekt „ReSerW – Ressourceneffiziente Selbstoptimierende Wäscherei“ genannt. Als eines der Leitprojekte des BMBF-geförderten Spitzenclusters „it’s owl – Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe“ zielt es auf zukunftsweisende Methoden und Technologien der intelligenten und ressourceneffizienten Wäscherei. Es ist damit als ein Baustein hin zur Vision der Industrie 4.0 zu sehen. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in das Projekt ein und beschreibt eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering*.

## 1.1 Problematik

Moderne technische Erzeugnisse sind geprägt durch die tiefgreifende Integration von Mechanik, Elektrotechnik und Informationsverarbeitung. Dabei vollzieht insb. die Informationsverarbeitung eine rasante Entwicklung, die in den vergangenen Jahrzehnten die Technik, aber auch das gesellschaftliche Leben fundamental verändert hat [Bro10, S.17]. Auf Grund des fortwährenden Leistungszuwachses bei gleichzeitig sinkenden Preisen von IT-Hardware (vgl. Mooresches Gesetz [Sch97]) ergeben sich immer wieder neue Potentiale zur Wertschöpfung und Produktinnovation. Der Begriff der **Digitalisierung** wurde geprägt vor dem Hintergrund der zunehmenden Verbreitung von IT in weiten Teilen unseres täglichen Lebens. Viele technische Systeme wie Fahrzeuge, Maschinen oder Mobilfunkgeräte sind heute mit dem Internet verbunden und kommunizieren untereinander. Das „Internet der Dinge“ beschreibt die Idee, dass zukünftig noch weit mehr Produkte oder Gegenstände eindeutig identifizierbar und vernetzt sind und somit neue Dienstleistungen oder Wertschöpfungen möglich werden [MF10, S.107].

Im Bereich der Produktion bringt der Begriff der **Industrie 4.0** die Potentiale zum Ausdruck, die sich durch den Einzug der Digitalisierung in die industrielle Wertschöpfung ergeben. Die Vision ist eine intelligente und vernetzte Wertschöpfungskette, die auf Störungen reagiert, erweiterbar ist und höchste Effizienz aufweist. Die Basis hierfür stellen Cyber-Physical-Systems<sup>1</sup> (CPS) dar [GB12, S.9]. Es handelt sich dabei um technische Systeme, die hochgradig vernetzt sind und mit anderen Systemen interagieren. Sie sind lernfähig und können sich auch neuen Umgebungen anpassen. Ihr Einsatz in der Produktion (als Produktions-, Transport-, Prüfsystem usw.) ermöglicht die Realisierung intelligenter Fabriken (auch „Smart Factory“) und die Umsetzung der Industrie 4.0 [KWH13].

---

<sup>1</sup> Im Zusammenhang der Produktion wurde auch der Begriff des Cyber-Physical-Production-Systems (CPPS) geprägt [KWH13, S.84].

Damit wird es für produzierende Unternehmen zukünftig möglich, hochgradig **flexible Produktionsanlagen** zu betreiben.

Mit den Funktionen und Fähigkeiten zukünftiger Produktionssysteme steigt jedoch auch die **Komplexität** dieser Systeme und die der gesamten Anlage. Die Systeme sind geprägt durch die tiefgreifende Integration verschiedenster Disziplinen wie der Mechanik, Elektrotechnik, Software und Regelungstechnik. Sie weisen eine Vielzahl von Abhängigkeiten (sowohl innerhalb des Systems als auch nach außen) auf und können sich während der Laufzeit bspw. auf Grund von Lernprozessen oder Updates verändern. Zukünftig müssen Planer<sup>2</sup> und Betreiber von flexiblen Produktionsanlagen genauso wie der Entwickler solcher Systeme diese Komplexität beherrschen.

Die disziplinübergreifende Komplexität technischer Systeme erhöht auch die Komplexität in der Entwicklung solcher Systeme. Notwendig sind daher Methoden des Systems Engineering, bei dem es sich um einen fachdisziplinübergreifenden Ansatz handelt [GDS+13]. Dieser wird umgesetzt durch den Einsatz von **Model-Based Systems Engineering** (MBSE). MBSE ist ein Paradigma, das den Wandel weg von einer dokumenthin zu einer modellzentrierten Entwicklungsarbeit manifestiert. Es propagiert ein Systemmodell, das Informationen und Entwicklungsartefakte eines zu entwickelnden Systems zusammenführt und quasi einen Dreh- und Angelpunkt der Entwicklungstätigkeiten darstellt [Inc15], [Alt12]. Das Systemmodell erlaubt es, Komplexitäten zu verstehen, Probleme zu lösen und mit anderen zu kommunizieren [CBB15]. Mit MBSE werden dabei nicht ausschließlich die Entwickler selbst adressiert. Vielmehr ergibt sich der wahre Nutzen des Ansatzes durch die Einbeziehung der beteiligten Stakeholder – sowohl in der Entwicklung als auch entlang des Produktlebenszyklus.

Bei Planung und Betrieb flexibler Produktionsanlagen im Sinne der Industrie 4.0 zeichnet sich, wie erläutert, eine Komplexitätssteigerung ab. Der Einsatz von Ansätzen des MBSE vermag hier Nutzen zu stiften. Er ermöglicht die Komplexitätsbeherrschung der Anlage mit Blick auf die Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Ressource. Er ermöglicht die Integration der Zulieferer einer Komponente oder eines Produktionssystems, dem Planer einer Anlage sowie dem Betreiber und weiteren Beteiligten. MBSE erlaubt die Umsetzung des für die Industrie 4.0 notwendigen **durchgängigen Engineering**, das die Verknüpfung der Entwicklungsartefakte propagiert [DGK+15].

Für den Anwender des MBSE-Ansatzes im Kontext von Produktionsanlagen stellt sich jedoch die Frage, wie dieser konkret eingesetzt wird. Etablierte Ansätze fokussieren die Entwicklung von Produkten. Demgegenüber gilt es für Produktionsanlagen, die Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und die sie realisierenden Produktionsressourcen zu berücksichtigen. Der Modellierungsansatz unterscheidet sich also von dem für

---

<sup>2</sup> In diesem Text wird die maskuline Form verwendet und zwar ausschließlich wegen der einfachen Lesbarkeit. Wenn beispielsweise von Entwicklern oder Ingenieuren die Rede ist, sind selbstverständlich auch Entwicklerinnen und Ingenieurinnen gemeint.

konventionelle technische Systeme. Auch das spezifische Entwicklungsvorgehen und die beteiligten Stakeholder sind zu berücksichtigen. Die prozessgetriebene Planung von Produktionsanlagen bedarf spezifischer Modellierungsansätze im MBSE.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Digitalisierung auch im Bereich der Produktion faszinierende Potentiale bietet. Die Vision der Industrie 4.0 ist eine intelligente, effiziente und flexible Produktion. Für Planung und Betrieb solcher zukünftigen Produktionsanlagen gilt es, die Komplexitäten zu beherrschen und Ansätze des MBSE umzusetzen. Die konkrete Anwendung im Kontext der Industrie 4.0 ist jedoch unklar. Es besteht daher **Bedarf** aufzuzeigen, wie MBSE für die Planung flexibler Produktionsanlagen angewandt werden kann.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering*. Damit sollen Entwicklung und Betrieb komplexer Produktionsanlagen unterstützt werden. Im Zusammenhang mit der Anwendung von MBSE in diesem Kontext stellen sich drei zentrale **Forschungsfragen**:

- Aus welchen **Aspekten** besteht ein **Systemmodell** für Produktionsanlagen? Produktionsanlagen sind insb. durch die Abhängigkeiten zwischen dem zu produzierenden Produkt und seinen Varianten, den entsprechenden Prozessen und den Produktionsressourcen geprägt. Es gilt zu klären, welche Aspekte für ein Systemmodell relevant sind und wie diese Aspekte miteinander in Beziehung stehen.
- Mit welchen sprachlichen Mitteln erfolgt die **Modellierung** und wie kann eine entsprechende **werkzeugtechnische Unterstützung** umgesetzt werden? Für die Modellierung der Aspekte des Systemmodells muss dem Anwender eine entsprechende Modellierungssprache an die Hand gegeben werden. Die Frage ist, welche Modellelemente benötigt werden und wie diese miteinander verknüpft werden können. Ferner ist zu eruieren, mit welchem (Software-)Werkzeug der Anwender die Modellierung vornehmen kann.
- Wie wird ein solches Systemmodell **methodisch** aufgebaut? Anders als bei konventionellen mechatronischen Systemen, wird bei der Planung von Produktionsanlagen prozessgetrieben vorgegangen. Die Frage ist, wie ein dediziertes Vorgehen zum Modellaufbau gestaltet sein sollte und wie es die konkrete Planungs- und Entwicklungsarbeit unterstützen kann.

## 1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird eine **Problemanalyse** vorgenommen. Dazu werden zunächst einige zentrale Begriffe geklärt. Anschließend werden die derzeitigen Veränderungen in der Produktion hin zur Industrie 4.0 erläutert und analysiert. Dabei werden insb.

Voraussetzungen und Charakteristika fokussiert. Anschließend werden Aufbau und Funktionsweise von produzierenden Unternehmen beschrieben. Dies bildet die Grundlage zur Analyse der Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die zukünftigen Tätigkeiten und Aufgaben in produzierenden Unternehmen. Besonders betroffen ist dabei die Arbeitsvorbereitung. Diese Prozesse werden im Zusammenhang mit der Planung flexibler Produktionsanlagen näher analysiert. Im Anschluss daran wird das Model-Based Systems Engineering als zukünftiges Entwicklungsparadigma vorgestellt, das auch für die Planung von Produktionsanlagen Nutzen verspricht. Danach wird eine Problemabgrenzung vorgenommen. Das Kapitel schließt mit der Herleitung der Anforderungen an die Arbeit.

**Kapitel 3** stellt den **Stand der Technik** vor. Dabei stehen die Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung im Zentrum. Sie lassen sich in Sprachkonzepte und Methoden differenzieren. Darüber hinaus werden Methoden des MBSE vorgestellt. Diese zielen zwar primär auf konventionelle mechatronische Systeme, lassen sich jedoch stellenweise auch auf Produktionsanlagen übertragen. Schließlich werden Ansätze der Prozessbeschreibung analysiert. Diese Ansätze liefern Impulse zur Modellierung von Produktionsanlagen. Das Kapitel schließt mit dem Abgleich der hergeleiteten Anforderungen. Daraus wird der resultierende Handlungsbedarf für das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept abgeleitet.

Den Kern der Arbeit bildet **Kapitel 4**. Hier wird die **Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im MBSE** vorgestellt. Ausgangspunkt ist ein Überblick über das Konzept, das aus drei wesentlichen Bestandteilen besteht. Die Grundlage bildet ein MBSE-Modellierungskonzept, das die für das Systemmodell benötigten Modellelemente definiert und ebenfalls die anzuwendenden Diagramme und Sichten benennt. Darauf aufbauend wird ein Vorgehensmodell zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im MBSE vorgestellt. Die Systematik beinhaltet daneben eine prototypisch implementierte Werkzeugunterstützung und basiert auf einem SysML-Profil.

Die **Validierung** der Arbeit wird in **Kapitel 5** beschrieben. Das Konzept wird anhand des Beispiels einer industriellen Großwäscherei zur Anwendung gebracht. Eine industrielle Wäscherei ist mit anderen typischen Produktionsanlagen vergleichbar, da auch hier die Durchführung von (Wasch-)Prozessen zentral ist. Abschließend werden die abgeleiteten Anforderungen mit dem vorgestellten Konzept abgeglichen.

In **Kapitel 6** werden die Inhalte der Arbeit zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben. Der **Anhang** umfasst ergänzende Informationen und Inhalte, insb. zu den Modellen des Validierungsbeispiels.

## 2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen mit Model-Based Systems Engineering*. Hierzu werden in Kapitel 2.1 zunächst einige Begriffsbestimmungen vorgenommen. Planer und Betreiber von Produktionsanlagen sind mit den Potentialen und Herausforderungen der Industrie 4.0 konfrontiert. Diese werden in Kapitel 2.2 thematisiert. Die Grundlage bilden Cyber-Physical Systems, die eine Smart Factory ermöglichen, aber auch neue Ansätze des Engineerings erfordern. In Kapitel 2.3 wird dann die Industrielle Produktion erläutert, um die vorliegende Arbeit in das Themengebiet einordnen zu können. Kapitel 2.4 fokussiert die Planung flexibler Produktionssysteme. Hier werden die Prozesse der Arbeitsvorbereitung und Anlagenplanung erläutert sowie flexible Produktionssysteme charakterisiert. Model-Based Systems Engineering ist ein Entwicklungsparadigma, das zum disziplinübergreifenden Engineering von Systemen der Industrie 4.0 notwendig ist. Es wird in Kapitel 2.5 vorgestellt. Die Problemanalyse schließt mit einer Problemabgrenzung ab (Kap. 2.6), woraus sich die Anforderungen an die Arbeit in Kapitel 2.7 ergeben.

### 2.1 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden einige für die vorliegende Arbeit zentrale Begriffe charakterisiert. Diese sollen auch gegen verwandte Begriffe oder Konzepte abgegrenzt werden, um ein einheitliches Begriffsverständnis im Rahmen dieser Arbeit sicherzustellen.

#### System

Der Begriff System wird in der Wissenschaft sowie im Alltag in unterschiedlichen Kontexten genutzt und verstanden. Die DIN 25424 definiert:

*„Ein System ist die Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes“ [DIN25424].*

Wird diese noch recht allgemein gehaltene Definition auf technische Erzeugnisse bezogen, findet sich in der ISO 26262:

*„Ein System ist eine Menge von Elementen (Systemelementen), mindestens Sensoren, Verarbeitungseinheiten und Aktuatoren, die gemäß einem Entwurf in einer Beziehung stehen“<sup>3</sup> [ISO26262].*

Es wird damit klar, dass ein System sowohl aus physischen Bestandteilen als auch aus informationstechnischen oder technisch-organisatorischen Teilen bestehen kann. Es handelt sich damit um eine Menge von Elementen, die in Beziehung zu einander stehen und

---

<sup>3</sup> Übersetzung aus [Alt12]

die durch ihren gemeinsamen Zweck (Erfüllung eines Aufgabenkomplexes oder gemäß einem Entwurf) von anderen Elementen im Umfeld abzugrenzen sind. Diese Abgrenzung erfolgt durch die Definition der Systemgrenze. Bild 2-1 verdeutlicht dieses grundlegende Verständnis eines Systems.

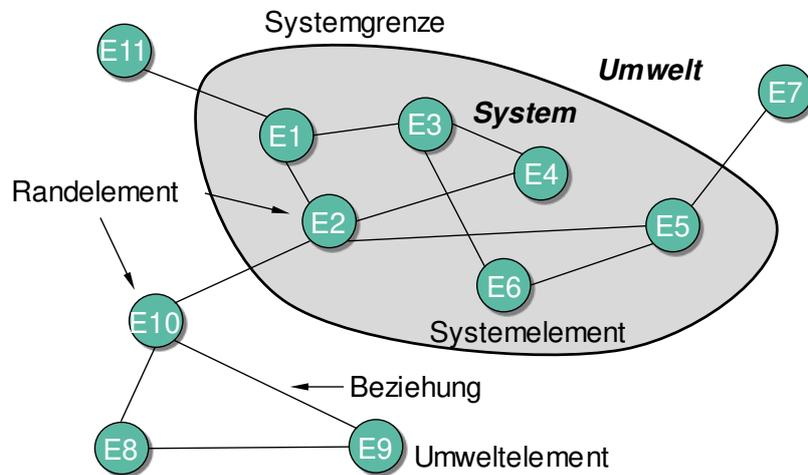


Bild 2-1: Bestandteile eines Systems und dessen Umfelds (nach [HWF+12])

Die konkrete Definition eines betrachteten Systems hängt von spezifischen Rahmenbedingungen wie einer Entwicklungsaufgabe oder eines Einflussbereiches ab. Daher wird häufig der Begriff des **System-of-Interest** verwendet, der genau dieses Verständnis einer im Grundsatz willkürlichen Definition einer Systemgrenze impliziert.

Der Begriff System wird in dieser Arbeit insbesondere im Bereich der Produktion verwendet. Dabei werden unterschiedliche Abstraktionsniveaus eingenommen. Sowohl eine einzelne Produktionsmaschine als auch die Gesamtanlage oder die Wertschöpfungskette kann als System betrachtet werden, welches wiederum aus einzelnen Systemen bestehen kann.

### Produktion und Fertigung

Die **Produktion** wird in der Betriebswirtschaftslehre definiert als „Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte (Erzeugnisse, Output)“ [Gab16-01]. Übertragen auf den Ingenieursbereich definiert SPUR die Produktion als „ein vom Menschen organisierter Prozess der Wertschöpfung“ [Spu79, S.25]. Bild 2-2 zeigt die Hauptbereiche der Produktion, die sich in Energie-, Verfahrens- und Fertigungstechnik untergliedern lässt.

Die **Fertigung** zielt konkret auf geometrisch bestimmte materielle Güter, die in einem diskreten Prozess hergestellt werden [Dan03, S.49], [DIN8580, S.4]. Dieser Prozess kann in zwei Ausprägungen differenziert werden: Teilefertigung und Montage [War93, S.1].

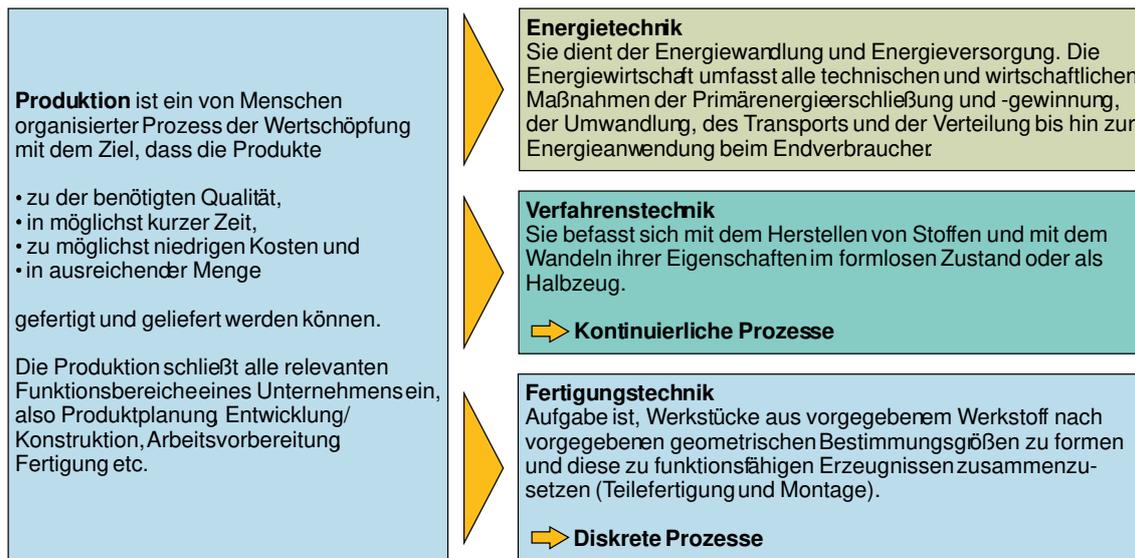


Bild 2-2: Die drei Hauptbereiche der Produktion nach SPUR [Spu79] (Abbildung nach [GP14, S.16])

Der Begriff der Produktion lässt sich also weitreichender verstehen. Er bezieht sich auf einen Wertschöpfungsprozess, dessen Ergebnis ein Produkt ist. Als Bestandteil dieses Prozesses kann die Fertigung angesehen werden, in der materielle Teile hergestellt werden.

### Produktionssystem und Produktionsanlage

Dem beschriebenen Verständnis eines Systems folgend, kann auch die Produktion eines Industrieunternehmens als System verstanden werden. Nach REFA<sup>4</sup> erfolgt „die Abgrenzung des zu betrachtenden Produktionssystems gegenüber benachbarten [...] unabhängig von der Systemgröße durch die Festlegung der Eingaben, Beschreibung der Ausgaben und die Beschreibung der Arbeitsaufgabe“ [Ref90, S.103]. Abhängig von der gesetzten Systemgrenze kann ein Produktionssystem demnach ein einzelner Arbeitsplatz, ein Mehrmaschinensystem oder ein ganzer Produktionsbetrieb sein [Eve96, S.4]. Komplexe Produktionssysteme lassen sich in drei technische Teilsysteme unterteilen: Bearbeitungs-Montagesystem; Materialflusssystem; Informationssystem“ [Ref90, S.41f.].

Ergänzend zum Begriff des Produktionssystems soll an dieser Stelle auch das Verständnis einer Produktionsanlage diskutiert werden. Eine technische Anlage ist „die Gesamtheit der technischen Einrichtungen zur Durchführung von technischen Prozessen“ [DIN60050].

*„Unter einer Produktionsanlage wird die Gesamtheit der technischen Einrichtungen verstanden, die in einer definierten Art und Weise auf*

<sup>4</sup> REFA – Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung ist ein im Themengebiet prägender Verein, der sich für Definitionen, Methodenentwicklung aber auch Weiterbildung engagiert.

*„einen technischen Prozess einwirken. Dieser Prozess dient der Stoffumwandlung und Stoffumformung, der Materialbearbeitung oder der Energieumwandlung.“ [Dom07].*

Der Begriff der Produktionsanlage wird also etwas weiter gefasst als der des Produktionssystems. Während ein Produktionssystem durch die Definition von Ein- und Ausgang charakterisiert ist, umfasst eine Produktionsanlage die Gesamtheit der einwirkenden Einrichtungen, also zum Beispiel die relevanten Einrichtungen an einem Produktionsstandort. Bild 2-3 veranschaulicht das Begriffsverständnis einer Produktionsanlage, die aus mehreren Produktionssystemen besteht. Letztere interagieren sowohl auf physischer als auch informationstechnischer Ebene untereinander. Die vorliegende Arbeit adressiert insbesondere Produktionsanlagen, die aus zahlreichen Produktionssystemen bestehen.

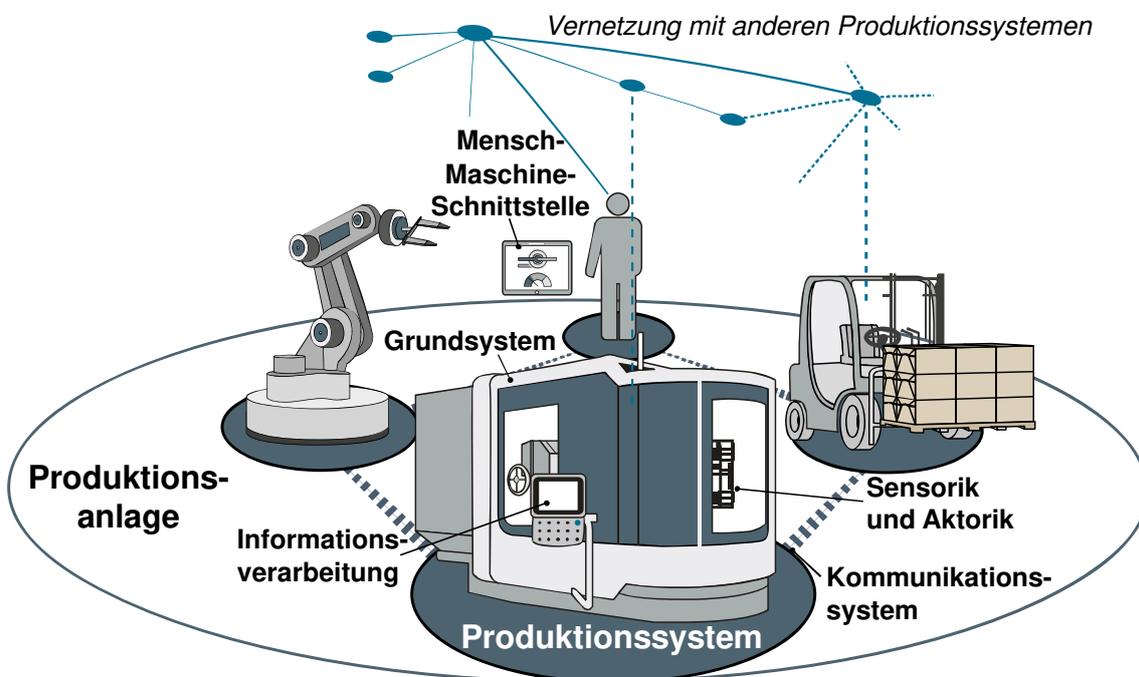


Bild 2-3: *Prinzipdarstellung von Produktionssystemen, die eine Produktionsanlage bilden [Wes17]*

## Modell

Für viele Tätigkeiten im Kontext einer Produkt- bzw. Systementwicklung werden Modelle herangezogen. Ein Modell zeichnet sich nach STACHOWIAK durch drei Aspekte aus [Sta73]:

1. **Abbildung:** Es handelt sich um die Abbildung oder Repräsentation eines natürlichen oder künstlichen Originals (wobei dieses Original selbst wiederum ein Modell sein kann).
2. **Verkürzung:** Der Modellschaffer reduziert das Modell auf die wesentlichen oder relevanten Merkmale und lässt andere aus.

3. **Pragmatismus:** Ein Modell ist für einen bestimmten Zweck vorgesehen und dementsprechend zugeschnitten: Es ist für bestimmte Subjekte gemacht, vorgesehen für bestimmte Zeitintervalle und eingeschränkt für eine gewisse physische oder gedankliche Anwendung bzw. Operation.

Entsprechend der jeweiligen Anwendung lassen sich verschiedene Arten von Modellen unterscheiden, wobei auch vor dem Hintergrund des vielfältigen Einsatzes von Modellen keine einheitliche Klassifizierung vorliegt. Im Kontext dieser Arbeit lassen sich im Bereich des Systems Engineerings zwei Arten von Modellen unterscheiden: Ausführbare bzw. ablauffähige Modelle und **deskriptive Modelle**. Letztere sind häufig das Mittel der Wahl bei der Anwendung der typischen Systems Engineering Aktivitäten. Die VDI-Richtlinie 4465 definiert:

*„Ein deskriptives Modell beschreibt den zu betrachtenden Untersuchungsgegenstand, ist aber nicht ablauffähig und damit automatisch auswertbar, sondern bedarf des Menschen zur Interpretation“  
[VDI4465].*

Deskriptive Modelle sind Ziel des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes. Der Fokus liegt nicht in der Erarbeitung ausführbarer Modelle, sondern darin, Zusammenhänge im Sinne des Model-Based Systems Engineering zu beschreiben. Durch eine rechnerinterne Repräsentation ist die Auswertbarkeit und Weiternutzung der Inhalte gesichert.

## 2.2 Veränderungen der Produktion hin zur Industrie 4.0

Der Bereich der Produktion ist derzeit mit Veränderungen konfrontiert, die unter dem Stichwort **Industrie 4.0** zusammengefasst werden. Der Begriff Industrie 4.0 wurde in Anlehnung an die derzeit stattfindende vierte industrielle Revolution geprägt (siehe [KLW11a]). Er steht für die neuen Möglichkeiten, die sich im Zuge der informationstechnischen Weiterentwicklung und deren Auswirkung auf die moderne industrielle Produktion ergeben. Das Bild 2-4 illustriert den Wandel in der industriellen Produktion.

Die Entwicklung der industriellen Produktion begann mit rein mechanischen Produktionsanlagen, gefolgt von der Massenfertigung und der Integration der Elektrotechnik. Der Einsatz von Elektronik zur Anlagensteuerung stellte eine weitere wesentliche Neuerung dar. Heutzutage ermöglicht der Stand der Informationstechnik, Systeme autonom handeln zu lassen oder sie mit Intelligenz auszustatten. Dies lässt sich auch auf Produktionssysteme übertragen [KWH12], [BVZ15].

Das Ziel dieser Entwicklung ist die intelligente Fabrik, die sich vor allem durch Flexibilität und Effizienz auszeichnet. Dies soll durch eine ausgeprägte Vernetzung sowohl innerhalb der Produktionsanlagen als auch über deren Grenzen hinweg erreicht werden. Auf der technologischen Grundlage von Cyber-Physical-Systems entstehen so intelligente Produktionssysteme [KWH12], [Bro10].

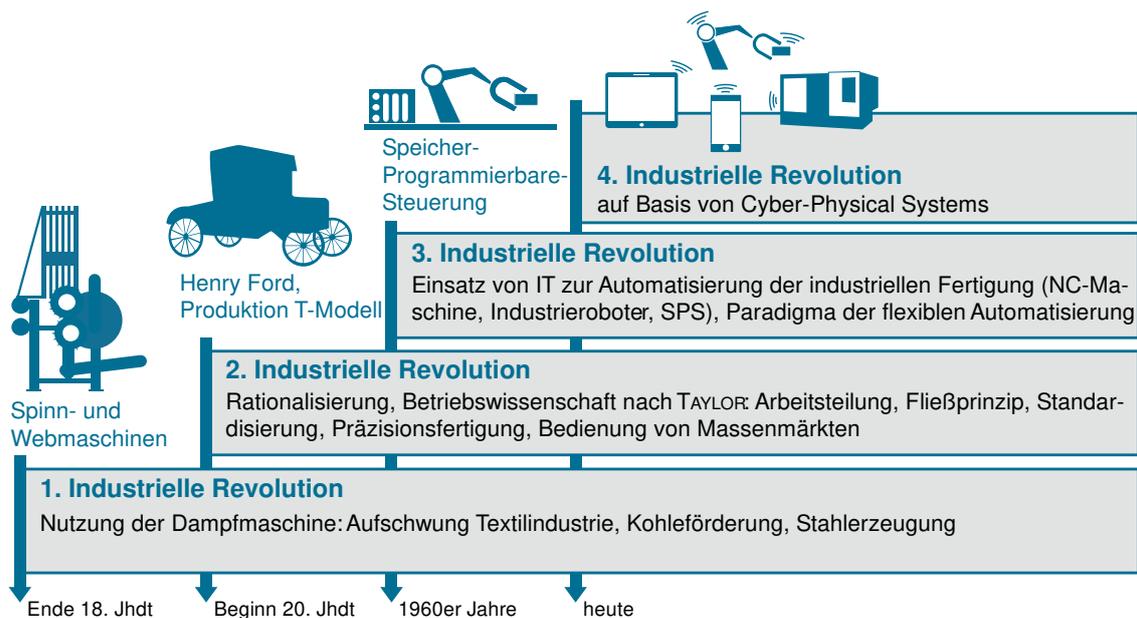


Bild 2-4 Vier Stufen der industriellen Revolution nach DFKI [KWH13, S.17], [Wes17]

Industrie 4.0 fußt auf drei wesentlichen Merkmalen: **Horizontale Integration** über Wertschöpfungsnetzwerke, digitale **Durchgängigkeit des Engineerings**<sup>5</sup> über die gesamte Wertschöpfungskette sowie **Vertikale Integration** [KWH13, S.24].

In den folgenden Abschnitten sollen Grundlagen und Gestaltung der Industrie 4.0 näher analysiert werden. Dazu werden in Abschnitt 2.2.1 Cyber-Physical Production Systems als die Grundlage der Industrie 4.0 beschrieben. Die darauffolgenden Abschnitte betrachten die horizontale und vertikale Integration, die Ziel der fortschreitenden Vernetzung sind (Abschnitt 2.2.2). In der Konsequenz entstehen intelligente Fabriken und Produkte. Voraussetzung für die Produktentstehung ist vor diesem Hintergrund das durchgängige Engineering bzw. das umfassende Systems Engineering, das die Verknüpfung der relevanten Informationen ermöglicht (Abschnitt 2.2.3).

## 2.2.1 Cyber-Physical Systems

Cyber-Physical Systems (CPS) sind technische Systeme, die sich durch ihre fortgeschrittene eingebettete Software sowie durch ihre Fähigkeit zur Vernetzung mit anderen Systemen auszeichnen [GB12, S.20]. Diese Systeme erfassen physikalische Daten mittels Sensoren und wirken mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge ein. Sie interagieren mit der physikalischen, aber auch in der digitalen Welt auf Grundlage von Daten, die sie speichern und auswerten. Sie sind mittels digitaler Netze (drahtlos oder drahtgebunden) untereinander verbunden und nutzen weltweit verfügbare Daten und Dienste. Sie

<sup>5</sup> DUMITRESCU et al. nennen an dieser Stelle das umfassende Systems Engineering als wesentliches Merkmal und stellen insb. auf MBSE ab [DGK+15, S.13].

verfügen außerdem über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen die ihnen die Kommunikation mit dem Umfeld ermöglichen [GB12].

Parallel zum Begriff CPS hat sich in der deutschsprachigen Literatur der Begriff des intelligenten technischen Systems (ITS) herausgebildet. Er verweist zwar nicht explizit auf die technologische Basis eingebetteter Systeme, kann aber in der Praxis als synonym angesehen werden. Bild 2-5 visualisiert den Aufbau eines intelligenten technischen Systems.

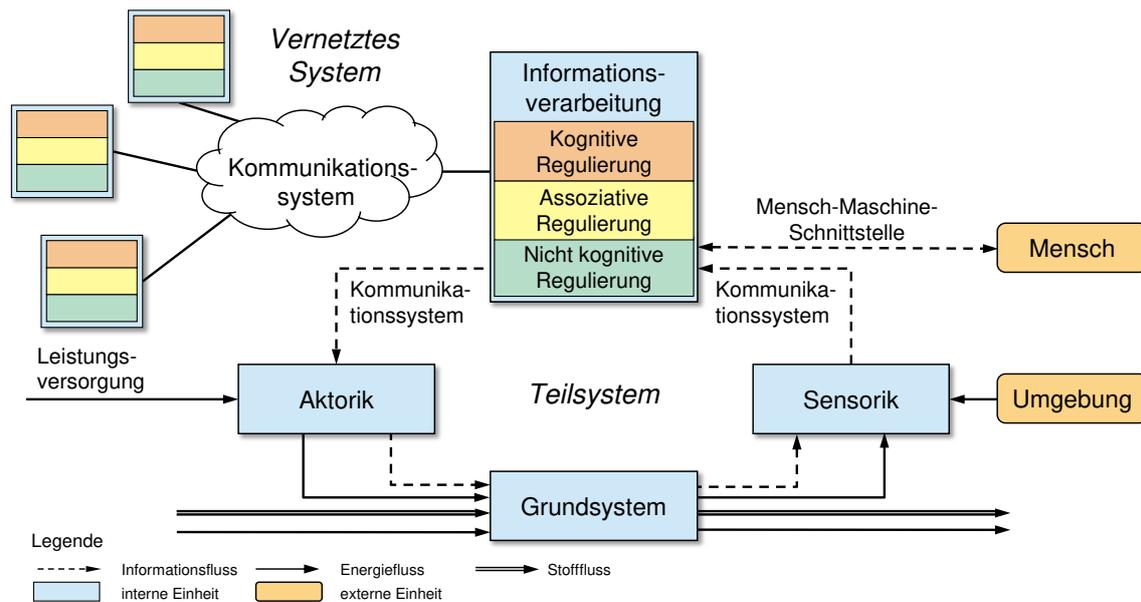


Bild 2-5: ITS-Technologiekonzept nach GAUSEMEIER et al. [DJG12]

Bestandteil eines ITS ist ein mechatronisches System (als Teilsystem). Die Interaktion mit der physischen Umgebung findet durch dieses mechatronische Teilsystem statt. Im Bereich der Informationsverarbeitung werden drei aufeinander aufbauende Ebenen unterschieden. Die nicht kognitive Regulierung ist für das dynamische Verhalten des Systems zuständig und genügt typischerweise Echtzeitbedingungen. Die assoziative Regulierung ist in der Lage, das Verhalten der nicht-kognitiven Regulierung zu verändern, indem es bspw. zwischen Betriebsmodi wechselt. Sie kann auch Ablaufsteuerungen oder Überwachungs- und Notfallprozesse übernehmen. Auf Ebene der kognitiven Regulierung wird kognitive Informationsverarbeitung umgesetzt, mit der bspw. Lernverfahren, Selbstoptimierung und ähnliche Funktionalitäten ermöglicht werden. Durch die Informationsverarbeitung erfolgt auch die Vernetzung mit anderen Systemen. So wird es für das intelligente technische System möglich, Daten zu laden oder auf Dienste zurückzugreifen und so das eigene Verhalten zu optimieren [DJG12].

Die möglichen Einsatzgebiete von CPS sind vielfältig. GEISBERGER und BROY beschreiben unterschiedliche Szenarien [GB12]: Im Bereich der Mobilität (Smart Mobility) können CPS umfassende Planungs- und Mobilitätsassistenten darstellen oder im Sinne autonomer Systeme die effiziente und sichere Fahrt gewährleisten. In der Anwendung im

Gesundheitsbereich (Smart Health) ist es möglich, Telemedizin bzw. Ferndiagnostik zu realisieren. Weitere Szenarien sind bspw. bei [GB12] zu finden.

In Zusammenhang mit Produktion ist in der Literatur auch der Begriff Cyber-Physical Production Systems (CPPS) geprägt worden. Er ist eine Erweiterung des Begriffs CPS und bringt den Einsatz von CPS in der Produktion zum Ausdruck [KWH12, S.28], [VBT17]. CPPS vermögen, in den zwei grundlegenden Prozessen eines produzierenden Unternehmens zu unterstützen: In der Auftragsabwicklung und in der Produkt- und Produktionsentstehung. In der Auftragsabwicklung können – auf Basis einer durchgängigen Vernetzung – Anforderungsänderungen noch während des Produktionsprozesses berücksichtigt werden. Auf Maschinenebene können CPPS bspw. durch die Bereitstellung einer Selbstbeschreibung oder die Fähigkeit der Selbstorganisation die Inbetriebnahme beschleunigen oder Flexibilität der Produktion ermöglichen [GB12, S.53 ff.], [Aca11, S.23].

Grundlage für solche Nutzenversprechen sind die horizontale und vertikale Integration. Die Integration der Wertschöpfungsketten wird im folgenden Abschnitt eingehender beschrieben.

### 2.2.2 Integration von Wertschöpfungsketten und Smart Factory

Eine der zentralen Eigenschaften von CPPS ist ihre Fähigkeit zur Vernetzung. Sie erlaubt ihnen zu kommunizieren und Informationen auszutauschen. Die Vernetzung von CPPS endet jedoch nicht an den Grenzen einer Produktionsanlage. Vielmehr ist eine viel breitere, weltweite Vernetzung der Anlagen, auch im Sinne einer ad-hoc Vernetzung, denkbar. Die Infrastruktur dafür liefert das Internet. Die Vision ist, dass Fabriken oder auch nur einzelne spezielle Produktionsanlagen, die freie Kapazitäten haben, ihre Kapazitäten der Öffentlichkeit anbieten. Von Seiten eines Entwicklers können für die Herstellung eines Produkts dann die optimalen Fertigungsstätten ausgewählt werden. Heutzutage funktioniert dies bereits stellenweise in, räumlich auf wenige Ortschaften begrenzten, Clustern kleiner und mittelständischer Unternehmen. Die Kommunikation ist dabei durch den persönlichen Kontakt geprägt. In Zukunft kann auf ein globales Netzwerk von Anbietern zugegriffen werden, die Dienstleistungen, Ressourcen, Logistik oder Material anbieten. Für den Entwickler bedeutet das, stets die Möglichkeit zu haben, ein Produkt mit den gewünschten Fertigungsverfahren herstellen zu können. Für Produktionsanlagen ergibt sich der Vorteil, eine konstantere Auslastung erreichen zu können. Dies ist vor allem für sehr spezialisierte Verfahren oder Anlagen interessant, deren Kunden für gewöhnlich nur geringe Stückzahlen nachfragen und die deshalb auf einen großen Kundenkreis angewiesen sind [KLW11a], [KHW12], [VBT17].

#### Horizontale und vertikale Integration

Die **horizontale Integration** bezeichnet die Verknüpfung von Ressourcen über das Wertschöpfungsnetzwerk hinweg. Die verschiedenen Partner vernetzen ihre Eingangslogistik,

Produktion, Ausgangslogistik, Service usw. zu einer durchgängigen Kette. So kann der Produktionsprozess ausgehend von der Bestellung des Endkunden flexibel und bedarfsgerecht ausgeführt werden. Die wertschöpfenden Partner verhandeln dabei in vielfältigen Dimensionen wie Qualität, Zeit, Risiko, Robustheit, Preis etc. [KWH12, S.16].

Ziel der **vertikalen Integration** ist die digitale Durchgängigkeit von Actor- und Sensorsignalen über die verschiedenen Ebenen hinweg bis zur ERP-Ebene. Einzelne Produktionsressourcen sind modular und können in verschiedenen Kontexten eingesetzt und rekonfiguriert werden [KWH12, S.25 f.]. Bild 2-6 visualisiert das Prinzip der horizontalen und vertikalen Integration als zwei der drei übergeordneten Aspekte der Industrie 4.0 (der dritte Aspekt wird in Abschnitt 2.2.3 erläutert).

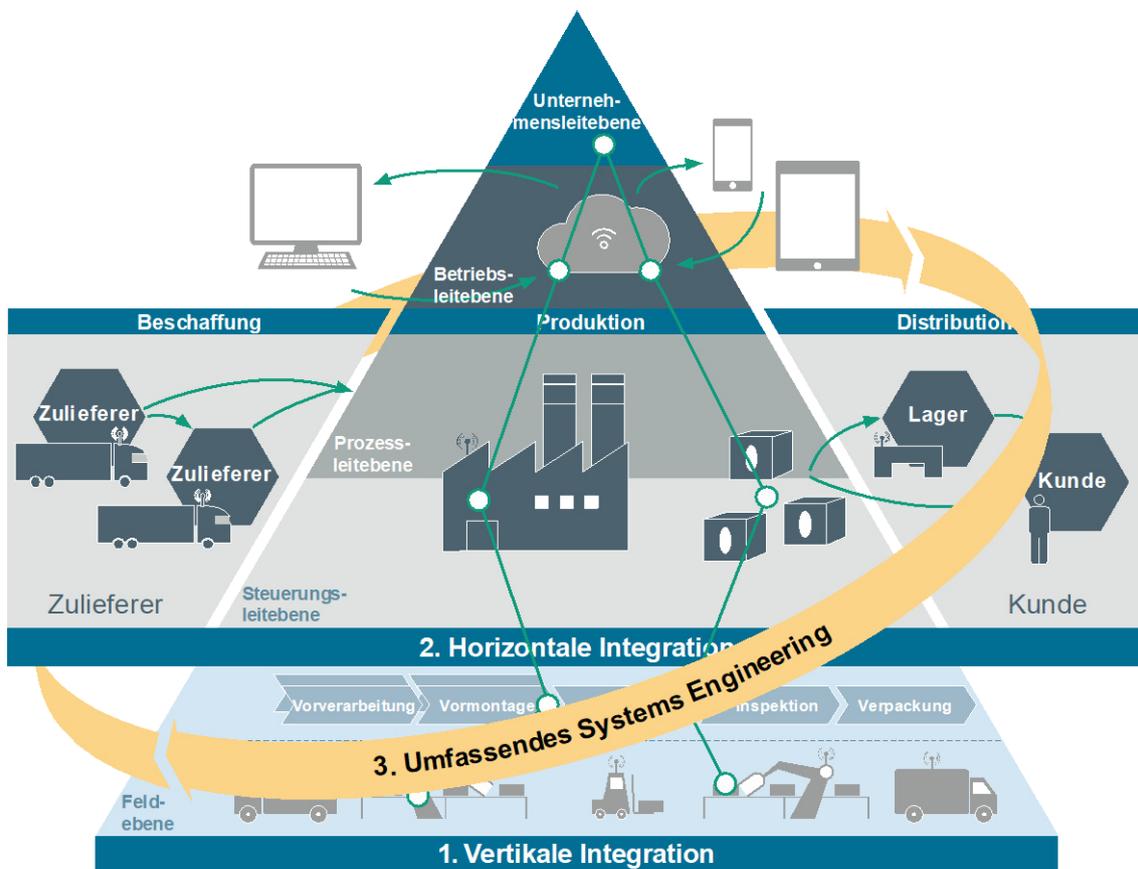


Bild 2-6: Drei übergeordnete Aspekte von Industrie 4.0 [DGK+15, S.15]

### Smart Factory und Smart Produkt

In einer intelligenten Produktionsanlage, auch **Smart Factory** genannt, sind alle Fertigungsstätten vernetzt und die einzelnen Produktionsressourcen, also Produktionsmaschinen, Förder- und Lagersysteme usw. handeln autonom. Die autonomen Produktionsressourcen können sich selbstständig konfigurieren und bspw. optimale Betriebsparameter selbstständig erlernen oder Bearbeitungsprogramme für bestimmte Produkte herunterladen. Darüber hinaus ermöglicht die Vernetzung z.B. das Darstellen der momentanen Auslastung der Produktionsressourcen. Sie erlaubt auch eine Kapazitäts- und Ablaufsteuerung

in Echtzeit. Zudem lässt sich die Produktion besser planen, simulieren und optimieren. Werden dadurch Durchlaufzeiten und Bestände verkürzt, erhöht das die Effizienz der Anlage. Gibt es Störungen, können Produktionsströme optimal umgeleitet werden, wodurch die Anlage robuster gegen Störeinflüsse wird [KWH12], [Kag12], [KLW11].

Das Gegenstück einer intelligenten Fabrik ist das **intelligente Produkt** (Smart Product). Es ist jederzeit eindeutig identifizierbar und kennt seinen aktuellen Zustand, seine Historie und seine Bestimmung. Auf dieser Grundlage kann es sich seinen Weg durch die Anlage suchen und dabei alternative Wege abwägen, um den schnellsten oder effizientesten Weg zu finden. Die eindeutige Identifikation eines solchen intelligenten Produkts wird z.B. mit RFID-Chips möglich, die dann jedes Produkt mit sich führt. Das hergestellte Produkt steuert somit die Produktion selbst und löst bei Störungen die entsprechenden Gegenmaßnahmen aus. Fällt bspw. eine Maschine aus oder kommt es zu Verzögerungen an bestimmten Stellen, sucht sich das Produkt selbstständig den optimalen Weg [KWH12], [Kag12], [KLW11].

### 2.2.3 Durchgängiges Engineering

An die Entwicklung zukünftiger Produkte werden im Kontext der Industrie 4.0 neue Anforderungen gestellt. Der Begriff des Engineerings bezieht sich hierbei nicht ausschließlich auf die Produktentwicklung. Weitere essentielle Phasen des Engineerings sind die Produktionsplanung, Serviceplanung, Logistikplanung und End-of-Life-Planung. Das Systems Engineering wird dabei in einer Studie von ABRAMOVICI und HERZOG als die zukünftig wichtigste Engineering-Kompetenz angesehen [AH16, S.23]. GAUSEMEIER et al. konkretisieren dieses Verständnis, indem sie das durchgängige Systems Engineering hervorheben [DGK+15]. Auch KAGERMANN et al. betonen, dass Industrie 4.0 ein durchgängiges Engineering (Seamless Engineering) benötigt. Es erstreckt sich von Produktdesign und -entwicklung über die Produktionsplanung, das Produktionsengineering bis schließlich zu Produktion und Service. Konkret gilt es, die folgenden Aspekte zu adressieren [KWH12]:

**Co-Modellierung – Bidirektionale Modellierung der realen und virtuellen Produktion:** Modelle werden gebildet als Planungsmodelle der virtuellen Produktion oder als Erklärungsmodelle der realen Produktion. Planungsmodelle ermöglichen es, die Wertschöpfung von Ingenieuren transparent zu machen und sind damit die Grundlage, komplexe Systeme überhaupt zu erstellen. Erklärungsmodelle helfen, komplexe Systeme zu analysieren und Design-Entscheidungen zu validieren. Im Sinne der Co-Modellierung ist es notwendig, die genannten Modellierungsansätze zu integrieren und Abhängigkeiten zwischen ihnen zu berücksichtigen [KWH12, S.33].

**Entwicklungsmethodik zur disziplinübergreifenden Zusammenarbeit:** Die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von CPS – sowohl firmenintern als auch über die Firmengrenzen hinweg. Modelle sind dabei bereits in der frühen Phase im Sinne eines geeigneten Frontloadings einzusetzen. Sie müssen

eine Informationsdurchgängigkeit ermöglichen, die auch Informationen aus Konstruktion, Simulation, virtueller Inbetriebnahme oder Dokumentenmanagement berücksichtigt [KWH12, S.33].

**Durchgängigkeit und Werkzeugunterstützung:** Im Einklang mit der beschriebenen interdisziplinären Entwicklungsarbeit bedarf es einer geeigneten Werkzeugunterstützung. Sie leistet eine Verknüpfung des Produkts, des Produktionsmittels sowie der beteiligten Prozessabläufe [KWH12, S.34].

Die Anwendung des durchgängigen Engineerings geschieht dabei auch vor dem Hintergrund, dass Neuplanungen gesamter Anlagen die Ausnahme darstellen. Vielmehr werden bestehende Anlagen sukzessive erweitert. Eine wesentliche Herausforderung ist, den Wert der installierten Basis aufrecht zu erhalten und gleichzeitig die Chancen der Industrie 4.0 zu erschließen [KWH12].

### **Digitaler Zwilling**

Ein weiteres Konzept, auf welches das durchgängige Engineering zielt, ist der Digitale Zwilling (auch: Digital Twin). Das Ziel dieses Konzepts ist, die Entwicklungsartefakte aus dem Produktentstehungsprozess zu einem einzigen Modell zu integrieren bzw. ein entsprechendes Modell bereits zur Entwicklungszeit zu erstellen. Dieses enthält dann alle wichtigen Informationen zum Produkt und kann als digitaler Zwilling verstanden werden. Zur Laufzeit des Produkts kann der digitale Zwilling mit Informationen aus dem Feld angereichert werden. Er stellt damit eine digitale Repräsentation des Produkts über dessen Lebenszyklus hinweg dar und kann fortlaufend für Tests, Simulationen, Optimierungen usw. genutzt werden. Bild 2-7 visualisiert dieses Verständnis [GS12], [Gri14].

Nach GRIEVES besteht das Konzept des digitalen Zwillings aus drei Bestandteilen: dem physischen Produkt, das sich in der realen Umgebung befindet, dem virtuellen Produkt, das sich in einer virtuellen Umgebung befindet sowie aus Verbindungen von Daten und Informationen, die das virtuelle und das reale Produkt miteinander verknüpfen [Gri14].

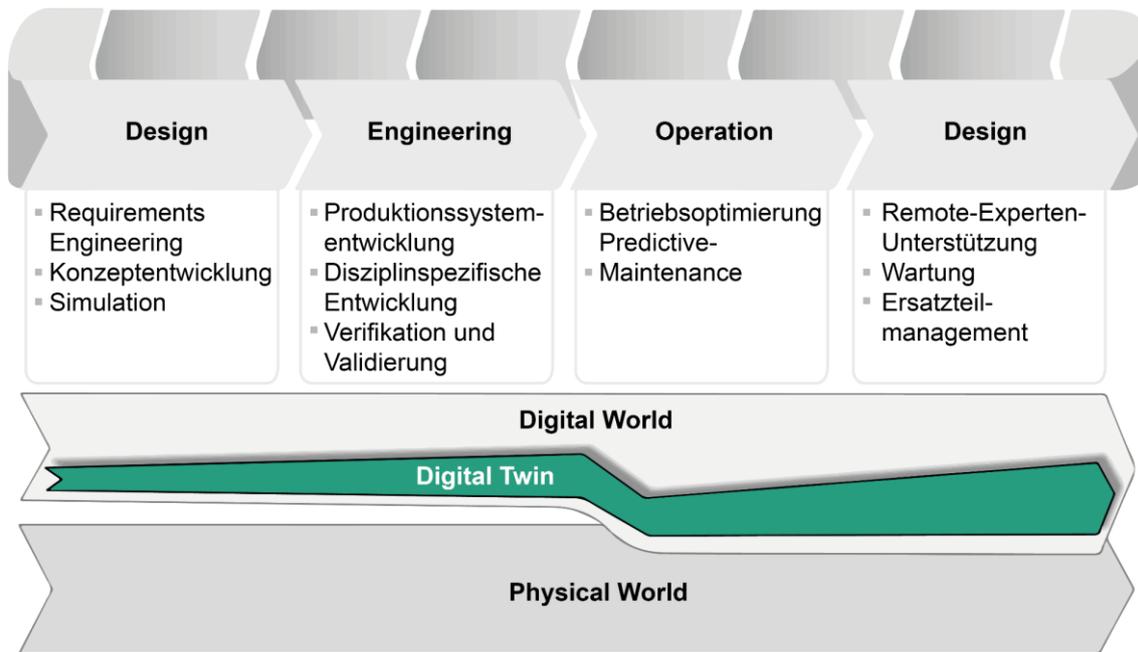


Bild 2-7: Einbindung des digitalen Zwillings in den PLZ

Das Konzept besteht also nicht einfach darin, ein digitales Abbild eines Produkts zu erstellen, sondern dieses über die Produktlaufzeit mit Informationen anzureichern und so Mehrwerte zu generieren. Diese können in unterschiedlichen Anwendungsfälle zutage treten. Mögliche Potentiale sind unter anderem:

- **Schnellere Auftragsabwicklung:** Mittels digitaler Produktrepräsentation können Prozesse rund um die Auftragsabwicklung automatisiert und effizienter gemacht werden. Bspw. können Bestellvorgänge auf Basis vollständiger Stücklisten automatisiert werden. Angebotsprozesse können durch die Verknüpfung von Konfigurations- und Entwicklungsdaten schneller und präziser gemacht werden.
- **Verringerung der Entwicklungszeit:** Techniken der Modellbildung und Simulation lassen sich über die verschiedenen Phasen der Produktentwicklung einsetzen – von der Entwicklung über den Test bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme. Dadurch lassen sich nicht nur kostenverursachende reale Prototypen vermeiden. Virtuelle Prototypen und Simulationsumgebungen sind in der Regel auch schneller erstellbar. Dies gilt nicht zuletzt, da Modelle wiederverwendet oder aus bereits bestehenden Entwicklungsdaten abgeleitet werden können.
- **Produktoptimierung:** Mit Hilfe von Informationen aus dem Feld und der Verknüpfung zum Produktmodell lassen sich Schwachstellen und Optimierungspotentiale des Produkts identifizieren. Genauso lässt sich identifizieren, welche Lösungen sich für bestimmte Anforderungsprofile und Anwendungen bewähren. So können Erkenntnisse systematisch gewonnen und in neue Entwicklungsprojekte eingebracht werden.

Das Konzept des digitalen Zwillings verspricht attraktive Nutzenpotentiale. Die konkrete Anwendung wird von der Abwägung von Aufwand und Nutzen abhängen. Es ist daher

nötig, das Konzept und den Modellaufbau in die Entwicklungsarbeit im Sinne des durchgängigen Engineerings zu integrieren.

#### **2.2.4 Fazit**

Im Bereich der Produktion bringt der Begriff der Industrie 4.0 die Möglichkeiten der fortschreitenden Digitalisierung zum Ausdruck. Industrie 4.0 zielt auf eine intelligente Wertschöpfungskette, die sich vor allem durch höchste Flexibilität und Effizienz auszeichnet. Dies soll durch eine Vernetzung intelligenter Produktionssysteme ermöglicht werden – sowohl innerhalb einer Fabrik als auch über deren Grenzen hinaus. Es entstehen sogenannte Cyber-Physical Production Systems (CPPS). Diese können sich bspw. selbstständig optimieren oder mit anderen Systemen autonom kommunizieren (Abschnitt 2.2.1). Sie bilden im Verbund die Smart Factory (intelligente Fabrik), die durchgehend vernetzt und horizontal sowie vertikal integriert ist. In ihr werden Fertigungsaufträge in optimaler Weise bearbeitet und auf Störungen ideal reagiert. Das entsprechende Pendant zur Smart Factory ist das Smart Product (intelligentes Produkt). Es kennt seinen aktuellen Zustand sowie seinen Zielzustand und ist in der Lage, einen individuellen Weg durch die Fabrik zu suchen, um den Zielzustand zu erreichen. Dabei verfolgt es eigene Strategien, die etwa qualitäts-, kosten- oder zeitoptimal sein können (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozessen und Produktionssystemen werden vielfältiger; die Interdisziplinarität nimmt zu. Es schwindet dabei die Übersicht des Einzelnen über die ablaufenden Prozesse, da die Produktionssysteme zukünftig autonom und flexibel agieren werden. Zukünftig ist ein durchgängiges Engineering gefordert, das alle relevanten Entwicklungsartefakte verknüpft. Um die disziplinübergreifende Entwicklungsarbeit zu ermöglichen muss Model-Based Systems Engineering eingesetzt werden. Auf Basis von Modellen können komplexe Systeme entwickelt werden (Abschnitt 2.2.3).

Es ist demnach notwendig, den Ansatz des durchgängigen Engineerings (insb. MBSE) im Bereich der industriellen Produktion anzuwenden. Im folgenden Kapitel werden daher Aufbau und Funktionsweise der industriellen Produktion beleuchtet.

### **2.3 Aufbau und Funktionsweise industrieller Produktion**

Die industrielle Produktion ist einer der wichtigsten Schwerpunkte unternehmerischer Wertschöpfung in Deutschland. In diesem Bereich betätigen sich Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektroindustrie oder der Automobilindustrie. Die drei Hauptgeschäftsprozesse von Industrieunternehmen sind die Auftragsabwicklung, die Produktion und die Produktentstehung [GP14].

In den folgenden Abschnitten soll das Handlungsfeld der industriellen Produktion näher beleuchtet werden. Zunächst wird in Abschnitt 2.3.1 die funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens erläutert. In Abschnitt 2.3.2 findet eine Einordnung der Arbeit in den Produktentstehungsprozess anhand des 3-Zyklen Modells statt. Anschließend

werden derzeitige und zukünftige Herausforderungen bei der Entwicklung von Produkten und ihren Produktionssystemen umrissen (Abschnitt 2.3.3).

### 2.3.1 Funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens

Produzierende Unternehmen lassen sich typischerweise in wesentliche Funktionsbereiche gliedern. Bild 2-8 zeigt eine funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens. Einige ausgewählte Funktionsbereiche werden im Folgenden kurz charakterisiert.

CAD: Computer Aided Design  
 CAE: Computer Aided Engineering  
 CAM: Computer Aided Manufacturing  
 CAP: Computer Aided Planning  
 CAQ: Computer Aided Quality

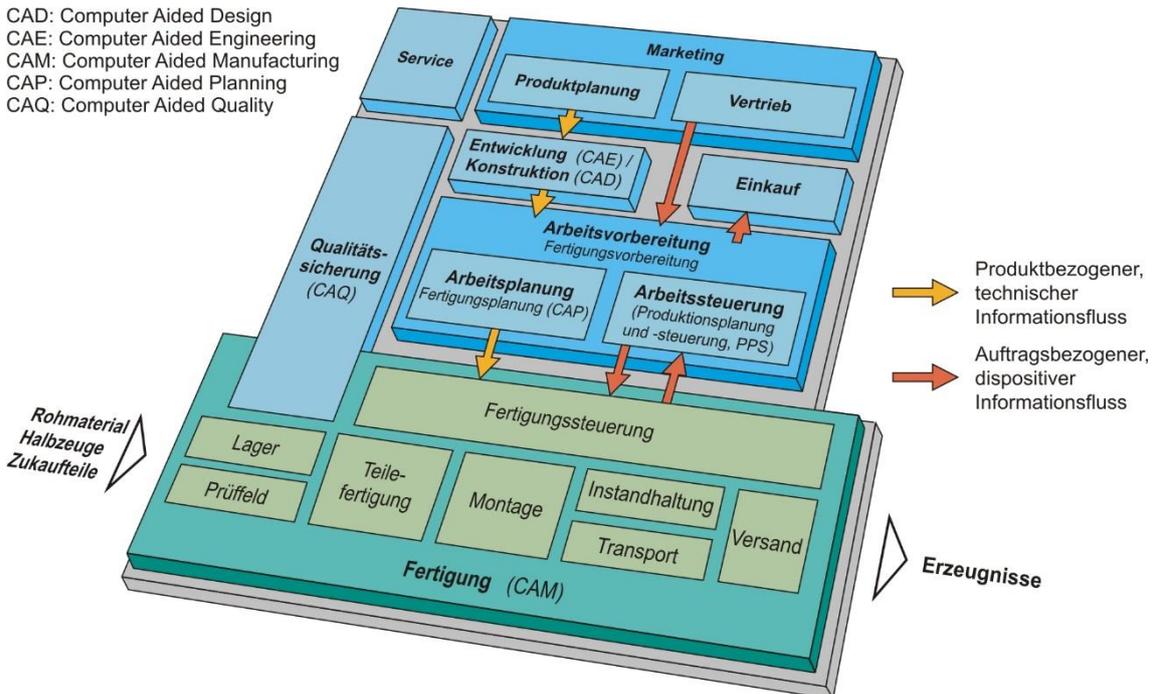


Bild 2-8: Funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens [GP14, S.17]

Der Bereich der **Produktplanung** plant neue Produkte bzw. Varianten oder Optionen. Dies wird mit einem entsprechenden Geschäftsplan in Einklang gebracht, um sicherzustellen, dass ein neues Produkt mit entsprechenden Stückzahlen gewinnbringend entwickelt und produziert werden kann [GP14].

In der **Entwicklung/Konstruktion** wird auf Basis der Produktplanung eine entsprechende Entwicklung und Ausarbeitung vorgenommen. Ergebnis sind bspw. Fertigungszeichnungen, Stücklisten etc. [GP14].

Die **Arbeitsvorbereitung** umfasst alle Maßnahmen, die zur Vorbereitung der Fertigung von Erzeugnissen erforderlich sind, dazu gehört insb. die Erstellung der erforderlichen Unterlagen und der Fertigungsmittel [AR68]. Der Bereich lässt sich weiter ausdifferenzieren. Die **Arbeitsplanung** klärt, auf welche Weise ein Produkt gefertigt wird. Dies umfasst bspw. die Festlegung auf bestimmte Werkstoffe, die Auswahl der Fertigungsmittel usw. Die **Arbeitssteuerung** übernimmt die Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsabläufe von der Angebotsbearbeitung bis zum Versand. Auf Grund der hohen

Bedeutung der Arbeitsvorbereitung für diese Arbeit wird hierauf in Abschnitt 2.4.1 gesondert eingegangen [GP14].

Die **Fertigung** stellt den eigentlichen Fabrik- oder Produktionsbetrieb dar. Hier werden, auf Basis der zuvor beschriebenen Informationen, die Teile des auszuliefernden Produkts gefertigt und montiert. Die **Fertigungssteuerung** koordiniert das Geschehen. Sie organisiert bspw. den Materialfluss und disponiert die von der Arbeitssteuerung erhaltenen Fertigungsaufträge auf die einzelnen Maschinen, Fertigungszellen usw. [GP14].

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Arbeitsvorbereitung. Sie bestimmt durch die Auswahl der Fertigungsmittel und der Definition der Produktionsabläufe die Gestaltung der Fertigung eines produzierenden Unternehmens. Dabei sind insb. die Schnittstellen zur operativ agierenden Fertigungssteuerung sowie zur Entwicklung/Konstruktion, die quasi als Anforderungsgeber auftritt, zu beachten. In den folgenden Abschnitten wird daher insb. das Zusammenspiel von Produkt- und Produktionssystementwicklung näher beleuchtet.

### 2.3.2 Das 4-Zyklen Modell der Produktentstehung

Das 4-Zyklen Modell der Produktentstehung veranschaulicht die wesentlichen Prozesse die auf dem Weg von einer Geschäftsidee bis hin zum Serienanlauf zu absolvieren sind. Wie Bild 2-9 veranschaulicht, können diese Prozesse als sich wiederholende Zyklen verstanden werden<sup>6</sup>, die verschiedene Schnittstellen zueinander aufweisen.

Der erste Zyklus ist der der **Strategischen Produktplanung**. Ausgehend von Erfolgspotentialen und zukünftigen Handlungsoptionen werden Produkt- und Dienstleistungsideen generiert. Um mit einer solche Idee auch einen Geschäftserfolg zu erzielen gilt es, Geschäfts- und Produktstrategie zu entwickeln. Die Produktkonzipierung bildet den Übergang zum zweiten Zyklus, der **Produktentwicklung**. Hier wird, ausgehend von der fachgebietsübergreifenden Produktkonzeption, das Produkt entworfen und ausgearbeitet und schließlich im Zuge der Integration verifiziert. Dabei spielt die Modellierung des Produkts eine große Rolle. Der dritte Zyklus adressiert die **Dienstleistungsentwicklung**. Ähnlich zur Produktentwicklung kann auch die Entwicklung von Dienstleistung in die Phasen Konzipierung, Planung und Integration differenziert werden. Schließlich wird im vierten Zyklus auch das zum Produkt zugehörige **Produktionssystem** entwickelt. Ausgehend von der Produktionssystemkonzipierung wird die Arbeitsplanung vorgenommen und das Produktionssystem verifiziert [GEA16].

---

<sup>6</sup> Auch wenn die nachfolgende Beschreibung der Zyklen der Übersichtlichkeit wegen ein sequentielles Vorgehen suggeriert, sei an dieser Stelle betont, dass die Zyklen durchaus iterativ durchlaufen werden.



Qualitätsansprüchen unterworfen. Dies erfordert eine zunehmende integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung.

Das enge Wechselspiel zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung ist deutlich geworden. Nicht nur die Produktentwicklung determiniert das Produktionssystem; auch anders herum beeinflussen Produktionssysteme und -technologien die Produktentwicklung. Vor dem Hintergrund, dass neu entwickelte Produkte häufig mit bereits bestehenden Produktionssystemen erzeugt werden und eine Neuplanung „auf der grünen Wiese“ nur in seltenen Fällen stattfindet, wird auch klar, wie bedeutsam die strategische Produktionssystemplanung für die erfolgreiche Produktentwicklung ist.

Der Planer und Betreiber eines Produktionssystems bzw. einer Anlage steht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Für ihn gilt es, die Produktion zu planen und zu steuern, neue Technologien zu erschließen und zu integrieren und nicht zuletzt die entstehenden Komplexitäten zu beherrschen. Seine drei Zielgrößen sind die vom Kunden geforderte Qualität (die robuste Produktionsprozesse erfordert), Geschwindigkeit (bei Innovationen, Anlauf der Anlage sowie Durchlaufzeiten von Produkten) sowie Herstellkosten [AR11].

### 2.3.3 Herausforderungen bei der Entwicklung von Produkten und ihren Produktionssystemen

In diesem Abschnitt werden Herausforderungen für produzierende und entwickelnde Unternehmen skizziert, die sich aus den derzeit zu beobachtenden Trends ergeben. Zu solchen Trends zählen die Digitalisierung, Individualisierung und Globalisierung, die Effekte auf angebotene Produkte, aber auch auf die dahinterliegenden Wertschöpfungssysteme haben. Vor allem liegt der Grund auch in den Entwicklungen der Industrie 4.0 (Kap. 2.1). Zu beobachten sind insb. zwei Herausforderungen, denen produzierende Unternehmen ausgesetzt sind: Eine Verkürzung des Produkt-Lebenszyklus und eine Zunahme der Komplexität (welche ihre Ursache in der Steigerung der Variantenzahl der System- und Anforderungskomplexität findet) [Kin05, S.1], [GDS+13, S.16 f].

Die genannten Herausforderungen werden im Folgenden kurz erläutert. Sie sind Ausgangsbasis für die in der Problemanalyse folgenden Unterkapitel, in denen das Vorgehen zur Planung flexibler Produktionssysteme näher untersucht und MBSE als notwendiges Engineering-Paradigma erläutert wird.

Die **Verkürzung des Produkt-Lebenszyklus**<sup>8</sup> (PLZ) setzt viele Unternehmen unter erhöhten Zugzwang. Sie werden zu kürzeren Entwicklungszeiten gezwungen, um mit den

---

<sup>8</sup> Der Begriff des Produktlebenszyklus (PLZ) bezieht sich auf die Betrachtung eines Produkts im Markt bzgl. der Absatzzahlen, des Umsatzes und des Gewinns. Der PLZ kann in typische Phasen eingeteilt werden und erstreckt sich von einer Einführungs- über eine Reife- bis zu einer Degenerationsphase [Zin03-ol], [GT12, S.48]. Stellenweise wird der Begriff aber auch aus einer technischen Sicht verwendet – z.B. in Verbindung mit PDM/PLM – und bezieht sich dann auf Phasen wie Entwicklung, Produktion, Wartung und Recycling eines Produkts (vgl. z.B. [GP14, S.370]).

Entwicklungen des Markts mitzuhalten. KINKEL kommt in einer Betrachtung der Jahre 1997 bis 2003 zu dem Ergebnis, dass es zwar bekannte Beispiele für eine Verkürzung des PLZ gebe; dies ließe sich aber nicht auf die Breite der industriellen Produktion (mit Blick auf die Metall- und Elektroindustrie) übertragen [Kin05]. Autoren in jüngerer Literatur zeigen dagegen, dass sich die PLZ in den letzten Jahren auf breiter Basis verkürzen (z.B. [KA15]). SCHÄFER differenziert in diesem Zusammenhang unterschiedliche Produkaspekte und stellt eine Beziehung zwischen F&E-Anteil und Innovations- bzw. Lebenszyklus her. Während Werkstoffinnovationen einen niedrigen F&E-Anteil aufweisen (10%) und damit auch einen längeren Innovationszyklus haben, ist dieser in der Elektromechanik deutlich größer (30%) und in der Software und Elektronik sehr hoch (60%) [Sch06 S.4 f]. Die korrespondierenden Innovationszyklen betragen bei Werkstoffen sieben bis zehn Jahre, in der Elektromechanik vier bis sechs und bei Software und Elektronik ein bis drei Jahre [Sch06]. Bezogen auf Produktionsanlagen bedeutet dies, dass sich Anlagenplaner und -betreiber häufiger auf neue Produkte einstellen müssen und zukünftige Auslastungen schwieriger zu prognostizieren sind. Steigender Wettbewerb erfordert dabei auch kürzere Planungs-, Inbetriebnahme- und Anlaufzeiten. Auch Iterationsschleifen oder ausgiebige Prototypentests sind zugunsten eines schnelleren SOPs (Start-Of-Production) zu vermeiden. Weitere Konsequenz dieser Entwicklung ist, dass Entwicklungsprozesse zunehmend parallel erfolgen müssen (vgl. bspw. Simultaneous Engineering [Alb94], [Ehr07]).

Unternehmen reagieren auf die Verkürzung des PLZ durch eine höhere **Variantevielfalt**. Sie ermöglicht eine Streckung des PLZ. Gleichzeitig können unterschiedliche Kundenbedürfnisse adressiert werden. Heutige Produkte des Maschinenbaus und verwandter Branchen sind durch die zunehmende Integration von Mechanik, Elektrotechnik, Software und Regelungstechnik geprägt [GTS14]. Für Industrieunternehmen bedeutet dies eine **Komplexitätssteigerung** in ihren Produkten und Produktionssystemen. Die Produkte weisen zunehmende Abhängigkeiten zwischen den Disziplinen auf. Die Folge ist eine Systemkomplexität, die es im Entwicklungsprozess zu beherrschen gilt. Die divergierenden Innovationszyklen der verschiedenen Domänen sorgen auch dafür, dass Entwicklungsprojekte flexibler gestaltet werden müssen. All dies wird auch auf Produktionssysteme reflektiert. Komplexität und Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem erfordern Kommunikation und Abstimmung (vgl. integrierte Produkt- und Produktionssystemplanung [GLL12]). Die Produktionssysteme und Wertschöpfungsnetze müssen – auch vor dem Hintergrund der Produktvertriebszahlen – häufiger auf neue Produkte eingestellt werden. Letztlich heißt dies für Betrieb und Planung der Produktionssysteme in einem Unternehmen, dass die planbare Auslastung der Produktionssysteme sinkt. Gleichzeitig, oder gerade deshalb, muss die Flexibilität der Anlagen hoch gehalten werden.

### 2.3.4 Fazit

Produzierende Unternehmen sind in miteinander verknüpfte Funktionsbereiche gegliedert. Diese Arbeit betrachtet insb. die Bereiche der Produktion und Arbeitsvorbereitung. Planung und Betrieb von Produktionsanlagen sind Kompetenzen, die die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen maßgeblich beeinflussen (Abschnitt 2.3.1). Auf Grund der großen Abhängigkeiten werden Produkt und Produktionssystem integrativ konzipiert und entwickelt. So können Entwicklungsarbeiten parallelisiert und die Zeit zur Markteinführung verkürzt werden (Abschnitt 2.3.2).

Als wichtige Trends in der industriellen Produktion lassen sich vor allem die zunehmende Variantenvielfalt von Produkten, deren kürzer werdende Release- und Innovationszyklen und die immer umfassendere Vernetzung von Produktionssystemen nennen. Die hohe Variantenvielfalt, sinkende Losgrößen und die sich technologisch schnell ändernden Produkte stellen immer höhere Anforderungen an die Produktion. Diesen Anforderungen muss die Produktion vor dem Hintergrund von Kostendruck und Qualitätsansprüchen genügen. Dabei sind die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem vielfältig. Die Entwicklung zu mechatronischen und intelligenten Produkten schafft interdisziplinäre Abhängigkeiten auf technischer sowie strategischer Ebene (Abschnitt 2.3.3).

Die in der Industrie 4.0 propagierte zukünftige Vernetzung intelligenter Produktionssysteme birgt die Chance, den genannten Herausforderungen zu begegnen [KWH12] (siehe Kap. 2.2). Der Planung der zukünftigen Produktionsanlagen kommt daher eine besondere Bedeutung bei. Es gilt für produzierende Unternehmen, flexible Produktionsanlagen zu planen und zu betreiben, die sich dadurch auszeichnen, dass sie einen hohen Variantenreichtum der zu fertigen Produkte abdecken und erweiterbar sind. Das folgende Kapitel fokussiert daher die Planung flexibler Produktionsanlagen.

## 2.4 Planung flexibler Produktionsanlagen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die steigenden Anforderungen an die Entwicklung von Produktionssystemen hergeleitet. Ziel dieses Kapitels ist es, die Prozesse der Produktionssystementwicklung näher zu beleuchten. Grundlage hierfür sind die Aktivitäten der Arbeitsvorbereitung (Abschnitt 2.4.1). In Abschnitt 2.4.2 wird dann die Planung von Produktionsanlagen beschrieben. Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind insb. flexible Produktionssysteme; auf die Charakterisierung solcher Systeme wird daher in Abschnitt 2.3.3 eingegangen.

### 2.4.1 Prozesse der Arbeitsvorbereitung

Die Arbeitsvorbereitung stellt das Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktion dar. Die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung sind die Planung, Steuerung und Überwachung der wirtschaftlichen Herstellung von Erzeugnissen [AR68]. Die Arbeitsvorbereitung lässt sich in die Bereiche Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung differenzieren.

Aufgabe der **Arbeitssteuerung** ist die termin-, kapazitäts- und mengenbezogene Planung und Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse. Inhaltlich ist dies den Kernaktivitäten der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) gleichzusetzen [Eve97], [SS12a]. Die Arbeitssteuerung regelt also den Ablauf der Tätigkeiten in der Fertigung im Rahmen der Auftragsabwicklung. Sie legt fest, wie viel, wann, wo und durch wen hergestellt wird [GP14].

Die **Arbeitsplanung** hingegen hat zum Inhalt, die Einzelprozesse der Fertigung und Montage zu gestalten. Die Aufgaben der Arbeitsplanung umfassen die Festlegung von Arbeitsvorgängen und geeigneten Arbeitsverfahren, die Materialflussplanung und die Kostenplanung. Die Arbeitsplanung beeinflusst aber auch die Investitionsplanung, die Personalplanung, die fertigungsgerechte Produktgestaltung oder die Frage nach Eigen- und Fremdfertigung [AR68], [Eve97], [Ref91]. Die Kernaktivitäten der Arbeitsplanung, nämlich die Arbeitsablaufplanung, die Arbeitsmittelplanung, die Arbeitsstättenplanung und die Materialflussplanung (auch: Produktionslogik) sollen im Folgenden näher analysiert werden.

### **Prozesse der Arbeitsplanung**

Die **Arbeitsablaufplanung** befasst sich mit der Erstellung von Arbeitsplänen für die zu fertigenden Produkte auf Basis von Fertigungszeichnung und Stücklisten. Dabei berücksichtigt sie den erwarteten Stückzahl- oder Losgrößenbereich [GP14].

Die **Arbeitsmittelplanung** ist zuständig für die Planung der Fertigungsmittel (Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge), die zur Durchführung der vorgesehenen Arbeitsvorgänge benötigt werden. Bei der Maschinenplanung werden technologische Kriterien wie Leistungsdaten oder Maschinenfähigkeit betrachtet. Hinzugezogen werden außerdem die zu fertigende Losgröße und natürlich die erforderliche Arbeitsfolge. Auf dieser Basis können den Arbeitsvorgängen geeignete Maschinen zugeordnet werden. Vorrichtungen dienen dazu, Werkstücke zu halten, zu spannen o.ä. Werkzeuge werden entsprechend ihrer Eignung für den auszuführenden Fertigungsschritt ausgewählt [Eve97], [GP14].

Im Rahmen der **Materialflussplanung** wird der gesamte Materialfluss des Betriebs – vom Wareneingang bis zum Versand – bestimmt. Hierfür wird ein Logistikkonzept erstellt, das den strategischen Zielen des Betriebs entspricht. Der Materialfluss selbst wird auf unterschiedlichen Ebenen geplant: Innerhalb der Branchenwertschöpfungskette gilt es, den Materialfluss vom Lieferanten und zum Kunden zu planen. Innerhalb des Fertigungsbetriebs wird zunächst der Fluss zwischen den Hauptbereichen definiert. Schließlich wird er über die Abteilungen oder Bereiche bis hin zu den einzelnen Arbeitsplätzen herunter gebrochen. Aufgabe der Materialflussplanung ist außerdem auch die Projektierung von Handhabungs- und Lagersystemen [Eve97], [GP14].

In der **Arbeitsstättenplanung** wird die Anordnung des Arbeitsplatzes bzw. des Fertigungssystems vor dem Hintergrund der baulichen Struktur der Gesamtanlage und des darin vorgesehenen Materialflusses erarbeitet. Zu den Kernaktivitäten der

Arbeitsstättenplanung gehören die folgenden Bereiche. Die Bebauungsplanung legt die Gebäudestruktur unter Berücksichtigung des Funktionszusammenhangs und des Flächenbedarfs fest. Die Anordnungsplanung konkretisiert die innerbetriebliche Struktur der Produktionsanlage sowie die Beziehung zwischen den einzelnen Produktions- bzw. Arbeitssystemen. Im Rahmen der Planung von Produktionslinien werden komplexe Fertigungssysteme, die sich etwa durch ihre Flexibilität auszeichnen, geplant. Außerdem umfasst die Arbeitsstättenplanung auch die Gestaltung der Arbeitsplätze. Hier werden Arbeitsplätze angeordnet oder gemäß ergonomischer Kriterien ausgelegt [Eve97], [GP14].

### Gestaltungsaufgaben in der PPS

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Produktionssystem- bzw. Anlagenplanung. Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist daher die Frage relevant, wie in der PPS<sup>9</sup> gestaltet wird. Bild 2-10 gibt einen Überblick über die Gestaltungsaufgaben und Gestaltungsstrategien der PPS bzw. der Arbeitsvorbereitung. Typische Gestaltungsaufgaben sind etwa die Reorganisation, Systemauswahl oder -konsolidierung. Für alle Gestaltungsaufgaben lassen sich typische Gestaltungsstrategien wie etwa Standardisierung, Optimierung oder Dezentralisierung identifizieren [Eve97], [Wie10], [SS12a].

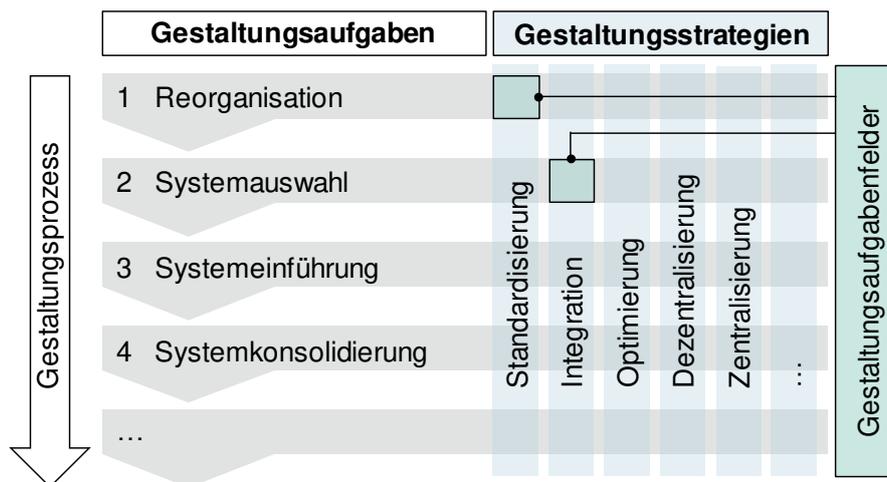


Bild 2-10: Gestaltungsaufgaben und -strategien der PPS [SS12a, S.298]

Die genannten Gestaltungsaufgaben werden nun kurz charakterisiert. Unter **Reorganisation** wird sowohl die organisatorische Anpassung als auch eine umfassende Veränderung der Organisationsstruktur verstanden. Dabei kommt der Philosophie des Lean Thinking eine besondere Bedeutung bei, bei der das Grundprinzip die Eliminierung von Verschwendung ist. Ziel der Reorganisation ist eine bessere Ausrichtung auf die Markt- bzw. Kundenanforderungen, z.B. durch die Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeiten, Erhöhung der Liefertermintreue oder Verbesserung der Kapazitätsauslastung [SS12a]. Bei der

<sup>9</sup> Die PPS umfasst prinzipiell dieselben Inhalte wie die Arbeitsvorbereitung, die Begriffe werden daher i.d.R. synonym verwendet [Pet88, S.50], [Eve97, S. 123].

**Systemauswahl** und **Systemeinführung** geht es vor allem um ERP-/ PPS-Systeme. Der Markt für solche Anwendungen ist sehr heterogen und dynamisch. Entscheidend ist daher neben der Kenntnis der verfügbaren Lösungen, ein Verständnis der derzeitigen und zukünftigen Abläufe sowie eine Zielsetzung, was mit einem entsprechenden System erreicht werden soll. Bei der **Konsolidierung** oder Harmonisierung ist z.B. die Integration verschiedener Geschäftsbereiche das Ziel. Entscheidend ist hierbei die Kenntnis über die Abhängigkeiten bei der Wertschöpfung. Beispielfhaft seien dazu gemeinsame Absatz- und Beschaffungsmärkte und die Nutzung gemeinsamer Ressourcen oder Lieferverknüpfungen genannt [SS12a], [LE98].

### 2.4.2 Planung von Produktionsanlagen

Die Planung von Produktionsanlagen erfolgt ausgehend von Produktinformationen, deren Detailgrad abhängig ist vom Gesamtfortschritt des Entwicklungsprojekts. Im Sinne einer parallelen Entwicklung wird idealerweise bereits auf Basis der Prinziplösung ein Anlagenkonzept erarbeitet (siehe [Nor12]). Während bei rein mechanischen Produkten die Gestalt des Produkts der entscheidende Aspekt ist, sind bei mechatronischen Produkten weitere Aspekte ins Kalkül zu ziehen. Beispielsweise ist die Art und Weise der Funktionsintegration in mechatronischen Modulen relevant, wenn Montage- und Prüfsequenzen festgelegt werden.

An dieser Stelle soll zunächst auf die systematische Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme eingegangen werden. Anschließend werden die Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Ressource analysiert. Außerdem werden die Beziehungen zwischen den an der Planung von Produktionsanlagen beteiligten Stakeholdern näher beleuchtet.

#### **Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme**

Der REFA definiert einen Leitfaden zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme. Es besteht aus sechs Phasen: Analyse der Ausgangssituation, Konkretisierung der Planungsaufgabe, Grobplanung des Produktionssystems, Feinplanung des Produktionssystems, Systemeinführung und Systembetrieb. Die Phasen bauen zwar aufeinander auf, sie sind prinzipiell aber iterativ zu durchlaufen, da die erarbeiteten Resultate auch Einflüsse auf vorangegangene Arbeitsinhalte haben können. Bild 2-11 veranschaulicht das Vorgehen.

Das Vorgehen beginnt mit der **Analyse der Ausgangssituation**. Zunächst wird das Projektteam gebildet. Die nächsten Schritte sind die Analyse des zu produzierenden Produktspektrums sowie der bestehenden Anlage. Als Ergebnis liegt eine Situationsbeschreibung vor, die die Ausgangsbasis für die folgenden Tätigkeiten bildet [Ref90].

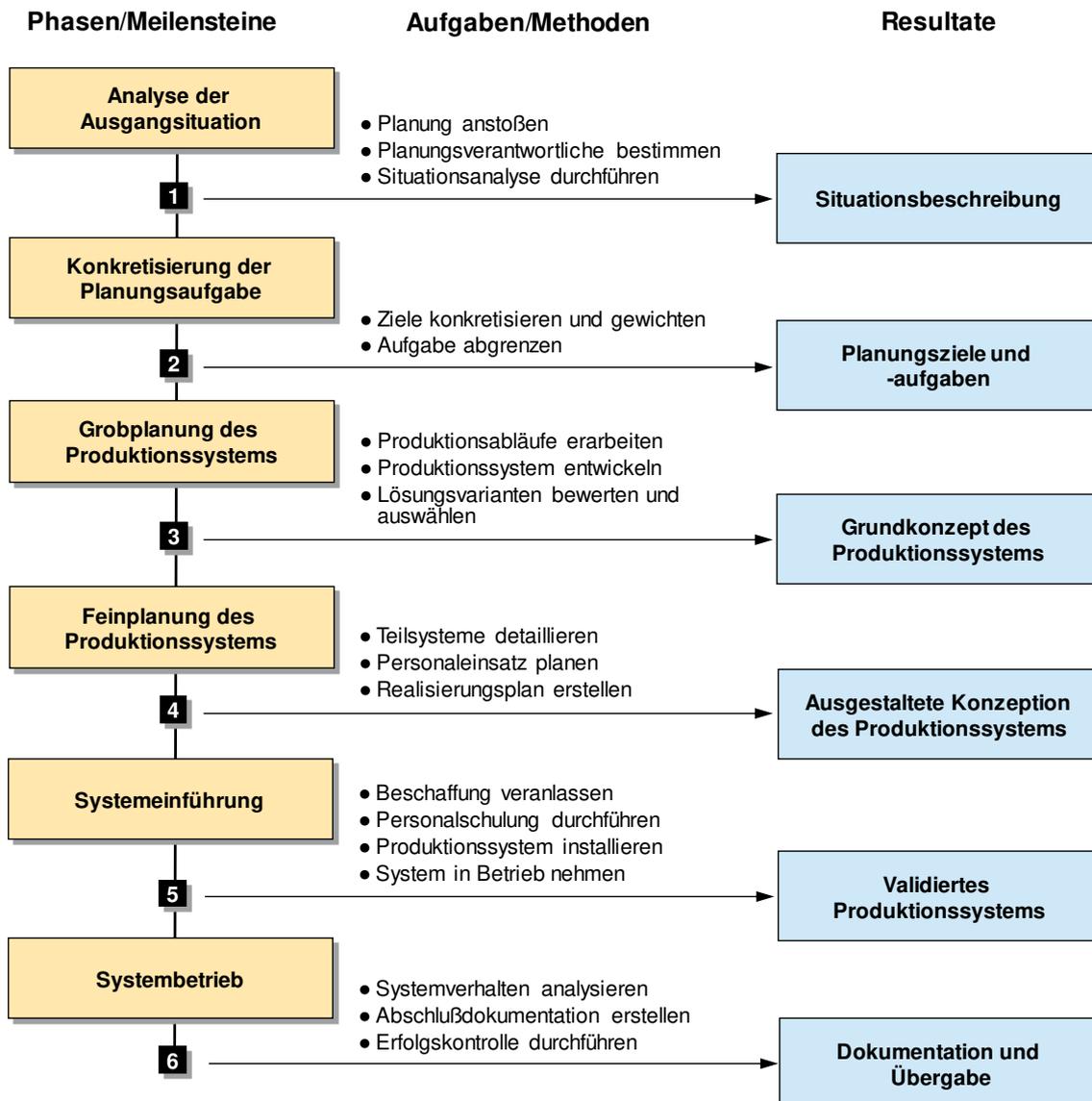


Bild 2-11: Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme nach REFA [Ref90, S.89]

In der **Konkretisierung der Planungsaufgaben** werden ausgehend von der Situationsbeschreibung die Ziele für das vorliegende Projekt definiert. Diese können quantitativer (häufig monetär) oder auch qualitativer Form sein. Sie betreffen Aspekte der Organisation, Technik, Kosten oder Personal. Darüber hinaus ist die Abgrenzung der Aufgabe Ziel dieser Phase. Dabei gilt es z.B. zu klären, was innerhalb aber auch außerhalb des Einflussbereichs des Projekts liegt. Es sind Schnittstellen und Randbedingungen zu klären [Ref90].

Als Nächstes folgt die **Grobplanung des Produktionssystems**. Hier wird zunächst der Produktionsablauf entwickelt und in Form einer Arbeitsvorgangsfolge beschrieben. Auf dieser Grundlage können verschiedene Lösungsvarianten für das Produktionssystem ermittelt werden. Ziel ist, dass jedem Arbeitsvorgang ein entsprechendes Betriebsmittel zugeordnet ist. Die erwarteten Stückzahlen bestimmen die nötigen Kapazitäten und die

Anzahl der benötigten Arbeitsstationen. Die abschließende Bewertung verschiedener möglicher Lösungen erfolgt vor dem Hintergrund technischer und wirtschaftlicher Kriterien [Ref90].

Im Zuge der **Feinplanung des Produktionssystems** erfolgt die Detaillierung des Grobkonzepts. Dazu werden die Arbeitsvorgänge in einzelne Arbeitsschritte untergliedert und eine Zeitplanung vorgenommen. Darauf aufbauend können die Betriebsmittel bzw. Teilsysteme konkretisiert und spezifiziert werden. Auf Ebene des Gesamtsystems müssen außerdem Materialfluss- und Informationssysteme für die einzelnen Arbeitsstationen ausgearbeitet werden. Schließlich kann der Personaleinsatz geplant und der Realisierungsplan erstellt werden. Hierunter fällt auch die Planung der Inbetriebnahme. Ergebnis dieser Phase ist die ausgestaltete Konzeption des Produktionssystems [Ref90].

Es folgt die **Systemeinführung**, bei der die Betriebsmittel beschafft und installiert werden. Dazu gehören auch notwendige Schulungen des Personals. In der Anlaufphase werden dann die Produktionsmengen nach und nach gesteigert und das Produktionssystem sukzessive optimiert [Ref90].

Zuletzt folgt der **Systembetrieb**. Das Systemverhalten wird analysiert und eine Erfolgskontrolle durchgeführt. Die Abschlussdokumentation wird erstellt und übergeben [Ref90].

### **Abhängigkeiten zwischen Produkt, Ressource und Prozess**

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem bereits betont. Im Rahmen der Produktionssystemplanung treten diese als Wechselspiel zwischen Produkt, Ressource<sup>10</sup> und Prozess zu Tage. FELDMANN et al. benennen typische Aspekte und Abhängigkeiten bei der Planung von Produktionssystemen (siehe Bild 2-12). Daraus ergeben sich im konkreten Planungsprozess entsprechende Fragestellungen [FSB+08].

Für die Herstellung eines Produkts werden Prozesse benötigt, die der Fertigung, Montage oder des Materialflusses dienen können. Bei der Auswahl geeigneter Prozesse kommt es z.B. auf die Prozesskosten oder die mit einem Prozess erzielbaren Produkteigenschaften an. Die Prozesse werden durch Ressourcen realisiert. Dabei handelt es sich um einzelne Produktionssysteme<sup>11</sup>. Bei der Auswahl geeigneter Ressourcen spielen Faktoren wie Zuverlässigkeit, Prozessgrenzen und Kosten eine Rolle. Ziel ist es letztlich, dass jedem Prozess eine sie realisierende Ressource zugeordnet ist. Die Auswahl einer Ressource hat aber auch direkten Einfluss auf das Produkt. Ressourcen müssen in der Lage sein, die geforderten Produkteigenschaften sicherzustellen. Erst durch die kombinierte

---

<sup>10</sup> Eine Ressource beschreibt in diesem Zusammenhang ein Betriebsmittel oder Subsystem eines Produktionssystems.

<sup>11</sup> Begriffsdefinition in Kap. 2.1

Betrachtung von Produkt und Ressource können Aussagen zur tatsächlichen Systemleistung oder -kosten gemacht werden [FSB+08].

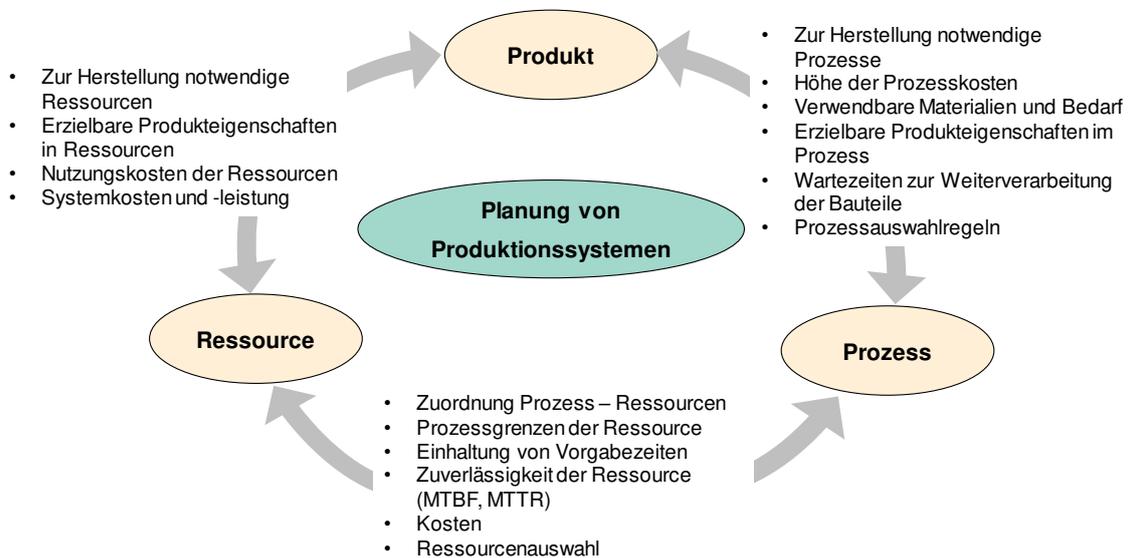


Bild 2-12: Grundlegende Aspekte und Abhängigkeiten bei der Planung von Produktionssystemen (nach FELDMANN et al. [FSB+08])

Somit wird deutlich, dass für die Planung von Produktionssystemen und Anlagen eine integrierte Betrachtung von Produkt, Ressource und Prozess erforderlich ist. Dies erfolgt vor dem Hintergrund verschiedener technischer Abhängigkeiten. So bestehen zum Beispiel geometrische Abhängigkeiten, die von der Gestalt des Produkts bzw. von dessen Einzelteilen herrühren. Werkstofftechnische Abhängigkeiten beeinflussen ebenfalls die Auswahl von Ressourcen. Auch mechatronische Abhängigkeiten ergeben sich, insb. in Zusammenhang mit Prüfprozessen.

### Wissensverluste zwischen Stakeholdern

Die Planung und Ausarbeitung von Anlagen erfordert die unmittelbare und mittelbare Einbeziehung verschiedenster Beteiligter. Diese sind häufig über verschiedene Unternehmen verteilt. Der Betreiber einer Anlage übernimmt typischerweise die Arbeitsplanung. Sein Ziel ist die Abarbeitung der eingehenden Aufträge. Der Anlagenplaner entwickelt das Anlagenkonzept. Er bestimmt bspw. das Layout der Anlage und wählt Teilsysteme aus. Diese Teilsysteme werden von Dritten entwickelt, ggf. unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Anforderungen. Die eigentliche Entwicklung der Anlagenkomponenten findet dann in den Entwicklungsabteilungen der jeweiligen Maschinen- und Anlagenbauern statt.

Die Entwicklungsarbeit wird zwischen vielen verschiedenen Disziplinen aufgeteilt und durch externe Vertragspartner durchgeführt [VDF+14]. Der Informationsübergang zwischen den Beteiligten findet in der Regel in Form von Spezifikationen statt. Solche Spezifikationen sind aus verschiedenen Gründen häufig unzureichend. Der

Anforderungsgeber tut sich schwer, die relevanten Informationen zu identifizieren und korrekt in der Spezifikation zu dokumentieren. Auch die Analyse und Absicherung der dokumentierten Anforderungen auf Seiten der Entwicklung ist oftmals nicht stringent. Die Folge sind Wissensverluste zwischen den Beteiligten. Bild 2-13 visualisiert den prinzipiellen Arbeitsablauf und den Wissensverlust zwischen den Stakeholdern [DBK+15].

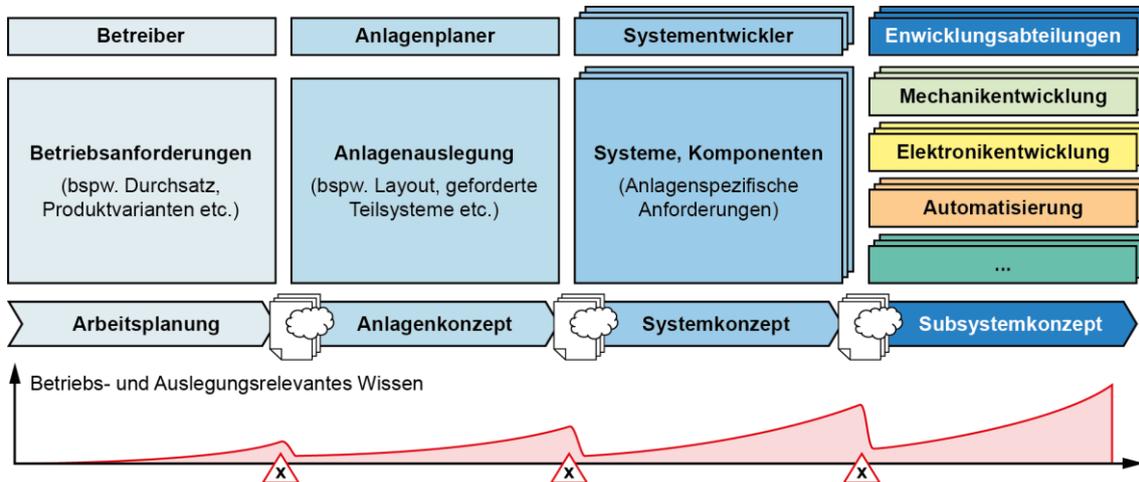


Bild 2-13: Wissensverlust zwischen Stakeholdern der Produktionssystementwicklung [DBK+15]

### 2.4.3 Flexible Produktionssysteme

Flexible Produktionssysteme bieten die Möglichkeit, die Effizienz von Produktionssystemen für variantenreiche Produkte signifikant zu steigern. Die flexible Produktion ist in vielen Produktionsstätten der Entwicklungsschritt, der das Prinzip der Fließfertigung<sup>12</sup> ablöst und die zukünftige Konkurrenzfähigkeit der Unternehmen sichert [WWB+16].

Ein Beispiel ist etwa bei [Win16] zu finden. Hierbei handelt es sich um die Produktion des Audi-Modells R8. In der Produktionsanlage für dieses Fahrzeug wird nicht mehr nach dem Fließprinzip, sondern an einzelnen Montageinseln produziert, welche das in Montage befindliche Fahrzeug durchläuft. Dabei ist es in zahlreichen Fällen sogar gleichgültig, in welcher Reihenfolge dies passiert. Somit können immer die Montageinseln angesteuert werden, die gerade die nötige Kapazität haben. Die Wechselzeiten orientieren sich nicht an einem fixen Taktzeitwert, sondern bewegen sich in einem Fenster von 30 bis 240 Sekunden. Da bei den sehr variantenreich durch den Kunden konfigurierbaren Fahrzeugen die benötigte Montagezeit in Summe sehr unterschiedlich ausfallen kann, besteht mit dem Konzept die Chance, die spezifischen Durchlaufzeiten zu minimieren und die

<sup>12</sup> Die Fließfertigung ist ein Produktionsprinzip, das heute in vielen Produktionsstätten angetroffen werden kann. Auf Basis eines Takts werden Arbeitsschritte synchronisiert. So kann eine effizient ineinandergreifende Produktion realisiert werden. Werden die zu produzierenden Varianten jedoch vielfältiger, kann eine feste Taktung zu ungewollten Leerlaufzeiten führen, da die benötigten Zeiten je Arbeitsvorgang stark variieren können [SS12a].

Auslastung der Anlage insgesamt zu steigern. Flexible Produktionssysteme bieten also Chancen zur Produktivitätssteigerung. Im Folgenden werden die Eigenschaften flexibler Produktionssysteme näher analysiert [Win16].

### Flexibilität in Produktionssystemen

Die Flexibilität von Produktionssystemen kann sich in verschiedenen Ausprägungen manifestieren. An dieser Stelle soll zunächst ein Überblick über einige Begriffsdefinitionen und Ausprägungen von Flexibilität gegeben werden. Bild 2-14 veranschaulicht verschiedene Konzepte für flexible Produktion bzw. Fertigung.

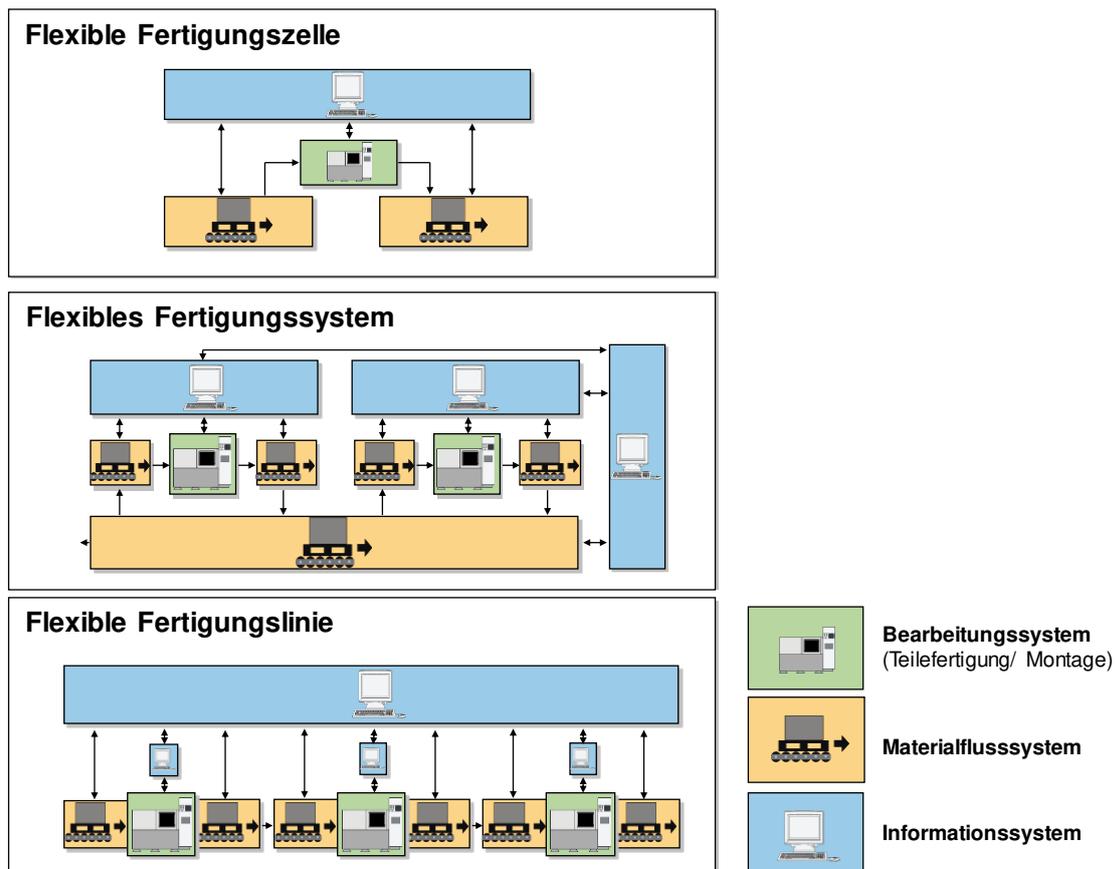


Bild 2-14: Verschiedene Konzepte flexibler Produktion/ Fertigung [Ref90]

Im Zusammenhang der flexiblen Produktion unterscheidet die REFA flexible Fertigungs-/Montagesysteme und flexible Fertigungs-/ Montagelinien. Charakterisierendes Merkmal dieser beiden Ausprägungen ist die Anlegung der Verkettung:

Liegt eine **Innenverkettung** vor, müssen Werkstücke eine „bei der Planung festgelegte Reihenfolge [...] durchlaufen“ [Ref90, S.51]. Können die eingebundenen Montage- oder Fertigungszellen verschiedene Werkstücke bearbeiten, so handelt es sich insgesamt um eine **flexible Fertigungslinie**. Eine flexible Fertigungslinie ist somit im Stande, gleichzeitig oder nacheinander unterschiedliche Werkstücke zu bearbeiten [Ref90].

Bei einer **Außenverkettung** hingegen können einzelne Bearbeitungsstationen wahlweise durchlaufen werden. Dies ermöglicht unterschiedliche Pfade durch die Anlage, die von Werkstücken durchlaufen werden können. Es handelt sich hierbei um ein **flexibles Fertigungssystem** [Ref90].

Um den unterschiedlichen Arten von Flexibilität, die sich nicht nur im Materialflusssystem, sondern auch in der Maschinenfähigkeit oder Arbeitsplanflexibilität äußern können, gerecht zu werden, muss die Beschreibung von Flexibilität differenziert werden. Damit ergeben sich verschiedene Formen von Teilflexibilitäten, die ein flexibles Produktionssystem in Gänze ausmachen. BCHENNATI, WIOR und FAY geben einen Überblick über verschiedene Formen von Teilflexibilitäten (siehe Tabelle 2-1).

In Bezug auf Flexibilität kann zunächst nach dem Zeithorizont differenziert werden. Kurz- und mittelfristige Flexibilität äußert sich im direkten operativen Betrieb während langfristige Flexibilität bspw. mit Blick auf verschiedene Produktgenerationen zum Tragen kommt. Ferner kann bzgl. der Systeme oder Komponenten differenziert werden, in denen die jeweilige Teilflexibilität implementiert wird. Dies ist in den meisten Fällen auf Systemebene anzutreffen [WWB+14].

*Tabelle 2-1: Übersicht der Teilflexibilitäten nach [BWF12-ol] auf Grundlage von [BS88], [BSD83], [Ref90], [SS90], [TK93]*

Teilflexibilität	Kategorisierung nach dem Zeithorizont	Kategorisierung nach den Komponenten
Maschinenflexibilität	kurz-/mittelfristig	Maschine
Materialflussflexibilität	kurz-/mittelfristig	Materialflusstechnik
Arbeitsplanflexibilität	kurz-/mittelfristig	Produkt
Prozessflexibilität	kurz-/mittelfristig	System
Prozessfolgeflexibilität	kurz-/mittelfristig	System
Transferflexibilität	kurz-/mittelfristig	System
Mengenflexibilität	kurz-/mittelfristig	System
Produktmixflexibilität	langfristig	System
Erweiterungsflexibilität	langfristig	System
Produktionsflexibilität	langfristig	System
Programmflexibilität	langfristig	System
Marktflexibilität	langfristig	System

Im Bereich der kurz- und mittelfristigen Teilflexibilität beschreibt die **Maschinenflexibilität** die Operationsvielfalt einer Maschine, welche ohne größeren Umrüstaufwand umgesetzt werden kann. Die **Materialflussflexibilität** bezeichnet die Fähigkeit, unterschiedliche Werkstücke auf beliebigen Wegen durch das System zu bewegen. Die **Arbeitsplanflexibilität** bezieht sich auf die Reihenfolge in der ein Werkstück bearbeitet werden kann. Die **Prozessfolgeflexibilität** beschreibt die Fähigkeit eines Systems, ein bestimmtes Produkt auf unterschiedlichen Wegen durch das System zu produzieren. Unter den langfristigen Teilflexibilitäten sei die **Produktionsflexibilität** erwähnt, die ein Maß für

die Produktionsvielfalt (die ohne Umbaumaßnahmen erreicht wird) ist. Für weitere Definition der Teilflexibilitäten sei auf [BWF12-ol] verwiesen.

Offenkundig kann der Begriff der Flexibilität im Zusammenhang mit Produktionsanlagen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird insb. auf die Materialflussflexibilität, die sich durch die Ermöglichung unterschiedlicher Verkettungen realisieren lässt, und die Produktionsflexibilität abgezielt.

#### **2.4.4 Fazit**

In produzierenden Unternehmen übernimmt der Bereich der Arbeitsvorbereitung die Steuerung und Planung von Produktionssystemen. Sie legt fest, auf welche Weise Teile eines Produkts produziert werden und ordnet die entsprechenden Maschinen zu. Dabei sind die Schnittstellen zur Produktentwicklung auf der einen Seite und zur (operativen) Fertigungssteuerung auf der anderen Seite zu beachten (Abschnitt 2.4.1).

An die Planung von Produktionssystemen und -anlagen werden zunehmend höhere Anforderungen gestellt. Die Abhängigkeiten zwischen einzelnen Produktionssystemen steigen, da die Wertschöpfungsnetzwerke komplexer und variabler werden. Gleiches gilt für die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem. Produkte können zukünftig auf unterschiedlichen Wegen und mit verschiedenen Zielen durch die flexible Anlage geschleust werden. Hinzu kommt, dass an Entwicklung und Betrieb von Produktionsanlagen eine Vielzahl unterschiedlicher Partner oder Stakeholder beteiligt sind – vom Betreiber über den Anlagenplaner bis hin zum Komponentenentwickler. Die Folge sind Wissenslücken zwischen den Beteiligten (Abschnitt 2.4.2 und 2.4.3).

Die fortschreitende Digitalisierung bietet in diesem Zusammenhang Potentiale. Vernetzte Produktionssysteme ermöglichen die Umsetzung flexibler Produktionssysteme. Um diese zu entwickeln, müssen die Entwicklungsdisziplinen integriert und die an der Entwicklung beteiligten Stakeholder zusammengebracht werden. Es ist ein entsprechender Entwicklungsansatz notwendig, wie er vom Systems Engineering adressiert wird (siehe Kap. 2.5).

## **2.5 Model-Based Systems Engineering**

Model-Based Systems Engineering (MBSE) ist ein Entwicklungsparadigma, das ein Systemmodell als Dreh- und Angelpunkt der verschiedenen Entwicklungstätigkeiten propagiert. Das Systemmodell beschreibt das zu entwickelnde System ganzheitlich. Es kann genutzt werden, um Entwicklungsartefakte zu verknüpfen, Komplexität handhabbar zu machen oder als Mittel der Kommunikation und Kooperation. Grundlage von MBSE ist das Systems Engineering, das nachfolgend erläutert wird (Abschnitt 2.5.1). In den darauffolgenden Abschnitten wird das Prinzip der objektorientierten Systemgestaltung (Abschnitt 2.5.2) erläutert sowie die Nutzung des Systemmodells (Abschnitt 2.5.3). Als Sprache des MBSE etabliert sich die SysML zusehends als Quasi-Standard. Sie wird daher in Abschnitt 2.5.4 vorgestellt.

### 2.5.1 Systems Engineering

Systems Engineering (SE) versteht sich als durchgängige, fachdisziplinübergreifende Disziplin zur Entwicklung technischer Systeme, die alle Aspekte ins Kalkül zieht. Inspiriert und beeinflusst durch die Kybernetik [Wie48], die Systemtheorie [Ber51] und die Modelltheorie [Sta73] ist das Systems Engineering seit den 1940er Jahren zunächst in der Telekommunikationsbranche, dann verstärkt im Rahmen US-amerikanischer Verteidigungs- und Raumfahrtprogramme als eigenständige Disziplin entstanden. Vor dem Hintergrund steigender Systemkomplexität, die auch bei Automobilherstellern oder im Maschinen- und Anlagenbau zu beobachten ist, gewinnt SE auch dort an Relevanz. Das International Council on Systems Engineering INCOSE definiert:

*“Systems Engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. It focuses on defining customer needs and required functionality early in the development cycle, documenting requirements, then proceeding with design synthesis and system validation while considering the complete problem” [Inc15].*

Systems Engineering propagiert die frühzeitige und ganzheitliche Betrachtung eines technischen Systems mit dem Ziel, die Entwicklung komplexer Systeme effizienter zu machen. Diese Herangehensweise gewinnt an Bedeutung, da technische Systeme immer interdisziplinärer werden. Immer kompliziertere Abhängigkeiten (bzgl. Vielzahl und Vielfalt) sowohl innerhalb eines zu entwickelnden Systems als auch zu dessen Umfeld sind die Folge. Dies äußert sich nicht nur in Form von technischer, sondern auch als organisatorische Komplexität. SE ist der Ansatz, durch den System-Gedanken, sowohl in der frühen Phase als auch über den gesamten Entwicklungs- und Produktionsprozess hinweg, dieser Komplexität zu begegnen. Es integriert die Fachdisziplinen entlang des Produktentstehungsprozesses. Dabei berücksichtigt es sowohl technische als auch organisatorische Aspekte mit dem übergeordneten Ziel, ein Produkt oder System zu entwickeln, das den gestellten Anforderungen entspricht [HFW+12], [GCW+13], [Inc15], [ISO15288].

HABERFELLNER et al. beschreiben die Bestandteile des Systems Engineerings wie in Bild 2-15 veranschaulicht. Kern des Systems Engineerings ist demnach der Problemlösungsprozess. Er geht von einem Problem oder einer (Entwicklungs-)Aufgabe aus und zielt auf die entsprechende Lösung. Der Lösungsprozess fußt auf zwei Säulen: Einer dem Systems Engineering entsprechenden Denkweise und den Techniken der Systemgestaltung und des Projektmanagements. Die SE-Denkweise beinhaltet das Prinzip des Systemdenkens, welches es ermöglicht, komplexe Systeme zu verstehen sowie ein Vorgehensmodell, das einen generellen Leitfaden für die Gestaltung von Systemen darstellt. Techniken der Systemgestaltung sind Hilfsmittel oder Konzepte bspw. zur Entwicklung und Beschreibung von Systemarchitekturen oder das kreative Finden neuer Lösungen. Techniken des Projektmanagements ermöglichen die effiziente Organisation und Koordination des Problemlösungsprozesses [HWF+12].

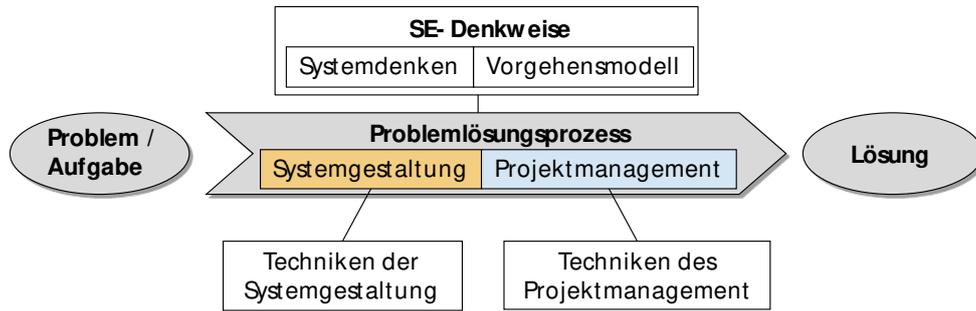


Bild 2-15: Komponenten des Systems Engineering nach [HWF+12]

Zur Analyse und Gestaltung von Systemen kann ein System auf unterschiedliche Weisen betrachtet werden. Bild 2-16 veranschaulicht verschiedenen Prinzipien. Diese Betrachtungsweisen sind jeweils mit verschiedenen Methoden erzielbar und sinnvoll im Problemlösungsprozess bzw. im Entwicklungsprozess zu verankern. Diese vier Betrachtungsweisen sind weiter differenzierbar, BONNEMA etwa beschreibt 12 Thinking Tracks [Bon12]. Darunter ist bspw. das Dynamik-Thinking zu finden, mit dem die Systemveränderungen über die Zeit betrachtet werden. Beim Decomposition-Composition-Thinking wird das System mit dem Blickwinkel des Auseinander- und Zusammenbauens analysiert. Für die weiteren Thinking Tracks sei auf [Bon12] verwiesen.

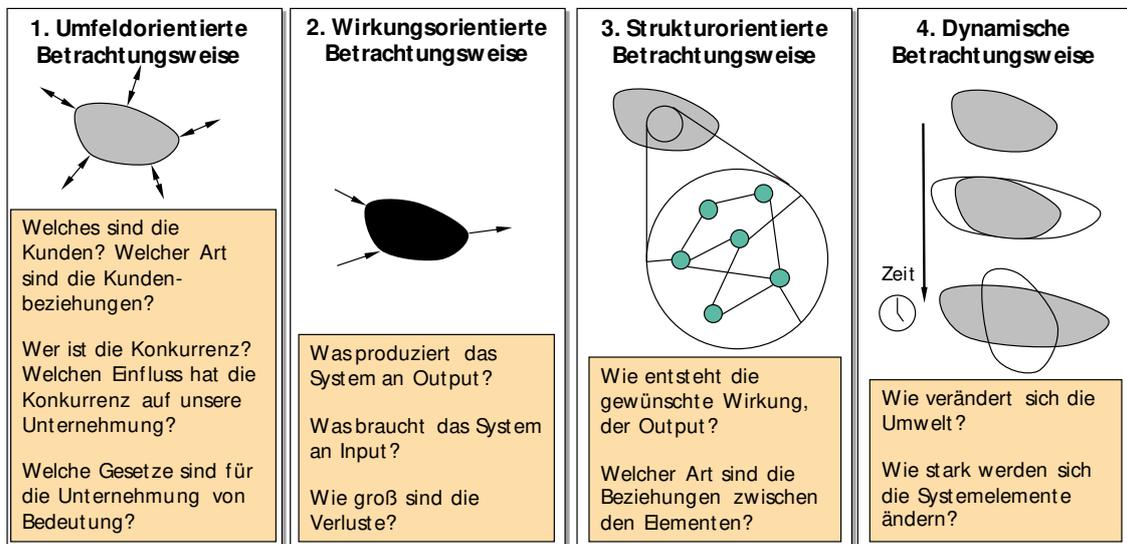


Bild 2-16: Mögliche Betrachtungsweisen auf ein System (nach [DH02] bzw. [BFP94])

Im Systems Engineering genutzte Modelle erfordern eine Modellierungssprache. Diese definiert die Syntax und stellenweise auch die Semantik eines Modells. Dabei kann zwischen informeller, semi-formaler und formaler Sprache unterschieden werden. Während erstere praktisch frei von Vorgaben für den Modellersteller ist, gibt eine formale Sprache enge Schranken für die Modellierung vor. Damit einher geht aber auch die Möglichkeit zur rechnerinternen Auswertbarkeit. Sollen Modelle ablauffähig sein, ist ein hoher

Formalisierungsgrad nötig. Deskriptiven Modellen genügt eine semi-formale Sprache, die leichter zu erlernen und anzuwenden ist.

## 2.5.2 Objektorientierte Systemgestaltung

Die Grundlage für die modellgetriebene Systementwicklung ist das Konzept der Objektorientierung. Es wurde im Bereich der Softwareentwicklung geprägt und auf die Entwicklung komplexer Systeme (typischerweise mit signifikanten Softwareanteil) übertragen. Nachfolgend sollen zunächst das Wesen der Objektorientierung vorgestellt sowie anschließend ein Übertrag auf die Systemgestaltung gemacht werden. In der SysML manifestiert sich dieses Verständnis im Sinne einer objektorientierten Modellierungssprache zur Systemgestaltung (Näheres hierzu in Abschnitt 2.5.4).

### Objektorientierung

Objektorientierung bedeutet, dass reale Gegenstände als Objekte aufgefasst werden, die bestimmte Funktionalitäten und Eigenschaften haben und über eine definierte Schnittstelle mit ihrer Umgebung interagieren. Im Zuge der Modellbildung werden Funktionalität und Eigenschaften des realen Gegenstands auf genau die Aspekte reduziert, die für das Modellverständnis entscheidend sind. Dieses Prinzip wird in Bild 2-17 visualisiert.

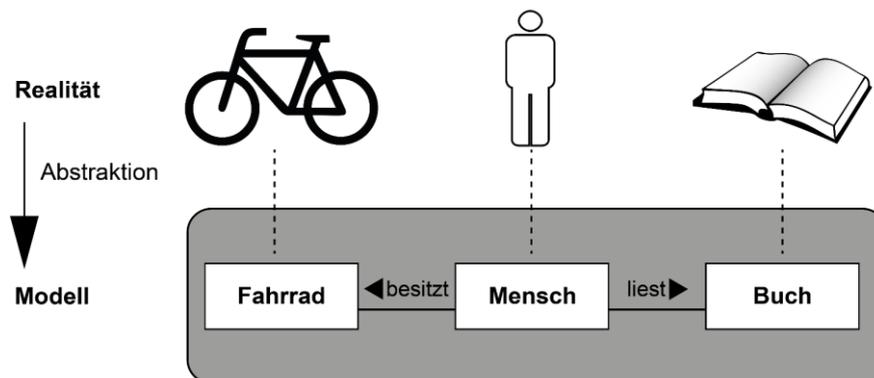


Bild 2-17: Prinzip der Modellbildung in der Objektorientierung (nach [LH03-ol])

Die Definition einer **Schnittstelle** ist wichtig, um die Ein- und Ausgänge eines Objekts festzulegen. Die interne Funktionalität des Objekts ist von außen nicht erkennbar. Man spricht in diesem Zusammenhang vom Prinzip der **Kapselung**. Anschaulich formuliert bedeutet dies: Wenn in einem System ein Elektromotor verbaut werden soll, dann ist für den Entwickler in erster Linie entscheidend, welches Drehmoment und welche Drehzahl möglich ist, oder wie viel Strom und Spannung dafür nötig sind – also wie die Schnittstellen ausgeprägt sind. Auf Grundlage welchen physikalischen Prinzips der Motor letztlich arbeitet oder welche Bauteile darin verbaut sind, ist in diesem Zuge irrelevant [Nah09], [KDD+96].

Wichtige Eigenschaften objektorientierter Modelle sind ihre Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit. Da Objekte über Schnittstellen interagieren bzw. eingebunden werden,

und diese Schnittstellen stringent definiert sind, lassen sich zum Beispiel Objekte durch andere Objekte ersetzen, die dieselbe Schnittstelle aufweisen. Oder aber weitere Objekte werden über vorhandene Schnittstellen hinzugefügt. Auf Basis dieser stringenten Schnittstellendefinition lassen sich auch Objekte aus anderen Modellen in neuen wiederverwenden [Nah09].

Einige zentrale Konzepte, die mit der Objektorientierung verknüpft sind, werden nachfolgend beschrieben. Das Prinzip der **Klassenbasiertheit** ermöglicht es, die Definition eines Objekts von dessen eigentlichem Einsatz zu trennen. Die Definition erfolgt mittels einer **Klasse**, in der alle Eigenschaften festgelegt werden. Ein **Objekt** prägt dann, wie in Bild 2-18 veranschaulicht, eine solche Klasse aus, indem es eben diesen Eigenschaften entspricht und in einem konkreten Kontext verwendet wird. Dabei lässt sich in der Anschauung ein Dreischritt vollziehen: Eine Klasse definiert bspw. einen Elektromotor, mit einer entsprechenden Schnittstelle und weiteren Eigenschaften. Dieser Elektromotor kann nun als Objekt verschiedentlich im System eingesetzt werden, was in der Systemspezifikation definiert wird. In einem Automobil könnte also der gleiche Elektromotor (derselben Klasse) an Vorder- und Hinterachse eingesetzt werden. Wird dieses Auto nun tatsächlich gebaut<sup>13</sup>, werden die in der Spezifikation verwendeten Objekte instanziiert; die **Instanz** ist demnach die konkreteste Ausprägung einer Klasse [KDD+97].

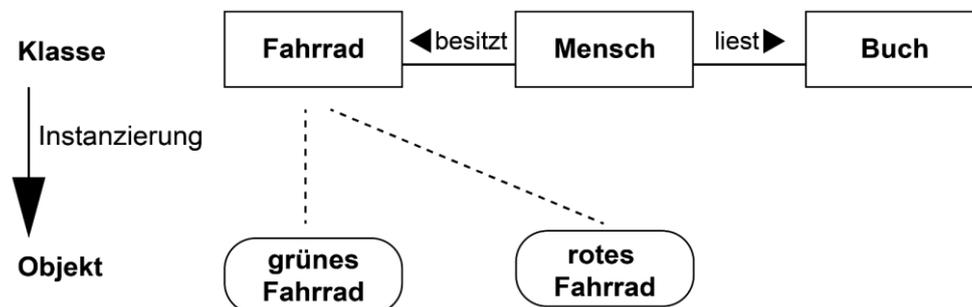


Bild 2-18: Instanziierung der Klasse zu Objekten

Im Zuge der Definition von Klassen kann von einem weiteren Konzept Gebrauch gemacht werden: der **Vererbung**. Stehen Klassen in einer Vererbungshierarchie, so gelten die Eigenschaften der übergeordneten „Eltern-Klasse“ auch für die abgeleitete „Kind-Klasse“, ohne dass diese Eigenschaften in der Kind-Klasse explizit gemacht werden. Vielmehr kann die Kind-Klasse ihrerseits weitere Eigenschaften beinhalten oder gar Eigenschaften der Eltern-Klasse überschreiben, also durch eine die eigene Definition einer Eigenschaft ersetzen.

Durch diesen Mechanismus wird ein weiteres Prinzip ermöglicht, das insb. bei der Betrachtung mehrerer Systeme zum Tragen kommt: das der **Ersetzbarkeit** und

<sup>13</sup> In Software-näherer Literatur wird in diesem Fall von der „Laufzeit“ gesprochen.

**Polymorphie.** Geht man von einer stringenten Definition von Schnittstellen aus und erfüllt eine Klasse diese Schnittstelle, so realisiert auch eine abgeleitete Klasse ebendiese Schnittstelle. Überschreibt diese abgeleitete Klasse dabei Eigenschaften oder Funktionen, die zur Realisierung der Schnittstelle benötigt werden, ergibt sich ein anderes Verhalten oder andere Eigenschaften des Gesamtsystems, wenn die abgeleitete Klasse anstelle der übergeordneten Klasse verwendet wird. Dieser Mechanismus ermöglicht bspw. die Handhabung verschiedener Varianten. So könnten bspw. verschiedene Elektromotor-Objekte für ein System verwendet werden, sofern diese Objekte alle dieselben Schnittstellen einer gemeinsamen Oberklasse erfüllen.

### **Objektorientierung bei der Systemmodellierung**

Die Objektorientierung unterstützt wichtige Konzepte der Systembetrachtung, wie sie im Systems Engineering definiert werden (siehe Bild 2-14). Der Ansatz der Kapselung ermöglicht bspw. die Modellierung einer Umfeldorientierten Betrachtung. Mit Hilfe der Definition von Schnittstellen kann die wirkungsorientierte Betrachtung modelliert werden. Auf Basis von Klassenbasiertheit und Objektmodellierung können Systemstrukturen modelliert werden, wobei sowohl eine hierarchische als auch eine flussorientierte Beschreibung möglich ist. Außerdem unterstützt die Objektorientierung weitere Aufgaben im Rahmen der Systemmodellierung. So begünstigt sie die Wiederverwendung von Lösungen, auch über Projektgrenzen hinweg. Mit Hilfe stringenter Schnittstellendefinitionen kann auch die Zusammenarbeit der Entwickler verbessert und die Plausibilität von Lösungen überprüft werden (siehe [Kai14]).

### **2.5.3 Nutzung des Systemmodells im MBSE**

Das Model-Based Systems Engineering realisiert das Paradigma des Systems Engineering durch den gezielten Einsatz von Modellen. Es manifestiert damit nicht zuletzt den Übergang von einer dokumentenbasierten hin zu einer modellbasierten Entwicklung, insbesondere in der frühen Phase des Entwurfs und in der disziplinübergreifenden Arbeit.

#### **Erläuterung des Systemmodells**

MBSE stellt das abstrakte Modell eines Systems in den Mittelpunkt der Entwicklungsarbeit. Das Systemmodell berücksichtigt verschiedene Aspekte wie die Struktur, das Verhalten und die Anforderungen an das System. Es beinhaltet „einfache, grafische Modelle, welche die realen Zusammenhänge aufzeigen sollen, das Problembewusstsein fördern und diskutierbar sind“ [HWF+12]. Das Systemmodell ist also nicht nur Träger wichtiger Informationen über das System, sondern auch die Grundlage zum Informationsaustausch und zur Kommunikation der Entwicklungsbeteiligten [SMM+12, S.145]. Nach CLOUTIER et al. dient das Modell im MBSE dazu, Komplexität zu verstehen, Probleme zu analysieren und mit anderen zu kommunizieren [CBB15].

Komplexe technische Systeme, wie sie hier betrachtet werden, sind in der Summe ihrer Facetten viel zu umfangreich und kompliziert, um sie im Ganzen zu erfassen. Daher ist

die Idee sinnvoll, ein Systemmodell aus vielen einfachen Modellen – also Teilmodellen – zusammenzusetzen. Ein Teilmodell beschreibt einen bestimmten Aspekt oder ein Problem und kann Teile eines anderen Modells konkretisieren, Verknüpfungen herstellen oder Ähnliches. Ein solches Teilmodell wird in einer Sicht bzw. in einem Diagramm dargestellt und so dem Anwender zugänglich gemacht (siehe Bild 2-19). Das Systemmodell als Ganzes ist typischerweise in verschiedenen Ebenen organisiert, die miteinander verknüpft sind. BONNEMA nennt hierfür zwei Ebenen: Funktionen und Performance [Bon08]. Dassault setzt in ihrer Software vier Ebenen um: Anforderungen, Funktionen, Logische Struktur, Physikalisch Struktur [KK13], [Das16]. Die konkrete Struktur eines Systemmodells ist jedoch auch projekt- bzw. produktabhängig. Das Systemmodell bietet die Chance, Modelle und Verknüpfungen unabhängig von bestehenden Datenstrukturen zu erstellen und somit die disziplinübergreifenden Tätigkeiten zu unterstützen [Rop09].

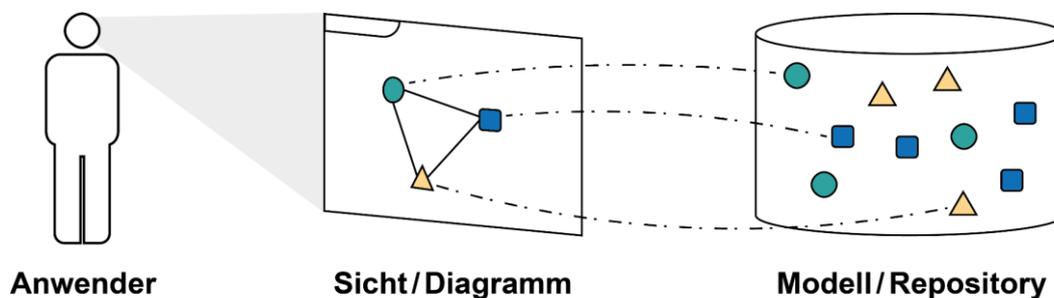


Bild 2-19: Trennung von Modell und Sicht [Alt12]

Bei MBSE handelt es sich zunächst um ein Entwicklungsparadigma. Inwiefern dieses Paradigma in der Entwicklung umgesetzt wird, ist Frage der Entwicklungsmethodik. Sie legt fest, nach welchem Schema die Entwicklung erfolgen soll und welche Informationen in einem Systemmodell festgehalten werden. Spätestens bei der Anwendung der Methodik stellt sich aber auch die Frage nach einer Modellierungssprache, die definiert, nach welchen Gesichtspunkten und nach welchen Regeln die besagten Modelle aufgebaut werden und wie die Verbindungen zwischen den Teilmodellen zu ziehen sind. Sollen die Modelle rechnerintern repräsentiert und weiterverwendet werden, ist dafür eine Software notwendig, die das Abbilden der Modelle und ihre inhaltliche Weiterverwendung ermöglicht. Die Verwendung von Software ist schon deshalb unverzichtbar, weil die Modelle in der Regel so groß sind, dass sie sich nur durch Softwareunterstützung überblicken und bearbeiten lassen. Die Nutzung eines Systemmodells erfordert somit eine Methode, eine Sprache und ein Modellierungswerkzeug, Bild 2-20 bringt dieses Zusammenspiel zum Ausdruck.

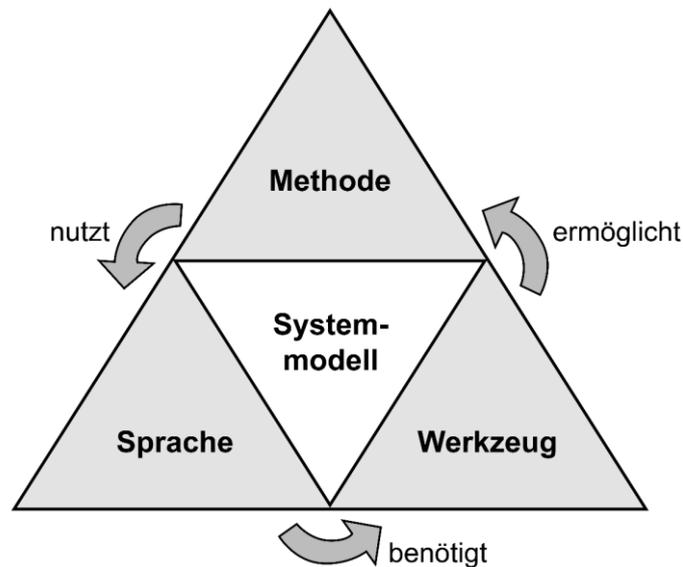


Bild 2-20: Voraussetzungen für die Arbeit mit einem Systemmodell (vgl. [Kai13])

Auf Seiten der **Methode** existieren verschiedene Vorgehensmodelle, die in Kap. 3 detaillierter betrachtet werden. Sie orientieren sich am Ansatz des Systems Engineerings und gehen gleichzeitig auf Modellierungsaspekte ein. Dabei wird auf eine entsprechende **Modellierungssprache** verwiesen. Die SysML, als prominentester Vertreter, wird in Abschnitt 2.5.4 betrachtet. Sie kristallisiert sich derzeit als quasi-Standard und mögliches Austauschformat heraus.

Im Bereich der **Werkzeuge** sind unterschiedliche Lösungen am Markt verfügbar. Dabei werden von einigen Anbietern wie Dassault [Das17-ol] oder Siemens [Sie17-ol] proprietäre Ansätze verfolgt. Sie zeichnen sich in der Regel durch eine gute Integration in die übrige Tool-Landschaft der entsprechenden Hersteller aus. Konträr hierzu fokussieren andere Anbieter die Umsetzung der SysML als standardisierte Sprache. Diese Editoren basieren zum Großteil auf UML-Werkzeugen. Es existieren Open-Source Lösungen wie Eclipse-Papyrus [Pap17-ol] sowie kommerziell vertriebene Software wie etwa Enterprise Architect [Spa17-ol], Cameo Systems Modeler [NoM17-ol] oder IBM Rhapsody [IBM17-ol]. Der Grad der Ausgereiftheit dieser Lösungen und insbesondere ihre Nutzerfreundlichkeit werden jedoch kritisch diskutiert (siehe bspw. [Mun16]).

### Einsatz von MBSE

Die Anwendung des MBSE und die Nutzung eines Systemmodells ermöglichen ein **durchgängiges Engineering**. Dies bedeutet, dass z.B. Entwicklungsartefakte miteinander verknüpft werden können. So können Anforderungen mit den entsprechenden Funktionen und den sie realisierenden Systemelementen verknüpft werden. Auch Testfälle und -ergebnisse können hinterlegt und damit die Erfüllung der Anforderungen abgeprüft werden. Im Falle von Änderungen können solche Querbeziehungen genutzt werden, um Auswirkungen und Aufwände abzuschätzen. Ebenso können Entwicklungsentscheidungen während des Entwicklungsprojekts dokumentiert und nachvollziehbar gemacht werden.

Informationen aus dem Systemmodell können darüber hinaus z.B. für das Projektmanagement genutzt werden.

Der Einsatz von SE-Methoden und insbesondere der des Rückgriffs auf ein durchgängiges Systemmodell sind mit zusätzlichem Aufwand für das Entwicklungsteam verbunden und nicht für alle Projekte auch mit einem entsprechenden Nutzen verknüpft. Zur Beurteilung eines adäquaten Einsatzes von MBSE-Methoden ist eine Bewertung des Entwicklungsprojekts nötig. Ein Entwicklungsprojekt kann hierzu hinsichtlich des Grads der Systemvernetzung sowie hinsichtlich der Veränderbarkeit des Projekts bzw. dessen Rahmenbedingungen bewertet werden. Bild 2-21 veranschaulicht die mögliche Bewertung eines Entwicklungsprojekts.

Handelt es sich um ein kompliziertes Projekt, ist mit einer signifikanten Komplexität zu rechnen, die etwa durch starke Interdisziplinarität und eine hohe Variantenzahl begründet ist. Hier ist ein Schwerpunkt auf Ansätze zur Komplexitätsbeherrschung zu legen. Handelt es sich hingegen um ein dynamisches Projekt, können sich die Rahmenbedingungen insb. Anforderungen ändern. Ein Schwerpunkt sollte daher auf dem Requirements Engineering liegen. Kommen beide Ausprägungen zusammen, bspw. bei einer Neuentwicklung mit einem großen interdisziplinären Entwicklungsteam, ist ein durchgängiges MBSE zu verfolgen.

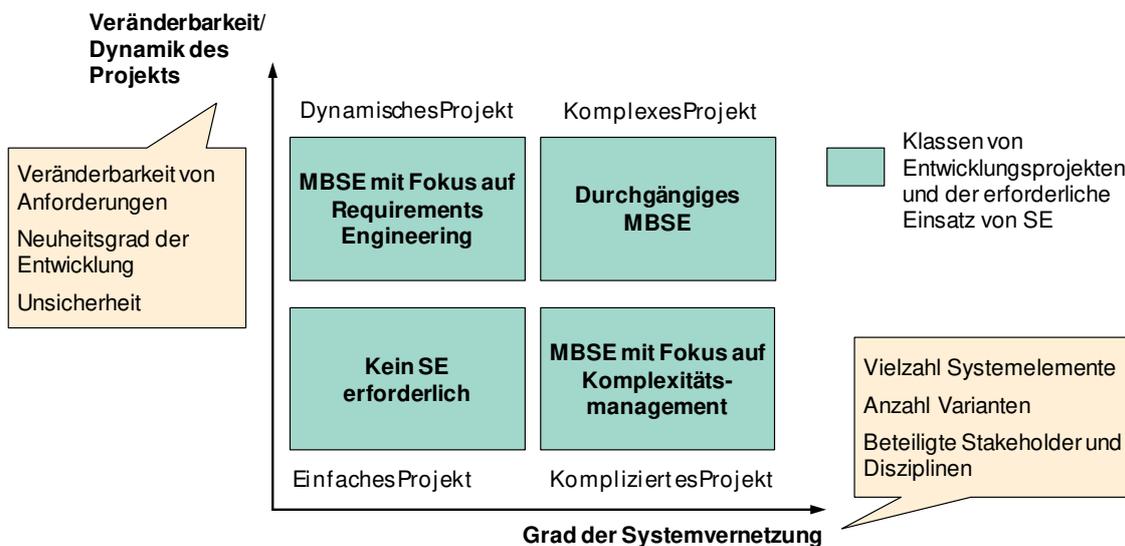


Bild 2-21: Klassifizierung von Entwicklungsprojekten und Einordnung des Einsatzes von (MB)SE (in Anlehnung an [UP95])

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zukünftige Herausforderungen im Bereich der Produktionssystementwicklung skizziert. Hier ist zum einen eine steigende Dynamik in den Projekten zu erkennen. Zum anderen nimmt die Vernetzung innerhalb der Produktionsanlage zu und es werden mehr Stakeholder und Disziplinen integriert. Damit lassen sich auch Projekte aus der Produktions- und Anlagenentwicklung als komplexe Projekte bezeichnen, die ein durchgängiges MBSE verlangen.

## 2.5.4 SysML – Systems Modeling Language

Bei der Systems Modeling Language (SysML) handelt es sich um eine durch die Object Management Group (OMG) veröffentlichte Modellierungssprache, die derzeit in der Version 1.5 vorliegt [OMG17]. Sie umfasst neun Diagrammtypen, die sich in die Bereiche Struktur, Verhalten und Anforderungen gliedern lassen (siehe Bild 2-22). Die SysML setzt das zuvor beschriebene Konzept der Objektorientierung um.

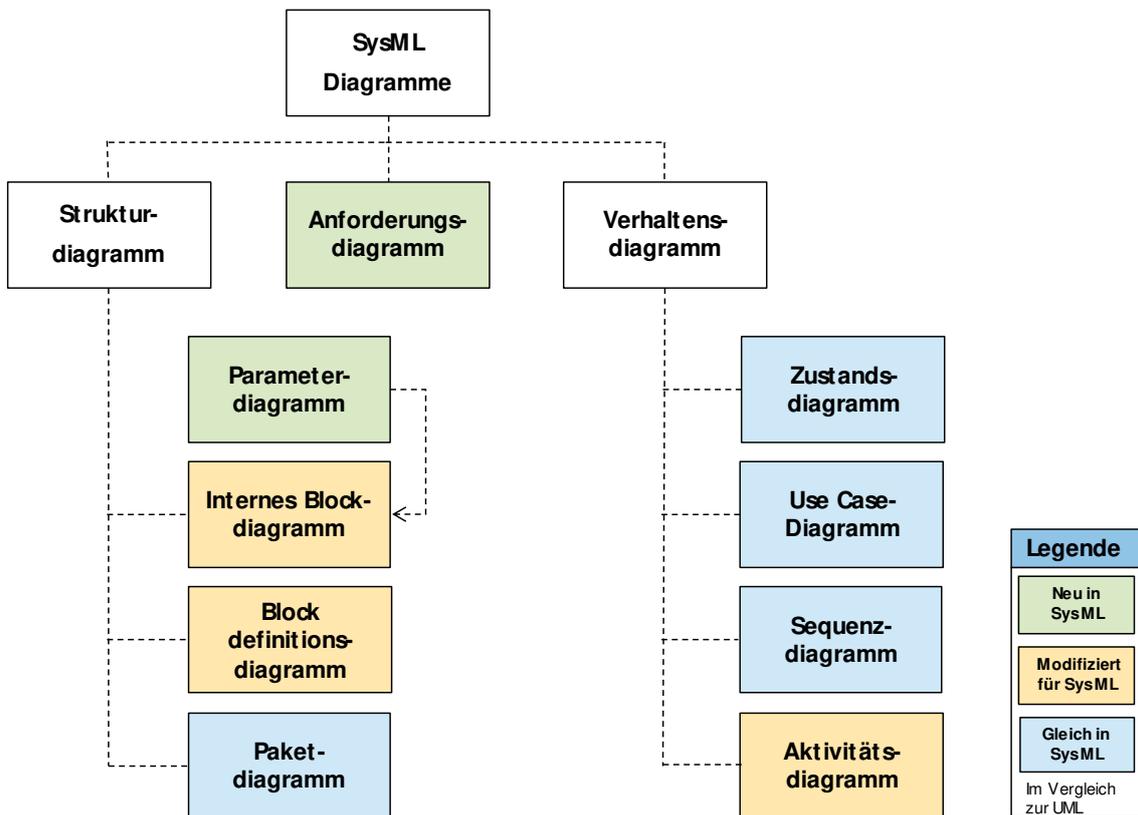


Bild 2-22: Diagrammtypen der SysML [OMG17]

Die SysML ist als Erweiterung der UML definiert [OMG11]. Grundlage dafür ist eine entsprechende Eigenschaft der UML: Ihre Erweiterbarkeit. Neue Sprachelemente können als Erweiterung der bestehenden Sprache definiert und mit zusätzlichen Eigenschaften angereichert werden. Auf diese Weise kann die UML (wie auch die SysML) für einen spezifischen Gebrauch im Anwendungskontext dediziert werden. Die gängigen UML-Editoren implementieren auch die Möglichkeit zur Erweiterung (der sog. Profilmechanismus). Das ist auch der Grund, warum die gängigen UML-Editoren mit nur geringem Aufwand zu SysML-Werkzeugen erweitert werden können. Verbreitete Sys-ML-Werkzeuge sind bspw. der NoMagic Cameo Systems Modeller, IBM Rhapsody, PTC Integrity, Sparx Enterprise Architect oder Eclipse Papyrus. bereits kurz nach Veröffentlichung der SysML standen zahlreiche Modellierungswerkzeuge zur Verfügung. Ein Umstand, der nicht unerheblich dazu beigetragen haben dürfte, dass sich die SysML hoher Verbreitung erfreut und heute als meistverwendete Sprache und Quasi-Standard im MBSE angesehen werden kann.

Mit den zwei **Block-Diagrammarten** „Internes Blockdiagramm“ und „Blockdefinitionsdiagramm“ wird die Struktur des betrachteten Systems beschrieben. Dabei tritt in diesen beiden kohärenten Modelltypen die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Klassenbasiertheit als Konzept der Objektorientierung zu Tage. Blöcke repräsentieren primär System- oder Umfeldelemente, können aber generell zur Typisierung genutzt werden. Das **Parameterdiagramm** kann genutzt werden, um Verhalten einzelner Systemelemente (aus dem internen Blockdiagramm) nach dem Prinzip eines Blockschaltbilds<sup>14</sup> zu beschreiben. Mit Hilfe des **Paketdiagramms** kann das Modell selbst strukturiert werden; dies ist vergleichbar mit Ordnern zur strukturierten Ablage von Dokumenten oder Dateien. Das **Anforderungsdiagramm** erlaubt die Modellierung von Anforderungen, wobei auch eine Darstellung in Tabellenform möglich ist. Das **Use-Case Diagramm** stellt eine initiale Verhaltensbeschreibung bereit, mit der die Anwendungsfälle des Systems beschrieben werden können. Sie werden verknüpft mit involvierten Akteuren des Umfelds. Im **Zustandsdiagramm** werden die Zustände von Systemen oder Subsystemen beschrieben – in der Regel handelt es sich dabei um Betriebszustände, jedoch können auch andere Objekte Zustände haben. **Aktivitäts-** und **Sequenzdiagramm** fokussieren die Interaktion zwischen Systemen oder Systemelementen. Das erstgenannte Diagramm wird genutzt um Systemverhalten mit allen Eventualitäten und Interaktionen zu modellieren. Mit dem Sequenzdiagramm werden bestimmte Abläufe detailliert und mit der Einbeziehung der Zeit beschrieben.

Die SysML bietet damit ein vielfältiges Spektrum an Modellelementen und Diagrammtypen um ein System ganzheitlich zu beschreiben. An dieser Stelle sei jedoch betont, dass es sich bei der SysML lediglich um eine Sprache handelt. Wie und mit welcher Semantik bestimmte Konstrukte tatsächlich genutzt werden ist abhängig von der entsprechenden Methodik und nicht zuletzt vom zu betrachteten System selbst. Die SysML ist als Sprache und mit dem Anspruch, alle technischen Systeme modellierbar zu machen, zu abstrakt um sie im Unternehmenskontext direkt anzuwenden. Es bedarf hierfür gezielter Anpassungen und Dedizierungen. Dies wird durch die SysML direkt durch ihre Eigenschaft der Erweiterbarkeit unterstützt – dem sogenannten **Profilmechanismus**. Er erlaubt die Definition neuer Stereotypen.

SysML adressiert technische Systeme im Allgemeinen. Eine Anwendung im Kontext der in dieser Arbeit fokussierten Planung von Produktionsanlagen scheint somit prinzipiell möglich. Jedoch stellen VAN NOTEN et al. in ihrer Analyse fest, dass einige Aspekte mit Blick auf die Modellierung eines Werkstücks, das die Anlage durchläuft, bisher unberücksichtigt sind: Die physikalischen Interaktionen, die Berücksichtigung von Objektzuständen und die Modellierung eines komplexen Werkstücks, das durch die Anlage läuft

---

<sup>14</sup> Blockschaltbilder bestehen aus Funktionsblöcken (math. beschrieben) und Signalflüssen und stellen so das mathematisch beschreibbare Verhalten dar (siehe bspw. [Föl94])

[VGW17]. Hierzu sind spezifische Erweiterungen der Sprache notwendig, die mit einem entsprechenden Vorgehen und einem Modellierungskonzept einhergehen müssen.

### 2.5.5 Fazit

Model-Based Systems Engineering ist ein Entwicklungsparadigma, um komplexe Systeme erfolgreich zu entwickeln. Seine Bedeutung nimmt zu, da zukünftige technische Systeme eine größer werdende Komplexität aufweisen und Methoden des Systems Engineerings benötigt werden. Damit werden Systeme ganzheitlich analysiert (Abschnitt 2.5.1). MBSE ermöglicht die Umsetzung des Systems Engineerings und basiert auf der Nutzung eines ganzheitlichen Systemmodells, das Struktur, Verhalten und Anforderungen des Systems beinhaltet. MBSE stellt damit nicht zuletzt den Übergang von einer dokumentbasierten hin zu einer modellbasierten Entwicklung dar. Mit Hilfe des Systemmodells kann Wissen effektiv externalisiert werden, was die Ingenieursarbeit effizienter macht. Die Arbeit mit dem Systemmodell erfordert jedoch auch die Einarbeitung in Konzepte wie das der Objektorientierung (Abschnitt 2.5.2). Voraussetzung für die Anwendung sind eine Methodik, eine Sprache und ein Werkzeug. In diesem Zusammenhang hat sich die SysML als Quasi-Standard herausgebildet, die durch zahlreiche Werkzeuge unterstützt wird (2.5.4)

Die Relevanz und die Potentiale von MBSE orientieren sich an der Art der Projekte bzw. der zu entwickelnden Systeme. Weisen diese eine hohe Vernetzung auf und bestehen Unsicherheiten, ist der durchgängige Einsatz von MBSE angezeigt (Abschnitt 2.5.3). Produktionsanlagen der Industrie 4.0 weisen diese Charakteristika auf; ihre Entwicklung wird zukünftig den Einsatz von MBSE erfordern.

## 2.6 Problemabgrenzung

Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus und verwandter Branchen sind in wachsendem Maße den Herausforderungen eines dynamischen Unternehmensumfelds ausgesetzt. Konkret bedeutet dies, dass kürzer werdende Produktionslebenszyklen, kleinere Losgrößen und höhere Variantenzahlen die Anpassung von Wertschöpfungsprozessen nötig machen – sowohl in der Auftragsabwicklung als auch in der Produktion. Gleichzeitig nimmt die Produktkomplexität zu.

Die Entwicklung hin zu intelligenten technischen Systemen oder CPS birgt das **Nutzenpotential**, Wertschöpfungsnetze effizienter, ressourcenschonender und flexibler zu gestalten. Damit können den Anforderungen aus dem Unternehmensumfeld, insb. denen der Kunden, Rechnung getragen werden. Zukünftig wird also die Produktion – im Sinne der Industrie 4.0 – durch CPS geprägt sein, die autonom agieren und vernetzt sind. Die zukünftige Smart Factory kann Kundenwünsche individuell berücksichtigen und selbst Einzelstücke rentabel produzieren. Treten Störungen und Ausfälle auf, werden diese

innerhalb der Wertschöpfungskette effizient kompensiert. Die horizontale und vertikale Integration wird fortschreiten.

Die Produktionssystemplanung erfordert zukünftig vor dem Hintergrund der Komplexitätssteigerung, den Einsatz von Ansätzen des MBSE. Die Anwendung von MBSE ist in der Entwicklung konventioneller mechatronischer Systeme bereits verschiedentlich erprobt und eingeführt. Die Anwendung ist jedoch von der Produktentwicklung nicht ohne weiteres auf die Planung von Produktionssystemen übertragbar da die Anforderungen an das Modellierungskonzept andere sind. Konventionelle mechatronische Systeme sind insb. geprägt durch ihre Systemstruktur. MBSE-Ansätze setzen daher bspw. auf eine Wirkstruktur als zentrales Teilmodell und eine Hierarchie als funktionale Sicht. Prozessorientierte Systeme hingegen sind charakterisiert durch das Aufeinanderfolgen spezieller Prozesse, die häufig nur in definierten Reihenfolgen und Randbedingungen ausgeführt werden. Es kommt hierbei auf die Überführung eines Produkts von einem Ausgangs- in einen Zielzustand an. Diese Betrachtung erfolgt bei konventionellen mechatronischen Systemen nicht. Gleichwohl ist in der Praxis nicht immer eine scharfe Trennung dieser Systemklassen zu erwarten. Auch Mischformen sind denkbar, bei der bspw. Teile eines mechatronischen Systems eher prozessorientiert entworfen werden und andere nach den Regeln für konventionelle mechatronische Systeme. Bild 2-23 visualisiert dieses Prinzip des Übergangs zwischen den zwei Schwerpunkten der Modellierung.

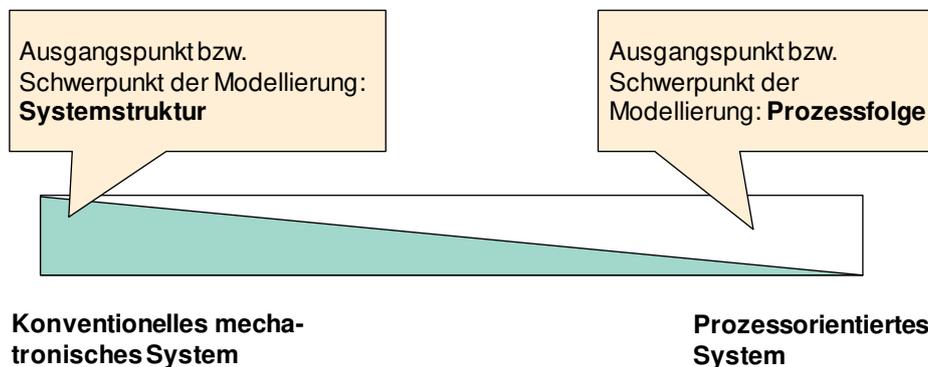


Bild 2-23: Schwerpunkt der Modellierung bei unterschiedlichen Systemklassen

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht der Prozess der Planung von Produktionsanlagen. Im Zuge der Arbeitsplanung müssen Arbeitsschritte bzw. Prozesse geplant und Arbeitsmittel zugeordnet werden. Dabei ist die Neuplanung einer Anlage die Ausnahme. Vielmehr werden bestehende Anlagen genutzt und ggf. erweitert. Es gilt, Produkterweiterungen oder Varianten innerhalb einer Anlage zu berücksichtigen. Der Werterhalt der installierten Basis soll sichergestellt sein. Im Sinne der integrierten Produkt- und Produktionssystemplanung werden dabei bereits auf Konzeptebene die Arbeiten verzahnt. Auf dem Weg zu einer Produktionsanlage der Industrie 4.0 sind im skizzierten Tätigkeitsbereich die folgenden **Herausforderungen** hervorzuheben, die sich aus den vorangegangenen Kapiteln ableiten:

**Steigende Systemkomplexität:** Produktionsanlagen der Industrie 4.0 bestehen aus CPPS. Sie sind hochgradig vernetzt und können autonom handeln. Bei Planung, Spezifikation und Betrieb solcher Anlagen ergeben sich vielfältige Abhängigkeiten über die verschiedenen technischen Disziplinen und Abteilungen des Betriebs hinweg. Es bedarf daher eines Ansatzes zur Komplexitätsbeherrschung von Produktionsanlagen.

**Durchgängiges modellbasiertes Engineering:** Die Entwicklung von Cyber-Physischen Produktionssystemen erfordert eine durchgängige Entwicklung. Entwicklungsartefakte aus Spezifikation, Ausarbeitung und Test müssen verknüpft werden. Grundlage dafür sind Modelle auf verschiedenen Abstraktionsniveaus. Darüber hinaus gilt es, den gesamten Produktlebenszyklus in das durchgängige Engineering einzubeziehen.

**Wissensverlust zwischen den Stakeholdern:** An Planung und Entwicklung von Produktionsanlagen oder einzelnen Produktionssystemen sind eine Vielzahl unterschiedlicher Stakeholder beteiligt. Sie sind durch Abteilungs- und Unternehmensgrenzen getrennt. Die kooperative Arbeit erfolgt typischerweise durch Spezifikationen die häufig unvollständig sind. Um Wissensverlust zu vermeiden, benötigen die Beteiligten ein gemeinsames Systemmodell.

**Flexibilitätssteigerung in der Produktion:** Kleinere Stückzahlen, höhere Variantenzahl und kürzere Produktlebenszyklen erfordern eine steigende Flexibilität von Produktionsanlagen. Die Herausforderung ist, über die selbe Anlage teilweise sehr unterschiedliche Produkte zu schleusen. Dabei wird zunehmend von festen Taktungen abgerückt und mit Hilfe innerer und äußerer Verkettungen ein flexiblerer Einsatz der Ressourcen ermöglicht. Diese Aspekte sind im durchgängigen modellbasierten Engineering zu berücksichtigen.

**Fehlende Transparenz:** Um ein durchgängiges Engineering zu erreichen müssen integrierende und abstrakte Modelle erstellt werden. Hierzu bedarf es eines Vorgehens zur systematischen Informationserhebung. Dies ist auch Grundlage dedizierter Methoden und Werkzeuge für Planungs-, Auslegungs- oder Betriebsaufgaben, deren Einsatz häufig mit hohem initialen Aufwand verbunden ist.

Die beschriebenen Herausforderungen fordern ein modellbasiertes Entwicklungsparadigma, das ein durchgängiges Engineering ermöglicht. Model-Based Systems Engineering ist ein hierfür geeigneter Ansatz. In Literatur und Praxis ist MBSE jedoch bisher nur im Zuge der Entwicklung technischer Produkte zum Tragen gekommen. Es fehlt der Übertrag vom MBSE-Methoden in die Anlagenentwicklung um den spezifischen Herausforderungen dieses Bereichs gerecht zu werden. Werden technische Produkte bspw. typischerweise auf Basis von Funktionsstrukturen und -hierarchien konzipiert, zeichnen sich Produktionsanlagen durch ihren prozessualen Charakter aus. Die Berücksichtigung von Varianten der im System befindlichen Elemente oder die Durchgängigkeit von Produkt, Prozess und Ressource sind weitere differenzierende Merkmale der Modellierung von Produktionsanlagen. Methoden der Mechatronik- und konventionellen Systementwicklung können daher nicht unmittelbar auf die Entwicklung von Produktionsanlagen

übertragen werden [FVF+15], [VGW17]. Es besteht daher **Bedarf** für eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen mit Model-Based Systems Engineering*. In Anlehnung an die Voraussetzungen zur Anwendung von MBSE (Bild 2-20) sind die in Bild 2-24 visualisierten **Bestandteile** notwendig:

**Modellierungskonzept:** Ein Modellierungskonzept gibt vor, aus welchen Aspekten und nach welchen Regeln ein Systemmodell aufgebaut ist. Dazu werden Teilmodelle definiert und die abzubildenden Aspekte zugeordnet. Ferner werden die Zusammenhänge zwischen den Teilmodellen spezifiziert. Zur Beschreibung eines Modellierungskonzepts bedarf es einer für den Anwender leicht zugängliche Beschreibung sowie eine formale Spezifikation.

**Vorgehen:** Systems Engineering benötigt ein Vorgehen, das den Anwender zur Erstellung des Systemmodells anleitet. Mit Hilfe des Vorgehens wird sichergestellt, dass die relevanten Informationen identifiziert und im Modell berücksichtigt werden. Dabei bauen die Inhalte typischerweise sukzessive aufeinander auf. Das Vorgehen gibt dem Anwender geeignete Hilfsmittel wie bspw. Methoden an die Hand um ein effizientes Aufbauen des Systemmodells zu gewährleisten. Zur Beschreibung des Vorgehens ist ein idealtypisches Vorgehensmodell geeignet.

**Werkzeugunterstützung:** Hilfsmittel zur Anwendung von Modellierungskonzept und Vorgehen ist eine entsprechende Werkzeugunterstützung. Sie ermöglicht die Modellierung in der entsprechenden Modellierungssprache und unterstützt idealerweise den Anwender auch gezielt bei der Anwendung des Vorgehens. Grundlage für ein Werkzeug sollte die SysML-Sprache sein, die sich als möglicher Standard und Austauschformat herauskristallisiert.

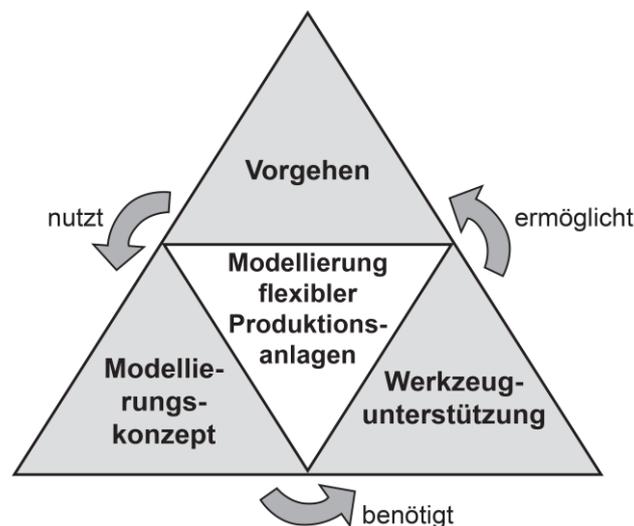


Bild 2-24: Bestandteile eines Ansatzes zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen mit Model-Based Systems Engineering

## 2.7 Anforderungen an die Arbeit

Aus der Problemanalyse resultieren die folgenden Anforderungen an eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen mit Model-Based Systems Engineering*:

**A1) Unterstützung der Planung flexibler Produktionsanlagen:** Bei flexiblen Produktionsanlagen müssen die Verkettung der Ressourcen und die produzierbaren Varianten abgebildet werden. Dies muss sowohl bei der Anlegung des Modellierungskonzepts als auch beim Vorgehensmodell berücksichtigt werden.

**A2) Einbeziehung der installierten Basis:** Produktionsanlagen werden evolutionär weiterentwickelt. Es gilt, neue Technologien einzuführen und gleichzeitig den Wert der installierten Basis zu erhalten. Das Systemmodell soll daher die installierte Basis berücksichtigen. Innerhalb des Vorgehens soll die installierte Basis aufgenommen werden.

**A3) Aufbau eines Systemmodells:** Mit dem Ziel des durchgängigen Engineerings und dem Ansatz des Model-Based Systems Engineerings ist ein Systemmodell zu berücksichtigen. Es enthält Struktur und Verhalten der Produktionsanlage und kann rechnerintern repräsentiert werden.

**A4) Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource:** Ziel des durchgängigen Engineerings ist die Verknüpfung des Produkts, der Prozesse und der ausführenden Ressourcen. Dies gilt es auf einer entsprechenden Abstraktionsstufe zu ermöglichen.

**A5) Frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten:** Die zu produzierenden Produktvarianten stellen einen wesentlichen Komplexitätstreiber bei Planung und Betrieb von Produktionsanlagen dar. Die Frage ist, welche Module oder Produkte unter welchen Bedingungen durch bestimmte Ressourcen produziert werden können. Produktvarianten sind möglichst früh in den Planungsprozess einzubeziehen und mit entsprechenden Modellierungsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

**A6) Grundlage für Kommunikation/ Kooperation:** Das erzielte Systemmodell ist Grundlage für die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Stakeholdern. Es soll daher die für die Zusammenarbeit nötigen Informationen beinhalten. Das Ziel ist dabei ausdrücklich nicht, bestehende Modelle zu substituieren, sondern vielmehr ein integrierendes Modell zu schaffen.

**A7) Werkzeugunterstützung:** Zur effektiven Anwendung von Vorgehensmodell und Modellierungskonzept ist eine entsprechende Werkzeugunterstützung erforderlich. Diese soll auf etablierten MBSE-Werkzeugen umsetzbar sein und den SysML-Standard referenzieren. Grundlage dafür ist der in der SysML vorgesehene Erweiterungsmechanismus.

### **3 Stand der Technik**

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über den Stand der Technik. Die Problemanalyse hat die Notwendigkeit für die Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering aufgezeigt. Entsprechende Anforderungen an eine solche Modellierung wurden abgeleitet. Im Folgenden werden zunächst Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung analysiert (Kapitel 3.1). Sie entspringen häufig aus Bereichen der systematischen Produktionssystemplanung oder der Steuerungs- bzw. Automatisierungstechnik. Aspekte des MBSE werden hier zunehmend integriert. In Kapitel 3.2 werden ergänzend dazu etablierte Methoden des Model-Based Systems Engineering untersucht. Obwohl diese Ansätze aus dem Bereich der Produktentwicklung kommen, haben sie den Anspruch, Systeme im Allgemeinen zu beschreiben. Eine Übertragung auf den Bereich der Anlagenplanung ist zu prüfen. Zuletzt werden in Kapitel 3.3 Ansätze der Prozessbeschreibung analysiert. Sie ermöglichen die Modellierung prozessualer Systeme, die prinzipiell auch Produktionssysteme sein können. Das Kapitel schließt in 3.4 mit dem Vergleich der analysierten Ansätze mit dem Stand der Technik und einer Ableitung des Handlungsbedarfs.

#### **3.1 Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung**

Die Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung lassen sich in Sprachkonzepte und Methoden differenzieren. Die Sprachkonzepte, die in Abschnitt 3.1.1 vorgestellt werden, adressieren die Modellierung von Produktionsanlagen. Fragestellungen sind in diesem Zusammenhang, welche Aspekte oder Partialmodelle für die Modellierung benötigt werden und wie das Modell oder entsprechende Sichten auf ein Produktions-Systemmodell strukturiert sind. Abschnitt 3.1.2 beinhaltet Methoden zur modellbasierten Anlagenplanung. Diese Ansätze stellen die Planung und Konzipierung von Produktionsanlagen in den Fokus, sie sind aber gleichzeitig modellbasiert und berücksichtigen dabei mehr oder weniger stringent auch die Modellierung von Produktionsanlagen im Sinne des Model-Based Systems Engineering.

##### **3.1.1 Sprachkonzepte**

In diesem Abschnitt werden Modellierungsansätze bzw. Modellierungssprachen für die durchgängige Anlagen- und Produktionssystemplanung vorgestellt. Die Ansätze zielen alle auf ein Systemmodell, gehen hierbei allerdings sehr unterschiedlich ins Detail.

###### **3.1.1.1 PPR-Modell nach FELDMANN et al.**

Das PPR-Modell nach FELDMANN et al. entstand im Rahmen des DFG-geförderten Forschungsprojekts „Methode zur Planung komplexer, produktionstechnischer Anlagen mit

zyklischer Verkettung“. Ergebnis war ein Software-Tool zur Planung zyklisch verketteter produktionstechnischer Anlagen [TRD07]. Basis dieses Werkzeugs ist das PPR-Modell, das verknüpfte Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen enthält. Mit diesen Informationen kann ein Systemgenerator Systemkonfigurationen erstellen und es lassen sich Preis-, Kosten- und Leistungsprognosen berechnen [FSB+08].

Ausgangssituation für die Entwicklung des PPR-Modells ist das Spannungsfeld zwischen der Produktentwicklung, die letztlich spezifische Kundenanforderungen umsetzt, und dem Planer einer Produktion, der die geforderten Produkteigenschaften sicherstellen muss, und gleichzeitig zahlreichen Randbedingungen unterworfen ist. Diese können bspw. technologischer oder organisatorischer Natur sein. Es gilt daher, Eigenschaften von Produkt, Prozess und Ressource miteinander zu verknüpfen und in Einklang zu bringen [FSB+08].

Den Ausgangspunkt für die Planung von Produktionssystemen innerhalb des PPR-Modells bildet das **Produkt**. Die für den Planungsprozess relevanten Produktinformationen sind insbesondere gestaltbezogene Merkmale. Dazu zählen u.a. Geometriedaten (z.B. CAD), die Produktstruktur (Stückliste, Vorranggraph) und Materialien. Hinzu kommen auftragsbezogene und technologische Merkmale, die z.B. Oberflächengüte oder Toleranzen betreffen. Die Abbildung des Produkts erfolgt in einer Produktstruktur, in der Einzelteile über Baugruppen bis zum Endprodukt über verschiedene Ebenen zusammengeführt werden. Die Besonderheit der Modellierung ist: Werden zwei oder mehr Baugruppen oder Einzelteile zu einer übergeordneten Baugruppe zusammengefasst, wird dies als Montageschritt interpretiert. Ist auf der unteren Ebene dagegen nur ein Element beschrieben, handelt es sich um einen Bearbeitungsschritt, der jedoch auch ein Prozess sein kann [FSB+08].

Ein **Prozess** setzt sich aus Aktivitäten zusammen, die zur Veränderung eines Objekts beitragen. Bei der Beschreibung eines Prozesses wird neben der Beschreibung des Prozessergebnisses eine Kategorisierung bzw. Typisierung vorgenommen. Es wird unterschieden zwischen Bearbeitungs-, Montage- und Prüfprozess. Außerdem werden wertschöpfende Prozesse (z.B. Verschrauben) von nicht-wertschöpfenden Prozessen (z.B. Werkzeug wechseln) unterschieden [FSB+08].

Die beschriebenen Prozesse werden **Ressourcen** zugeordnet, die diese umsetzen. Im Ressourcenkatalog werden strukturelle und organisatorische Informationen abgelegt, aber auch fertigungsmittelspezifische Angaben wie Einstellparameter, Prozesszeit etc. gemacht. Bild 3-1 zeigt ein PPR-Modell am Beispiel eines Elektromotors.

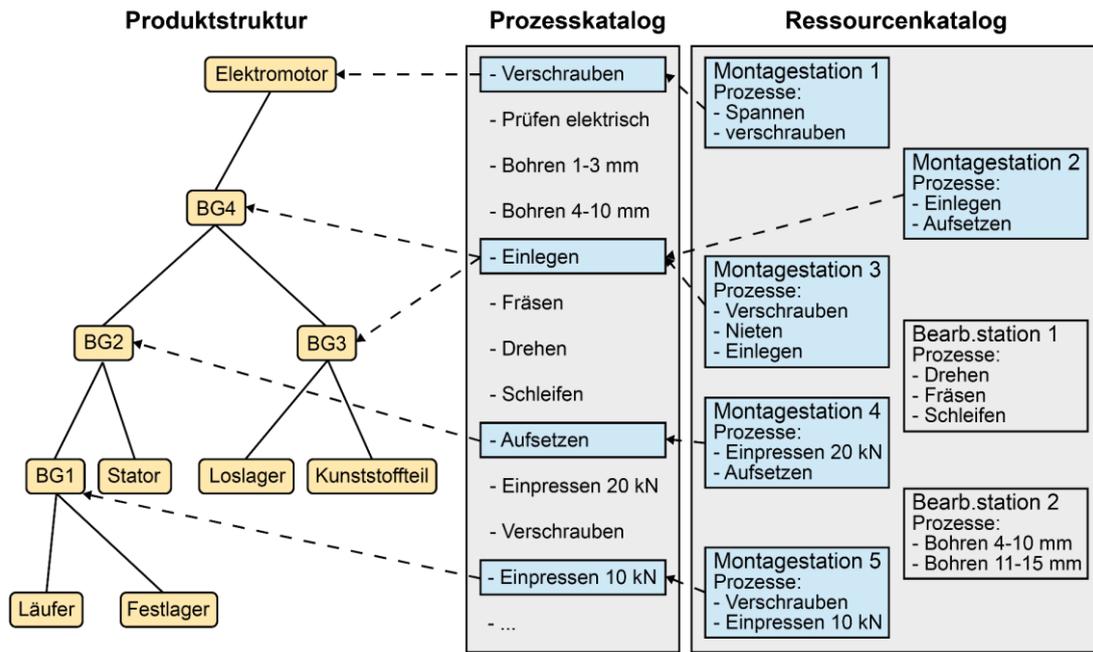


Bild 3-1: PPR Struktur am Beispiel eines Elektromotors [FSB+08]

**Bewertung:** Das PPR-Modell trägt dem Bedarf nach einer integrierten Beschreibung von Produkt, Prozess und Ressource Rechnung. Es integriert sich in einen Planungsprozess für Produktionssysteme. Allerdings adressiert der Ansatz nicht die Bildung eines Systemmodells im eigentlichen Sinne. Die Modellierungsarbeit beschränkt sich auf die Erstellung einer Produktstruktur.

### 3.1.1.2 SysML4Mechatronics nach VOGEL-HEUSER

Der Modellierungsansatz „SysML4Mechatronics“ entstand im SFB 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen“. Die Motivation hierfür war der steigende Anteil der IT bei der Funktionserfüllung in mechatronischen Systemen. Ziel ist, Zusammenhänge und Interaktionen der Komponenten der verschiedenen beteiligten Disziplinen mechatronischer Systeme zu modellieren. Der Modellierungsansatz ist dabei als Erweiterung der SysML 1.3 angelegt. Während die SysML komplexe Systeme im Allgemeinen adressiert, ist SysML4Mechatronics auf mechatronische Systeme zugeschnitten. Dies äußert sich bspw. durch die explizite Berücksichtigung von Mechanik-, E/E- und Software-Sichten. Ein wesentlicher Kern der SysML4Mechatronics-Modellierungssprache ist die Möglichkeit, die Schnittstellen zwischen Komponenten bzw. Systemelementen mittels Ports zu spezifizieren. Dabei werden die Schnittstellen in unterschiedlichen Disziplinen berücksichtigt [Vog17-ol].

KERNSCHMIDT und VOGEL-HEUSER schlagen mit dem Modellierungsansatz auch die Brücke hin zur Anwendung in Produktionsanlagen. Produktionssysteme werden dabei als mechatronische Systeme angesehen. Die insbesondere zu berücksichtigenden Automatisierungskomponenten lassen sich mit dem Ansatz ebenso abbilden. Kern des

Modellierungsansatzes ist die Bildung verschiedener Sichten: Mechanik, E/E und Software. Die Schnittstellen der modellierten Systemelemente bzw. Komponenten werden mit Interface-Blöcken typisiert. Diese enthalten wiederum Flusseigenschaften (im Falle von Mechanik oder E/E Komponenten) oder Methoden/ Operationen (bei Software-Komponenten). Ist eine Komponente in verschiedenen Sichten relevant, wird sie in mehreren Sichten modelliert, jedoch in jeder Sicht nur mit den dort relevanten Ports. Ein Beispiel hierfür ist ein Sensor, der gestaltbehafet ist, jedoch gleichzeitig elektrisch versorgt und softwaretechnisch angesprochen wird. Die Kompatibilität der miteinander verbundenen Schnittstellen kann über deren Typisierung sowie über die passende Richtung der Ports (ein- und ausgehend oder konjugiert und nicht-konjugiert) geprüft werden. Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der Sichten und ihrer Kompatibilitätsanforderungen [KV13].

Tabelle 3-1: Übersicht der Sichten und ihrer Kompatibilitätsanforderungen [KV13]

Sicht	Verbindungstyp	Kompatibilitätsanforderung
Mechanik	Mechanisch	Port zu Port (Ausführung des Tests im disziplinspezifischen Modell)
E/E	Elektrisch (Leistung)	Port zu konjugiertem Port
	Kommunikation	Port zu konjugiertem Port oder Port zu Port. Abhängig von der Kommunikationsmethode
Software	Logisches Interface	Benötigte Methode zu bereitgestellter Methode

Die Modellierung der beschriebenen Aspekte erfolgt im SysML-IBD Diagramm. Das so angefertigte Modell ist insbesondere zur Nutzung im Falle von Änderungen geeignet. Die Kompatibilitätsprüfung stellt die Gültigkeit einer Änderung sicher. Bild 3-2 zeigt ein vereinfachtes Beispiel eines SysML4Mechatronics-Modells.

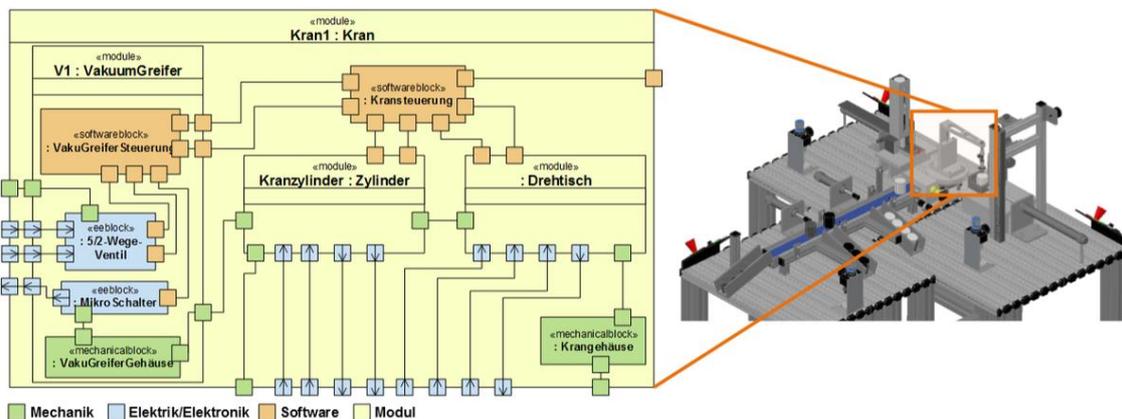


Bild 3-2: Beispiel eines SysML4Mechatronics Modells einer Pick-and-Place-Einheit [Vog17-ol]

**Bewertung:** SysML4Mechatronics ist ein überzeugender Ansatz zur Modellierung von Produktionsmaschinen. Das Sichtenkonzept adressiert die Anforderungen an die Spezifikation von mechatronischen Systemen und insb. von Automatisierungsanlagen. Allerdings fehlt dem Ansatz der auf Anlagenebene relevanten Materialfluss als weitere Sicht. Er würde es erlauben, Produkte, Prozesse und Ressourcen zu verknüpfen.

### 3.1.1.3 Sichtenkonzept nach SCHAEFER et al.

SCHAEFER et al. stellen ein Sichtenkonzept vor, das die modellbasierte Entwicklung und Analyse evolvierender Produktionsanlagen unterstützt. Dabei handelt es sich um einen Modellierungsansatz, der die Komplexität der Anlage mittels unterschiedlicher Sichten handhabbar macht. Ausgangspunkt des Konzepts bildet die Prämisse, dass Produktionsanlagen für eine lange<sup>15</sup> Lebensdauer entwickelt werden. Um auch zukünftige Kundenanforderungen abdecken zu können, wird die Anlage variabel gestaltet und über die Zeit verändert. Der Modellierungsansatz macht die resultierende Komplexität im Hinblick auf Management, Steuerung und Wartung der Anlage beherrschbar [KPS+14].

Der Modellierungsansatz sieht die Modellierung von drei Sichten vor, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Anlage adressieren und deren Modellinhalte miteinander verknüpft sind. Bild 3-3 visualisiert die drei Sichten und ihre Verknüpfung.

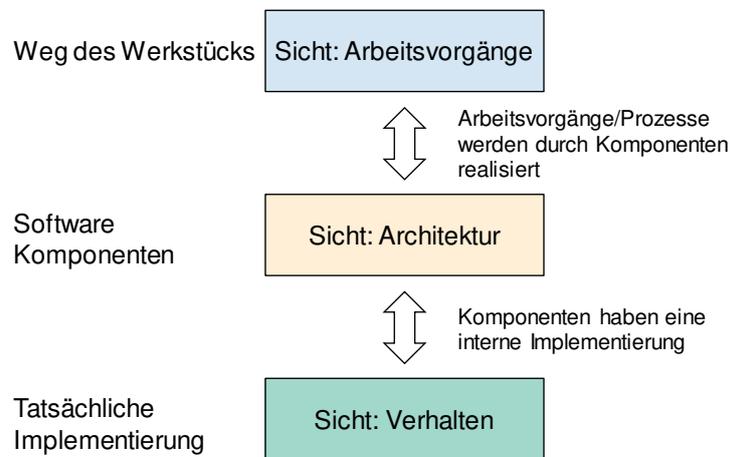


Bild 3-3: Sichtenkonzept nach SCHAEFER et al. [KLL+14]

In der Sicht **Arbeitsvorgänge** (Workflow Viewpoint) werden die technischen Prozesse beschrieben, die die Anlage realisiert, sowie der Weg des Werkstücks durch die Anlage. Dazu wird ein UML-Aktivitätsdiagramm verwendet. Die Sicht **Architektur** (Viewpoint Architecture) beschreibt die logische Struktur der Anlage. Hier werden Sensoren, Aktoren und andere Systemelemente modelliert. Die Kommunikation und Interaktion zwischen Systemelementen wird durch Ports und entsprechende Konnektoren beschrieben. Zur Modellierung werden Block-Diagramme erstellt, die auf UML-

<sup>15</sup> Im Verhältnis zu den PLZ der produzierten Produkte.

Komponentendiagrammen basieren. Die Implementierung der logischen Elemente wird in der **Verhaltenssicht** (Behavior Viewpoint) beschrieben. Dazu werden Zustandsdiagramme angefertigt. Die Verknüpfung zwischen den Sichten wird durch Wiederverwendung der Modellelemente bzw. deren Namen erreicht [KPS+14].

Um Varianten zu beherrschen, wird das Sichtenkonzept mit dem Ansatz der „Delta-Modellierung“ kombiniert. Zur Beschreibung eines Deltas stehen drei Operationen zur Verfügung: Hinzufügen, Entfernen und Verändern. So können, ausgehend von einem Basismodell, Varianten beschrieben werden. Die Delta-Modellierung ist in allen drei Sichten möglich. Somit können bspw. Produktvarianten in der Sicht Arbeitsvorgänge beschrieben werden. Eine Variante der Anlage wird in der Architekturebene beschrieben. Die Beschreibung von Varianten erfolgt also unter Zuhilfenahme eines Versionierungssystems und nicht explizit durch Modellierung [KPS+14].

**Bewertung:** Das Sichtenkonzept ist geeignet, um die Komplexität einer Produktionsanlage beherrschbar zu machen. Es berücksichtigt dabei das Werkstück, die Anlagenarchitektur und die konkrete Implementierung von Systemelementen. Dabei legt der Ansatz einen Fokus auf die Implementierung der Steuerung bzw. der Software. Durch den Kunstgriff der Delta-Modellierung gelingt es, Varianten zu berücksichtigen. Diese werden jedoch nicht explizit modelliert. Der Ansatz liefert daher kein ganzheitliches Systemmodell im eigentlichen Sinne, das auch Produktvarianten explizit macht.

#### 3.1.1.4 Integrative Spezifikation von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER et al.

Gausemeier et al. beschreiben einen Ansatz zur integrierten modellbasierten Spezifikation von Produkt- und Produktionssystem. Dieser basiert auf der Spezifikationstechnik CONSENS, die nachfolgend erläutert wird. Anschließend wird die integrierte Spezifikation des Produktionssystems vorgestellt.

##### **Spezifikationstechnik CONSENS**

Die Spezifikationstechnik CONSENS – „CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems“ ermöglicht die disziplinübergreifende Beschreibung technischer Systeme [GLL12, S.89]. Der CONSENS-Sprache liegt das Verständnis zu Grunde, dass sich die Prinziplösung eines mechatronischen Systems durch verschiedene Partialmodelle beschreiben lässt, die untereinander zwar keine Schnittmengen, aber mehr oder weniger starke Verknüpfungen aufweisen. Jedes Partialmodell beschreibt dabei einen speziellen Aspekt und folgt dafür zugeschnittenen Modellierungsregeln. Bild 3-4 sind die Aspekte von CONSENS zu entnehmen [GFD+08]. Dabei gliedert sich die Methodik in zwei Abschnitte: Analyse und Synthese.

In der **Analysephase** wird das Umfeld des Systems beschrieben. Dabei wird das eigentliche System als „Black-Box“ angenommen und das Augenmerk vollständig auf die Umgebung, in der das System arbeitet, gerichtet. Es werden zunächst alle **Umfeld**elemente

aufgenommen, die auf das System wirken, bzw. auf welche das System wirkt. Die Beziehungen zwischen System und Umfeld werden durch Energie-, Stoff- und Informationsflüsse dargestellt. Mit Hilfe von **Anwendungsszenarien** wird das Verhalten des Systems anschließend prosaisch grob beschrieben. Dazu kann auf das zuvor erstellte Umfeldmodell Bezug genommen werden, denn Szenarien ergeben sich aus konsistenten Kombinationen von Einflussausprägungen. Wichtig ist, die Ausgangssituation, in der das Szenario zur Anwendung kommt, zu beschreiben, sowie das gewünschte Verhalten des Systems. Die Analysephase mündet in die Dokumentation der **Anforderungen**. Diese können z.B. in Fest- oder Wunschanforderungen oder in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen kategorisiert werden. Bei der Dokumentation hilft die Gruppierung nach Gesichtspunkten wie Geometrie, Leistung, aber auch Inbetriebnahme oder Recycling (siehe bspw. Assoziationsliste nach Pahl/Beitz [PBF+07]).

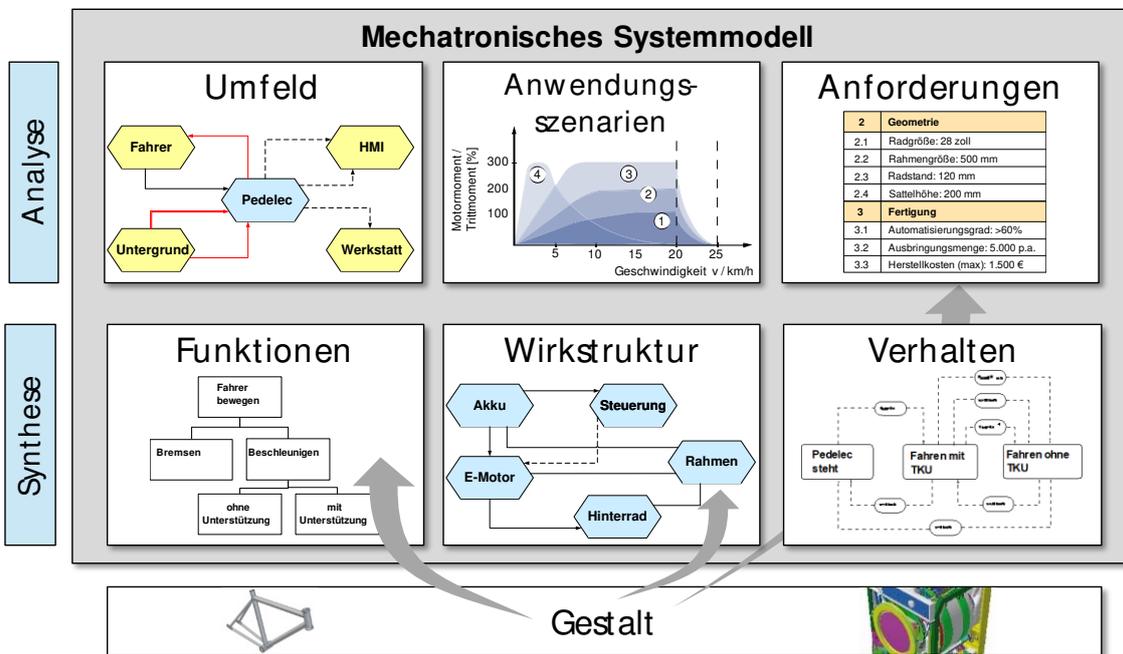


Bild 3-4: Aspekte der CONSENS-Sprache für ein Systemmodell

In der **Synthesephase** werden **Funktionen**<sup>16</sup> des Systems in Form einer Funktionshierarchie beschrieben. Dabei gilt, dass die Unterfunktionen ihre entsprechende, übergeordnete Funktion genau erfüllen müssen. Zu den identifizierten Funktionen lassen sich dann Lösungen zuordnen, die als Systemelemente in ihrer Summe das System darstellen. In der **Wirkstruktur** werden Systemelemente sowie deren Beziehungen zueinander abgebildet. Hier wird wie bereits im Umfeldmodell auf Energie-, Stoff- und Informationsflüsse

<sup>16</sup>Eine Funktion ist „der gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“ [PBF+07, S.44].

zurückgegriffen. Das Verhalten des Systems wird in verschiedenen **Verhaltens**modellen beschrieben, die der UML<sup>17</sup> entlehnt sind (Zustände, Aktivitäten, Sequenzen).

Die Modellierung der **Gestalt** wird nur auf einem rudimentären Niveau vollzogen. Im Vordergrund stehen dabei Wirkflächen, Bauräume und Tragstrukturen.

Mit dem Mechatronic Modeller existiert ein Werkzeug zur Abbildung der Sprache [Dor12]. Auch die Nutzung von SysML-Werkzeugen ist mit einem entsprechenden SysML4CONSENS Profil möglich [IKD+13].

### **Integrative Spezifikation des Produktionssystems**

GAUSEMEIER et al. entwickelten eine integrierte Spezifikation von Produkt und Produktionssystem auf der Basis von CONSENS. Dazu wird ein Systemmodell des Produktionssystems angelegt und mit dem des zu produzierenden Systems in Beziehung gesetzt. Die vier dafür nötigen Partialmodelle des Produktionssystems werden nachfolgend erläutert.

Mit dem Partialmodell **Anforderungen** ist die rechnerinterne Repräsentation der Anforderungen an das Produktionssystem gemeint. Sie erfolgt typischerweise in einer Baumstruktur bzw. einer Liste. Idealerweise werden Anforderungen an Produkt und Produktionssystem gemeinsam dokumentiert [GBR10, S. 717].

Im Partialmodell **Prozessfolge** wird die Montage- und Fertigungsreihenfolge festgelegt. Die Beschreibung bezieht sich nur auf die Arbeitsvorgänge bzw. Prozesse, ungeachtet der Zuordnung zu Ressourcen. An die Arbeitsvorgänge können konkretisierende Attribute (Prozessparameter) annotiert werden. Eingang und Ausgang der Prozessschritte werden durch Materialelemente charakterisiert. Sie beschreiben Rohstoffe, Zulieferteile oder Systemelemente des zu produzierenden Systems [GBR10, S. 717].

Das Partialmodell **Ressourcen** beschreibt, welche konkreten Ressourcen in der Anlage verwendet werden. Die Ressourcen realisieren die zuvor definierten Prozesse und werden entsprechend zugeordnet. Dabei kann eine Ressource auch mehrere Prozesse realisieren. Die Verkettung der Ressourcen erfolgt durch Materialflüsse [GBR10, S. 717].

Die **Gestalt** des Produktionssystems wird in einem weiteren Partialmodell definiert. Die Gestalt bezieht sich dabei auf Arbeitsräume, Platzbedarfe von Maschinen oder die Arbeitsbereiche von Handhabungseinrichtungen. Für die Modellierung kann dabei auf CAD-Systeme zurückgegriffen werden, es können aber auch Listen mit Flächenbedarfen oder Skizzen verwendet werden [GBR10, S. 717].

Die Erarbeitung des Systemmodells des Produktionssystems ist dabei integrativ zur Erstellung des Produktmodells vorzunehmen. So können Einflüsse und Abhängigkeiten frühzeitig identifiziert und berücksichtigt werden. Auf Basis des vorgestellten Ansatzes

---

<sup>17</sup>UML – „Unified Modeling Language“ ist eine grafische Modellierungssprache, mit der Struktur und Verhalten eines Systems, vornehmlich eines Softwaresystems, beschrieben werden können [Omg11].

beschreibt NORDSIEK eine Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen [Nor12]. BRANDIS legt darüber hinaus eine Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage vor [Bra14]. Er geht darin auf die Herleitung der Montagefolge ein, berücksichtigt allerdings keine verfahrenstechnischen Aspekte.

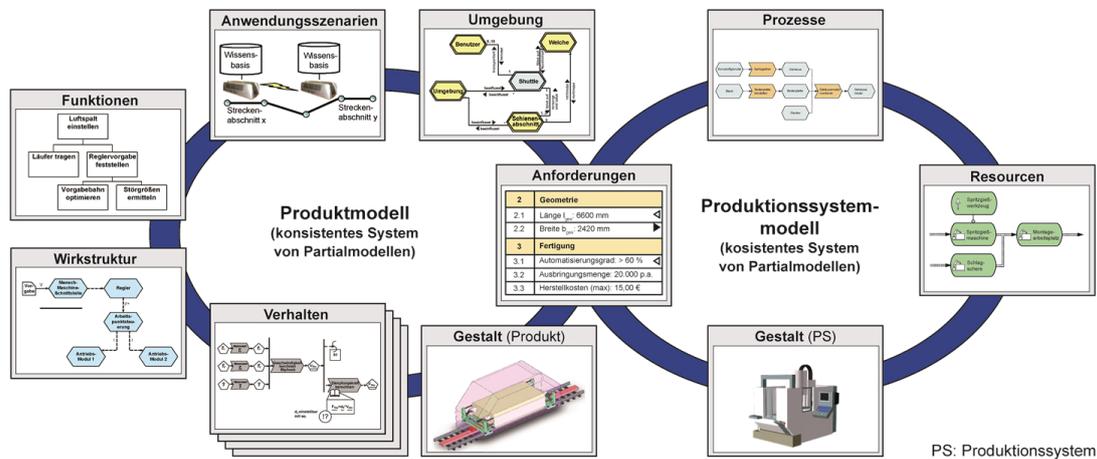


Bild 3-5: Partialmodelle für die integrative Spezifikation von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER et al. [KNT09, S.32]

**Bewertung:** Die Spezifikationstechnik CONSENS ist stark an einem entwicklungsmethodischen Vorgehen orientiert, bei dem einzelne Aspekte dezidiert beschrieben werden. Die genutzten modellierungssprachlichen Elemente wurden aus der methodischen Anwendung heraus entwickelt. Die Methodik zielt auf komplexe mechatronische Systeme.

Mit der integrativen Spezifikation von Produkt- und Produktionssystem wird eine Verknüpfung von Produktionsressource und dem zu produzierenden Produkt hergestellt. Die Spezifikationstechnik ermöglicht die Beschreibung von Prozessen und Ressource. Jedoch bezieht sich das Systemmodell lediglich auf die Konzeption eines spezifischen Produkts und des dazugehörigen Produktionssystems. Insbesondere Produktvarianten, aber auch Aspekte der Flexibilität bleiben unberücksichtigt.

### 3.1.1.5 Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse in der Produktion nach SCHOLZ-REITER

SCHOLZ-REITER et al. beschreiben einen Ansatz zur Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse. Obgleich hier logistische Prozesse im Besonderen fokussiert werden und keine Verallgemeinerung auf alle Prozesse der Produktion vorgenommen wird, ist der Ansatz vor dem Hintergrund der Selbststeuerung in dieser Arbeit relevant. Die entscheidenden und im Ansatz adressierten Merkmale der Selbststeuerung sind: Heterarchie, dezentrale Entscheidungsfindung und Interaktion autonomer Systemelemente [SKH+06].

Der Begriff der „Heterarchie“ ist als Komplement zur „Hierarchie“ zu verstehen. Die Systemelemente der Produktionsanlage befinden sich auf einer Ebene. Entscheidungsprozesse können nicht zentral „von oben“ vollzogen werden, sondern erfolgen dezentral.

Die dezentrale Entscheidungsfindung erfordert dabei aber auch die prinzipielle Fähigkeit der Entscheidungsfindung auf Seiten der Systemelemente. Dazu sind die verfolgten Ziele abzuwägen und zugrundeliegende Parameter und Eingangsgrößen zu berücksichtigen [SKH+06].

Zur Modellierung eines Systems sieht das Modellierungskonzept eine Modellierung auf Makro- und Mikroebene vor – also auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen des Systems. Ferner bringt es ein dediziertes Metamodell mit einem entsprechenden Vorgehensmodell in Einklang. Grundlage des Konzepts ist dabei ein Sichtenkonzept.

Das Sichtenkonzept (Bild 3-6) sieht die zwei Bestandteile „Statisches Modell“ und „Dynamisches Modell“ vor. Im Bereich des **statischen Modells** wird zunächst die **Struktur** als Ausgangspunkt des Modells modelliert. Dargestellt werden die relevanten logistischen Objekte mit Hilfe von UML-Klassendiagrammen<sup>18</sup>. Dabei werden Klassen und Objekte modelliert und Assoziationen oder Vererbungsbeziehungen verwendet. Den zweiten Bestandteil des statischen Modells bildet die **Wissenssicht**. Dort wird das Wissen beschrieben, das für eine dezentrale Entscheidungsfindung vorhanden sein muss. Für eine einfache Darstellung reicht die Verwendung von UML-Klassendiagrammen aus. Für komplexere Zusammenhänge wird auf eine dedizierte Sprache zur Wissensrepräsentation verwiesen (z.B. [Sow99]). Die dritte Sicht im Bereich des statischen Modells bildet die **Fähigkeiten-Sicht**. Hier werden die Fähigkeiten der einzelnen logistischen Objekte dargestellt. Die Fähigkeiten sind dabei als Problemlösungsmethoden anzusehen, und als abstrahierte Lösungsstrategie für in der Realität auftretende Probleme zu verstehen [SKH+06].



Bild 3-6: Sichtenkonzept für die Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse nach SCHOLZ-REITER [SKH+06]

Im Bereich des **dynamischen Modells** werden zwei Sichten unterschieden: Die **Prozesssicht** und die **Kommunikationssicht**. Die **Prozesssicht** stellt die zeitlogische Abfolge von Aktivitäten und Zuständen der logistischen Objekte dar. Hierin können insb. Entscheidungsprozesse der Objekte modelliert werden. Die Prozesssicht ist außerdem das Mittel, um die Sichten des statischen Modells mit dem Verhalten des Systems zu verknüpfen – insb. werden hier die Verknüpfungen der logistischen Objekte dargestellt. Für die Modellierung werden Aktivitäts- und Zustandsdiagramme verwendet. Die

<sup>18</sup> Für eine Erläuterung von Klassendiagrammen sei auf [OMG11] verwiesen.

**Kommunikationssicht** stellt Inhalt und Abfolge des Informationsaustauschs zwischen den logistischen Objekten dar. Für die Modellierung werden Sequenzdiagramme verwendet [SKH+06].

Zusätzlich zu dem beschriebenen zweiteiligen Modell wird zwischen einer Mikro- und einer Makrosicht unterschieden. Die Mikrosicht beschreibt die Abläufe innerhalb der selbststeuernden logistischen Objekte. Für sie sind insb. die Prozess-, Wissens- und Fähigkeitensicht relevant. Die Makroebene auf der anderen Seite beschreibt die Interaktion zwischen den einzelnen Objekten. Sie stellt also eine Sicht auf das gesamte System mit seinen logistischen Objekten und ihren Interaktionen dar. Für diese Sicht sind alle beschriebenen Modellierungssichten sinnvoll.

**Bewertung:** SCHOLZ-REITER et al. beschreiben einen Ansatz zur Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse. Zwar zielt der Ansatz explizit auf logistische Prozesse. Eine Übertragung auf Produktionsprozesse im Allgemeinen ist jedoch vor dem Hintergrund, dass autonome Objekte beschrieben werden, denkbar. Bei der konkreten Modellierung der einzelnen Sichten bleiben die Autoren allerdings im Vagen und verweisen auf gängige Techniken der UML. Für den Anwender bleiben daher Fragen bspw. nach dem nötigen Detailgrad, dem Modellierungsvorgehen im Allgemeinen oder auch den zu ziehenden Verknüpfungen im Speziellen offen.

### 3.1.2 Methoden zur modellbasierten Anlagenplanung

In diesem Abschnitt werden Methoden zur modellbasierten Anlagenplanung aufgeführt. Die Ansätze beziehen sich zwar auch auf die modellhafte Beschreibung einer Anlage. Es steht jedoch die Vorgehens- bzw. Entwicklungssystematik im Vordergrund.

#### 3.1.2.1 Modellierungsmethodik für Produktionsanlagen nach BASSI et al.

BASSI et al. stellen eine ebenfalls auf der SysML basierende Modellierungsmethodik für Produktionsmaschinen vor. Sie nehmen allerdings keine Änderungen bzw. Erweiterungen der SysML vor. Ziel der Methodik ist ein Systemmodell für Produktionsanlagen, das zur Komplexitätsbeherrschung dient und geeignet ist, unterschiedlichste Informationen über die Anlagen zusammenzuführen [BSB+11].

Die Modellierungsmethodik sieht ein Systemmodell mit drei Ebenen vor: Detaillevel, Globales Levels und High Level. Das **Detaillevel** beinhaltet das Verhalten der Teilsysteme. Hierfür werden die geeigneten Verhaltens- und Simulationsmodelle genutzt und in entsprechenden Tools angewendet. Auf dieser Ebene sind ggf. hohe Rechenkapazitäten erforderlich. Auf dem **Globalen Level** wird die Dynamik der Anlagen im Ganzen analysiert. Stellenweise können hierfür die Modelle des Detaillevels wiederverwendet bzw. integriert werden. Andernfalls ist eine entsprechende Transformation in die Formalismen auf der globalen Ebene erforderlich. Auf dem **High Level** werden die Modellfragmente

zusammengeführt. Es werden hier Funktionen und Anforderungen beschrieben und mit den detaillierteren Modellen verknüpft.

Die Entwicklungsarbeit für eine Produktionsanlage wird in drei wesentliche Phasen unterteilt, die in iterativen Schleifen nacheinander durchlaufen werden. Das Vorgehen wird in Bild 3-7 visualisiert.

In der **Elaboration Phase** wird das High Level-Modell adressiert. Hier werden zunächst Use Cases beschrieben bzw. – handelt es sich nicht um den ersten Durchlauf des Vorgehens – verfeinert. Die SysML bietet hierfür die geeigneten sprachlichen Mittel (insb. extend und include Beziehungen). Außerdem werden die Anforderungen modelliert. Dazu findet eine Dekomposition der Anforderungen von abstrakten hin zu konkreteren Sub-Anforderungen statt. Dies kann in einer Baumstruktur festgehalten werden. Die Anlagenstruktur wird parallel dazu mit Hilfe eines Block-Definitions-Diagramms (BDD) modelliert. Es beinhaltet die „Building Blocks“, die die Funktionalität des Systems umsetzen. Seine Stärke entfaltet dieses Modell insbesondere in einer längerfristigen Perspektive, wenn es etwa zur Wiederverwendung oder Ableitung von Bestandteilen der Anlage kommt. Im internen Blockdiagramm wird schließlich die abstrakte Struktur des Systems beschrieben. Dabei werden die Schnittstellen durch Ports beschrieben [BSB+11].

Die **Composition Phase** umfasst drei Hauptaufgaben. Zunächst werden die Anforderungen mit der abstrakten Systemarchitektur verknüpft. Jede Anforderung muss dabei mit dem Block-Diagramm verknüpft werden. Anschließend werden die Level der Modell-Hierarchie miteinander in Beziehung gesetzt. Dazu werden Module definiert, die aus unterschiedlichen Modellen bestehen können. Auf diesem Weg können die unterschiedlichen ausführbaren Modelle in das abstrakte Modell integriert werden. Schließlich werden verschiedene alternative High-Level Modelle erstellt, falls unterschiedliche Lösungen zum Aufbau der Anlage zur Verfügung stehen.

In der dritten Phase, der **Validation Phase**, werden Fehler und Inkonsistenzen identifiziert, die im Design-Prozess entstehen könnten. Es werden zunächst syntaktische Prüfungen durchgeführt, mit denen die Richtigkeit des Modells selbst sichergestellt wird. Anschließend wird geprüft, ob die Anforderungen tatsächlich erfüllt sind. Hierzu werden die Zielwerte der Anforderungen mit den Leistungsmerkmalen der zugeordneten Blöcke abgeglichen. Wenn eine Prüfung durchgeführt wurde, wird eine Validation-Note angelegt, die eine Aussage über das Ergebnis macht. Wird eine der Prüfungen nicht bestanden, wird das vorliegende Modell als nicht-valide angesehen und ein weiterer Durchlauf des Vorgehens vorgenommen.

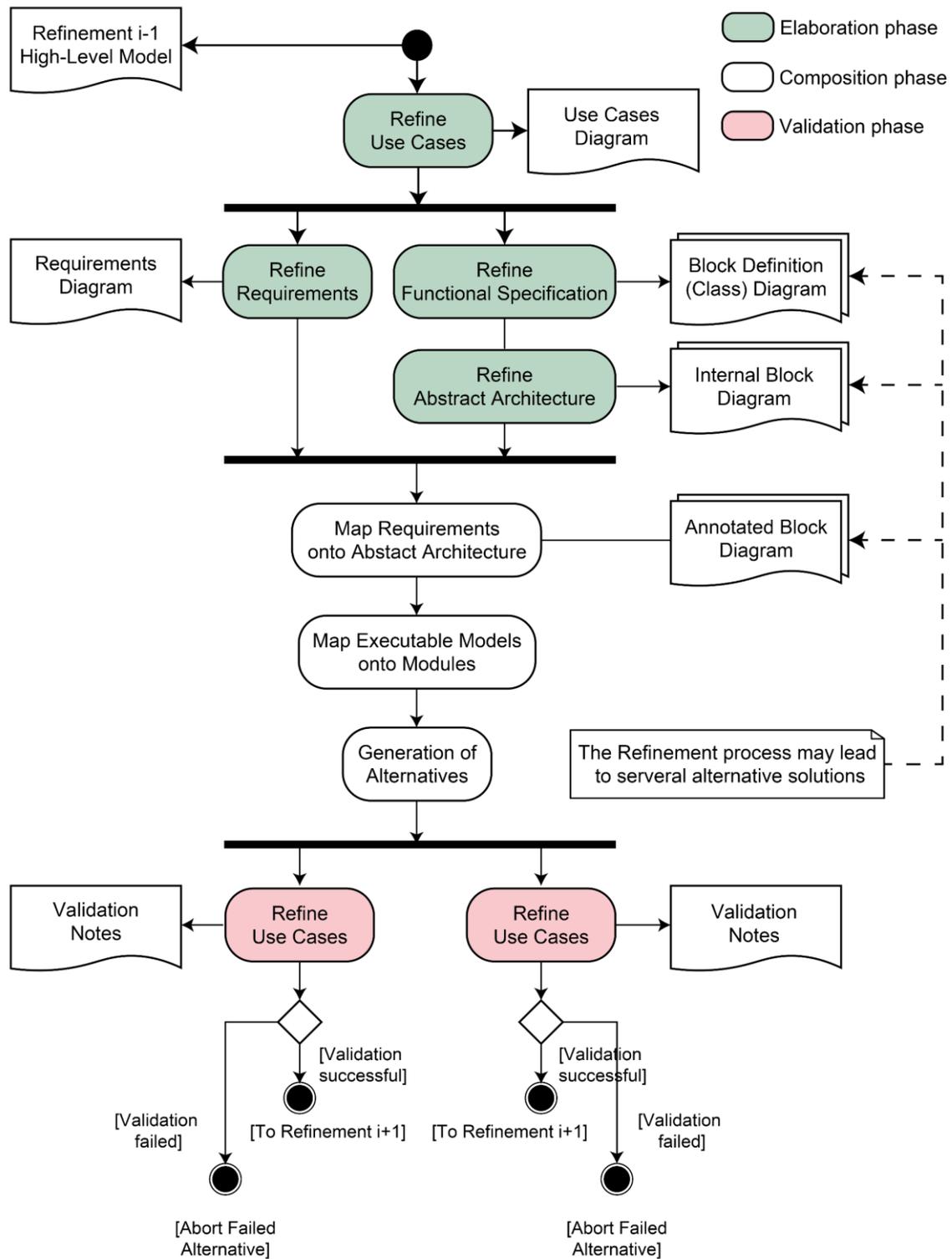


Bild 3-7: Modellerstellung nach BASSI et al. im Sinne iterierender Durchläufe entlang des Produktionsanlagenentwurfs [BSB+11]

**Bewertung:** Das Vorgehen nach BASSI et al. richtet sich an die Entwicklung von Produktionsanlagen und bezieht dabei die SysML ein. Beim Vergleich mit anderen Methoden der Systemerstellung, die im Kontext des MBSE bekannt sind, lassen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die Methodik geht nicht auf die Verknüpfung von

Produkt, Prozess und Ressource ein, sondern leitet die lösungsneutrale Beschreibung der Anlage über Use Cases her.

### 3.1.2.2 Entwicklungsprozess für verteilte Automatisierungssysteme nach FAY et al.

FAY, VOGEL-HEUSER, DIEDRICH et al. stellen einen Entwicklungsprozess für verteilte Automatisierungssysteme vor, der in Bild 3-8 visualisiert ist. Handlungsbedarf für einen solchen Prozess ergab sich, da Ansätze der Mechatronikentwicklung nicht direkt auf Automatisierungssysteme übertragbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere die frühe Phase, die Anforderungserhebung, Systementwurf usw. umfasst, relevant. Sie wird im Folgenden fokussiert [FVF+15].

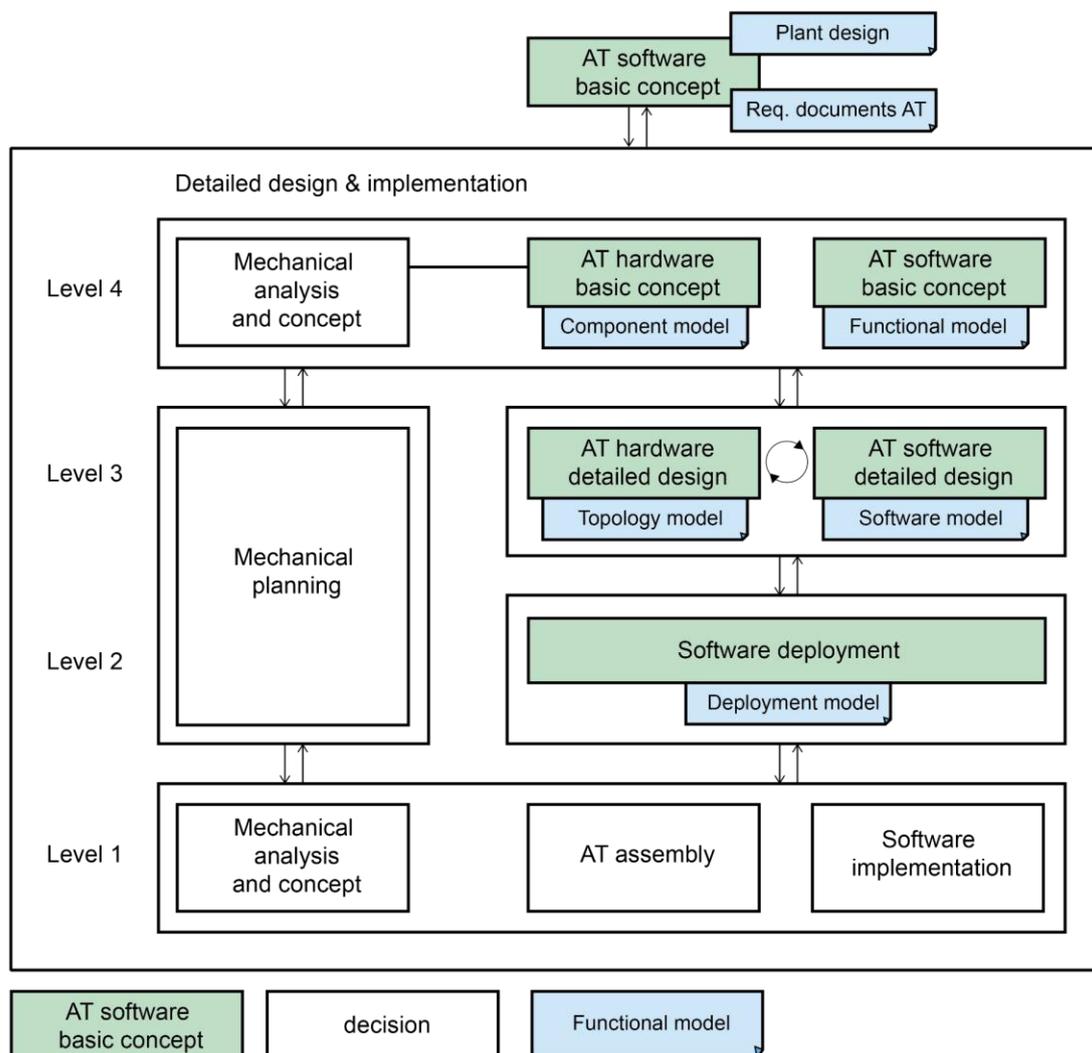


Bild 3-8: Entwicklungsprozess für verteilte Automatisierungssysteme [FVF+15]

Der Entwicklungsprozess erstreckt sich über vier Ebenen. Auf Ebene 4 werden die funktionalen und technologieunabhängigen Aspekte des Systems beschrieben. Auf Ebene 3

wird die logische Struktur des Systems fokussiert. In Ebene 2 werden die technologiespezifischen Strukturen und die Verteilung des Systems spezifiziert. Ebene 1 detailliert die eigentliche Implementierung des Systems. Im Folgenden werden die beiden oberen Ebenen 3 und 4 näher beleuchtet. Den Ausgangspunkt des Vorgehens bildet die Anforderungsanalyse. Die Anforderungsbeschreibung besteht aus textuellen Beschreibungen und Listen, aber auch aus graphischen Beschreibungen. Sie betreffen bspw. das Anlagenlayout oder andere nicht-funktionale und funktionale Anforderungen [FVF+15].

Auf der **Ebene 4** wird dann das mechanische Konzept erstellt sowie die Automatisierung auf Hard- und Softwareebene konzipiert. Für die Modellierung wird SysML vorgeschlagen. Die Anforderungen werden mit dem entsprechenden Requirements-Diagramm modelliert und mit Validierungsbeziehungen den Systemfunktionen zugeordnet. Die Funktionen selbst werden in Form von Funktionsstrukturen beschrieben und in den entsprechenden Block-Diagrammen modelliert.

**Ebene 3** beschreibt nun das interne Verhalten der Funktionen und ihrer Schnittstellen. Dies kann sowohl für den Bereich Mechanik als auch für die Software erfolgen. Idealerweise ist ein iteratives Vorgehen zu wählen, da sich die Bereiche gegenseitig beeinflussen. Auf der Ebene wird die Block-Modellierung weitergeführt, die auch die Modellierung von Ports als Schnittstellen ermöglichen. Stereotypen wie „Sensor“, „Actuator“ und „Node“ werden zudem eingeführt. Sie dienen der dedizierten Beschreibung der entsprechenden Elemente.

Es entsteht somit ein SysML-basiertes Systemmodell, das Aspekte der Mechanik und der Steuerungs-Soft- und Hardware integriert. Für weitere Details sei auf [FVF+15] verwiesen.

**Bewertung:** Der Entwicklungsprozess nach FAY et al. ermöglicht die Integration der an der Entwicklung beteiligten Disziplinen, insb. die der Steuerungstechnik. Er grenzt sich dadurch von anderen MBSE-Methoden ab und adressiert explizit Produktionsanlagen. Gleichwohl sind die Anwender der Methode die System- und Komponentenentwickler. Andere mögliche Anwender wie ein Anlagenplaner oder -betreiber werden nicht berücksichtigt.

### 3.1.2.3 MecPro<sup>2</sup> Referenzprozess für Cybertronische Produktionssysteme

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme“ – mecPro<sup>2</sup> entstand ein modellbasierter Entwicklungsprozess für cybertronische Systeme (CTS). Diese werden in cybertronischen Produkten und Produktionssysteme weiter differenziert. Unter cybertronischen<sup>19</sup> Systemen werden cyber-physische Systeme verstanden, die mindestens ein

---

<sup>19</sup> Der Begriff „Cybertronik“ ist ein Kofferwort, das sich aus den Begriffen „Cyber“ und „Mechatronik“ zusammensetzt.

mechatronisches System nach VDI 2206 enthalten [CMH15, S.3]. Sie zeichnen sich insbesondere durch ihre Fähigkeit zur Vernetzung und Kommunikation sowie durch ihre Autonomie aus. Cybertronische Produkte dienen Nutzern; es handelt sich dabei bspw. um ein autonomes Fahrzeug. Werden solche Systeme auf die Produktion übertragen, werden diese als cybertronische Produktionssysteme bezeichnet [CMH15], [EKM17].

Die Grundlage des Entwicklungsprozesses bilden einzelne Prozessmodule. Diese bestehen jeweils aus einigen Aktivitäten, die im Prozessmodul zu durchlaufen sind. Die Aktivitäten wiederum werden durch Deskriptoren wie Ziel, Prozessrolle, Trigger usw. beschrieben. Bild 3-9 zeigt das aus 17 Prozessmodulen bestehende Entwicklungsprozessrahmenwerk, das der Planung von cybertronischen Produktionssystemen dient. Es bedient sich etablierter Planungsschritte wie „Produktionsprogrammplanung durchlaufen“, enthält aber auch CTS-spezifische Prozessmodule. Drei zentrale CTS-relevante Prozessmodule werden nachfolgend erläutert [ASM+15].

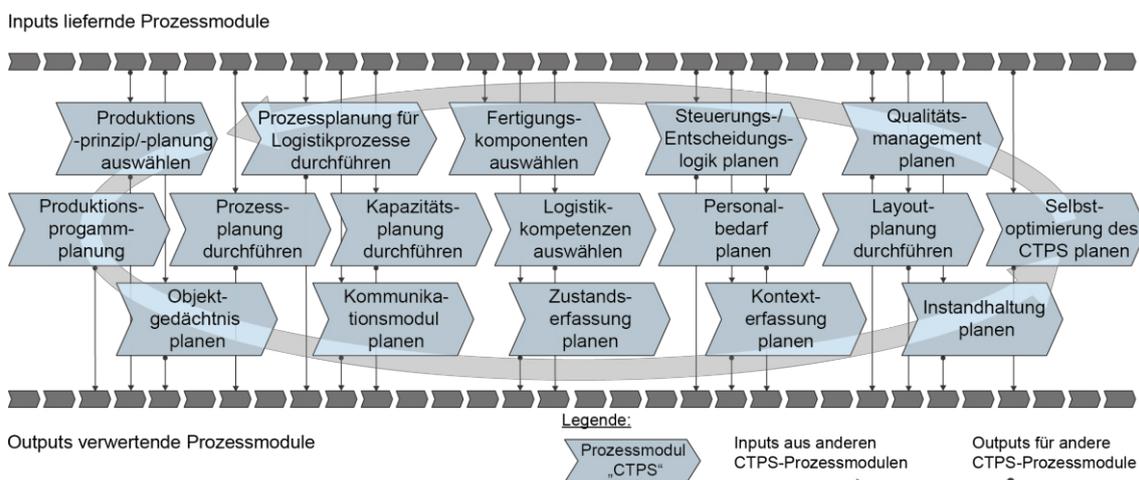


Bild 3-9: Entwicklungsprozessrahmenwerk für cybertronische Produktionssysteme [ASM+15]

Das Prozessmodul **Prozessplanung durchführen** dient der Arbeitsvorbereitung. Hier wird das Produkt aus fertigungs- und montagetechnischen Gesichtspunkten heraus beschrieben. Dazu werden Rohteile ausgewählt, Stücklisten aufbereitet und Produktionsprozesse zugeordnet. Wichtig ist dabei die maschinenlesbare Aufbereitung der Informationen. Die Betriebsmittel können diese automatisiert interpretieren und die Produktionssteuerung kann entsprechend dezentral und autonom agieren [ASM+15].

Im Modul **Steuerungs-/ Entscheidungslogik planen** werden Priorisierungslogik und Verhandlungsmechanismen für Fertigungs- und Logistikaufträge festgelegt. Dies ermöglicht den CTS Steuerungsmechanismen auszuführen, die über die klassische Fertigungssteuerung hinausgehen. Hierzu wird eine globale Zielmatrix erstellt und diese in Form gewichteter Zielstellungen auf die lokale Prozessebene überführt. Ein Plausibilisierungsmechanismus sichert die korrekte Funktionsweise der Anlagensteuerung [ASM+15].

Im Prozess **Objektgedächtnis planen** werden relevante Produktinformationen über den gesamten PLZ erhoben. Hierzu zählen Informationen über das Produkt selbst (Abmaße, Qualitätsinformationen etc.), aber auch Informationen über zu wählende Fertigungsschritte und -parameter [ASM+15].

### **Ebenen des Systementwurfs**

Der Systementwurf für CTPS gliedert sich in vier Ebenen: Kontext-, Verfahren-, Struktur- und Steuerungsebene sowie technische Lösungsebene. Alle vier Ebenen beinhalten sowohl Struktur- als auch Verhaltenssichten [EKM17, S.107], [SFA17].

Auf der **Kontextebene** wird die Systemgrenze des CTPS festgelegt und die Rahmenbedingungen, insb. Anforderungen, erfasst. Es werden Anforderungen erarbeitet und Anwendungsfälle des Produktionssystems abgeleitet. Der Systemkontext schließt auch eine Umfeldbetrachtung ein, in der Material-, Informations- und Stoffflüsse beschrieben werden. Die zu produzierenden Produkte werden analysiert und die Vorrangbeziehungen in Aktivitäts- oder Sequenzdiagrammen festgehalten [EKM17, S.107 f.].

Auf der **Verfahrensebene** findet die Konkretisierung der lösungsneutralen Kontextebene statt. Hierzu wird der Lösungsraum gebildet, indem die möglichen Produktionsverfahren identifiziert werden. Darauf aufbauend werden Verfahrengruppen abgeleitet, die festlegen, welche Produktionsverfahren das Produktionssystem bereitstellen muss. So können anschließend die konkreten Produktionsressourcen abgeleitet werden. Nach den primären Produktionsprozessen werden die sekundären Prozesse wie Transport oder Handhabung erarbeitet [EKM17, S.109].

In der **Struktur- und Steuerungsebene** werden die räumliche Struktur und die Steuerungslogik des CTPS beschrieben. Für die Struktur werden die Instanzen der ermittelten Ressourcen gebildet und mittels Ports und Konnektoren (im SysML-IBD) verknüpft. Die Steuerungslogik wird mit Verhaltensdiagrammen, also Aktivitäts-, Zustands-, und Sequenzdiagrammen beschrieben. Bei der Zusammenführung von Struktur und Verhalten können Testfälle abgeleitet werden, mit Hilfe derer das Systemmodell validiert werden kann [EKM17, S.110 f.].

Auf der **technischen Lösungsebene** werden schließlich die einzelnen Subsysteme spezifiziert und ausgearbeitet. Hier wird zwischen verschiedenen Arten von Subsystemen unterschieden. Diese können selbst als CTPS betrachtet werden und entsprechend methodisch rekursiv betrachtet werden. Sie können aber auch als konventionelle mechatronische Produkte angesehen und im Sinne konventioneller Produktentwicklung erarbeitet werden [EKM17, S.111 f.].

**Bewertung:** Das Entwicklungsprozessrahmenwerk für cybertronische Produktionssysteme gibt dem Anlagenplaner eine Vorlage zur Planung Industrie 4.0-fähiger Anlagen. Es berücksichtigt sowohl klassische Prozesse der Anlagenplanung wie auch CTPS-spezifische Prozesse. Zwar legen die Prozesse ein modellbasiertes Vorgehen nahe und erfordern die Modellierung von Produkten und Produktionssystemen. Jedoch gehen die

Prozessmodule hierauf nicht explizit ein. Für die Modellierung sind verschiedene Ebenen des Systementwurfs vorgesehen. Wie diese Modellierung im Detail erfolgen soll wird nicht definiert.

#### 3.1.2.4 SysML basierte MES-Konzipierung nach PIÉTRAC et al.

PIÉTRAC et al. beschreiben einen Ansatz zur Konzipierung eines Produktionsleitsystems bzw. Manufacturing Execution System (MES). Das Vorgehen basiert auf der Analyse und Modellierung der zugrundeliegenden Produktionsanlage und ist SysML-basiert. Zwar ist das MES nicht direktes Ziel der vorliegenden Arbeit. Die SysML-basierte Modellierung des Produktionssystems kann jedoch dennoch im Rahmen des Stands der Technik relevant sein [PLH11].

Der Ansatz besteht darin, die existierende Produktionsanlage zu analysieren und die Kundenbedürfnisse zu identifizieren. Danach erfolgt das Design des MES und letztlich die Implementierung. Es ergeben sich im Kontext der Modellierung sechs aufeinander aufbauende Phasen, die in Bild 3-10 visualisiert sind. Die ersten drei Phasen dienen der Analyse; die weiteren Phasen dem Design. Auf die hier relevanten Modellierungsaspekte soll im Folgenden kurz eingegangen werden. Für eine eingehendere Beschreibung am Beispiel sei auf [PLH11] verwiesen.

Die erste Phase besteht aus der Analyse des Umfelds (Analysis of MES domain). Hierfür wird das Block-Definitionsdiagramm der SysML (BDD) genutzt. Die Modellierung des Umfelds beschränkt sich daher vor allem auf die Identifikation der Umfeldelemente und ihre Strukturierung. Anschließend wird die bestehende Produktionsanlage analysiert (Analysis of existing manufacturing system). Hierzu werden die internen Strukturen, sowohl des MES als auch der Produktionsanlage, ebenfalls im BDD modelliert. Außerdem werden die Betriebszustände der relevanten Produktionssysteme in Zustandsdiagrammen modelliert. Als Resultat liegt damit ein Modell der momentan existierenden Strukturen vor. Im letzten Schritt der Analyse werden die Kunden-Anforderungen aufgenommen (Analysis of customer specification). Um die zu realisierenden Anwendungsfälle zu identifizieren, werden Use-Cases modelliert, die die Kundenspezifikation repräsentieren [PLH11].

Es folgen die Entwicklungsphasen. Zunächst erfolgt die Entwicklung der inneren Strukturen (Design of internal structures). Die inneren Strukturen der Anlage, bei denen hier insb. die Informationsflüsse relevant sind, werden mit Hilfe des Internen-Blockdiagramms (IBD) modelliert. Auf Basis dieser Informationsflüsse können dann in der nächsten Phase die Aktivitäten des MES entwickelt werden (Design of each MES activity). Dabei werden die einzelnen MES-Aktivitäten separat voneinander entwickelt. Für die Entwicklung werden, abhängig vom Anwendungsfall, verschiedene Diagramme genutzt. Als letzter Schritt erfolgt die Kopplung der Modelle (Pairing up). Das heißt, dass das MES mit der Produktionsanlage verknüpft wird, indem die ausgetauschten Informationen spezifiziert werden. Ergänzend werden die spezifischen Interaktionsszenarien

beschrieben– etwa vom Werker über ein Eingabegerät, einem OPC-Client bis zur Maschine und zurück. Die Modellierung erfolgt mittels Sequenzdiagramm der SysML [PLH11].

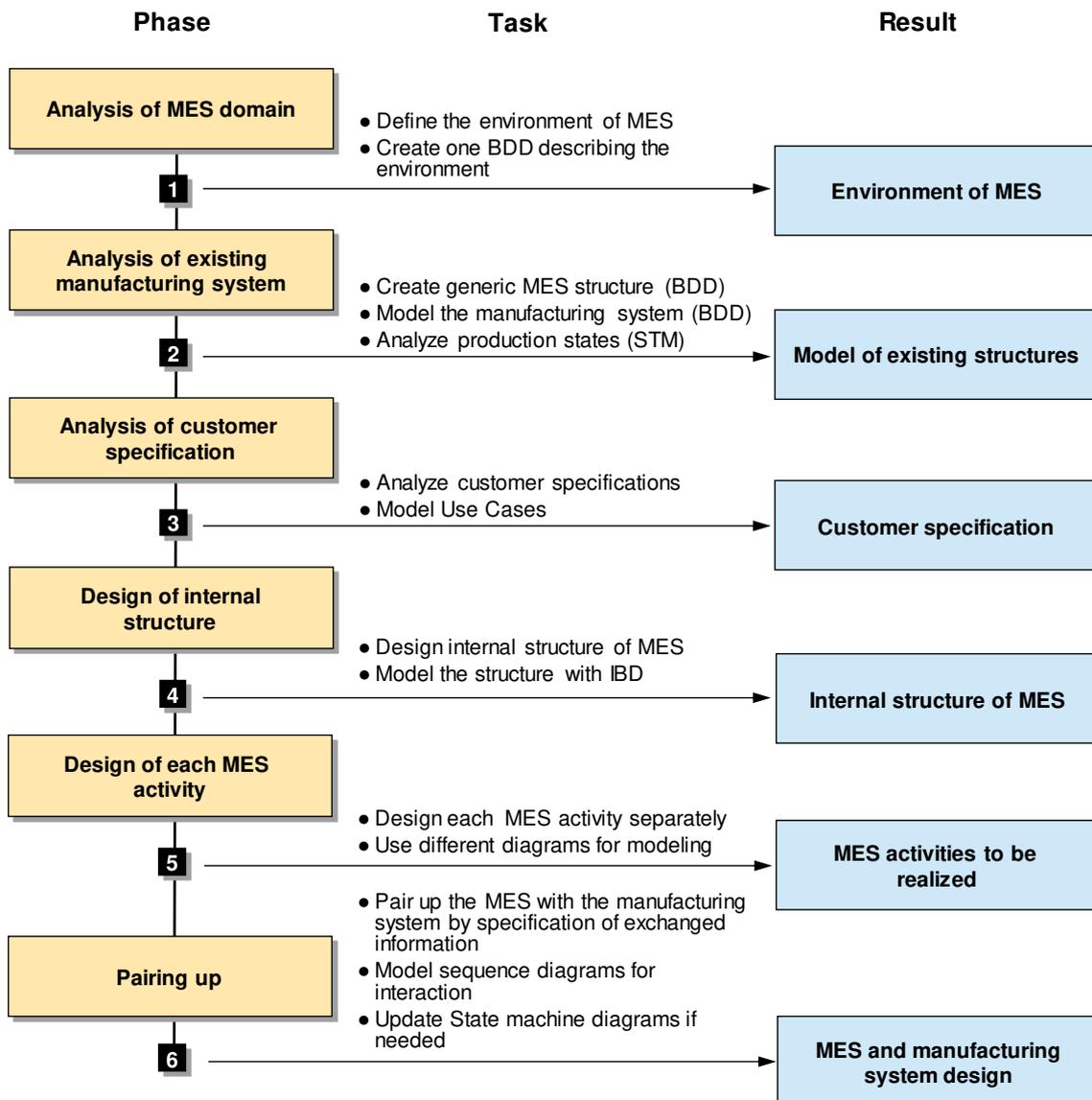


Bild 3-10: Vorgehen zur SysML basierten MES-Konzipierung [PLH11]

**Bewertung:** Das Vorgehen von PIÉTRAC et al. zeigt auf, wie MES in Zusammenspiel mit einer Produktionsanlage modelliert werden können. Der Ansatz zielt jedoch sehr konkret auf die Entwicklung ebensolcher Systeme. Gleichwohl zeigt der Ansatz, wie die SysML für die Anlagenmodellierung genutzt werden kann. Es zeigt sich, dass SysML-Modelle ein geeignetes Modellierungswerkzeug zur Integration von Systemen wie einem MES in die Produktionsanlage sind.

## 3.2 Methoden des Model-Based Systems Engineering

Das Model-Based Systems Engineering zielt auf die modellbasierte disziplinübergreifende Modellierung technischer Systeme (vgl. Kap. 2.5). Der Ansatz ist daher prinzipiell geeignet für die Modellierung komplexer Produktionsanlagen. Im Folgenden werden einige Methoden des MBSE vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf dem methodischen Vorgehen sowie der Integration der Modellbildung in das Vorgehen. Alle untersuchten Ansätze lassen sich prinzipiell mit Mitteln der SysML als standardisierte Sprachen anwenden.

### 3.2.1 SysMod – System Modeling Process

Die Vorgehensmethodik SysMod – „System Modeling Process“ nach WEILKIENS adressiert den ganzheitlichen Systementwurf. Sie gliedert sich in zwei Phasen: Analyse und Design. Bild 3-11 und Bild 3-12 zeigen die Vorgehensmodelle in Form von Aktivitätsdiagrammen für die genannten Phasen. Die Modellierung erfolgt in der SysML. Nachfolgend werden die Aktivitäten erläutert [Wei06].

Im ersten Schritt **Anforderungen ermitteln** werden die Anforderungen an das zu entwickelnde System aufgestellt. Zunächst gilt es dabei, Systemidee und Ziele zu beschreiben, die in einem Steckbrief festgehalten werden können. Die Systemidee beinhaltet bereits einen sehr grob formulierten Lösungsansatz bzw. wesentliche Merkmale des Systems. Anschließend werden die Stakeholder des Systems ermittelt. Gesucht sind alle Personen oder Institutionen, die ein Interesse an dem System haben oder Anforderungen an dieses stellen. Nach diesen Vorarbeiten, die im Wesentlichen der Definition der Entwicklungsaufgabe dienen, werden die eigentlichen Anforderungen aufgenommen. Dazu ist auch ein Rückgriff auf die Systemidee und die Stakeholder sinnvoll. Für die Modellierung der Anforderungen mit SysML wird auf die Enthält- und die Ableitungsbeziehung zurückgegriffen. WEILKIENS unterscheidet die Anforderungs-Stereotypen functional-, performance- und interface-Requirement [Wei06].

Der **Systemkontext** ist das Umfeld, in dem sich das System befindet. Das Systemkontextmodell stellt die unmittelbare Umgebung des Systems dar und enthält die Kommunikationen mit dem Umfeld. Die im Umfeld befindlichen Interaktionspartner sind die Systemakteure. Die Beziehungen zum Umfeld werden mit Informationsflüssen und Interaktionspunkten beschrieben [Wei06].

Unter **Anwendungsfällen** versteht WEILKIENS Dienstleistungen, die das betrachtete System erbringt. Sie sind eine Abfolge von Schritten bzw. Aktionen. Ein Anwendungsfall steht immer im Zusammenhang mit einem Akteur und wird von ihm ausgelöst. Folglich gehen die Anwendungsfälle aus dem Systemkontextmodell hervor, in dem Akteure und ihre Informationsflüsse verzeichnet sind. Zu beachten ist, dass auch mehrere Akteure an einem Anwendungsfall beteiligt sein können. Für die Modellierung kann das Use Case Diagram der SysML verwendet werden, mit dem die Anwendungsfälle definiert und mit

einem Akteur in Verbindung gebracht werden können. Den sachlogischen Ablauf mehrerer Anwendungsfälle nennt WEILKIENS einen Systemprozess. Das Zusammenfassen der Anwendungsfälle zu Systemprozessen erlaubt die Beschreibung des gesamten Verhaltens auf oberster Ebene.

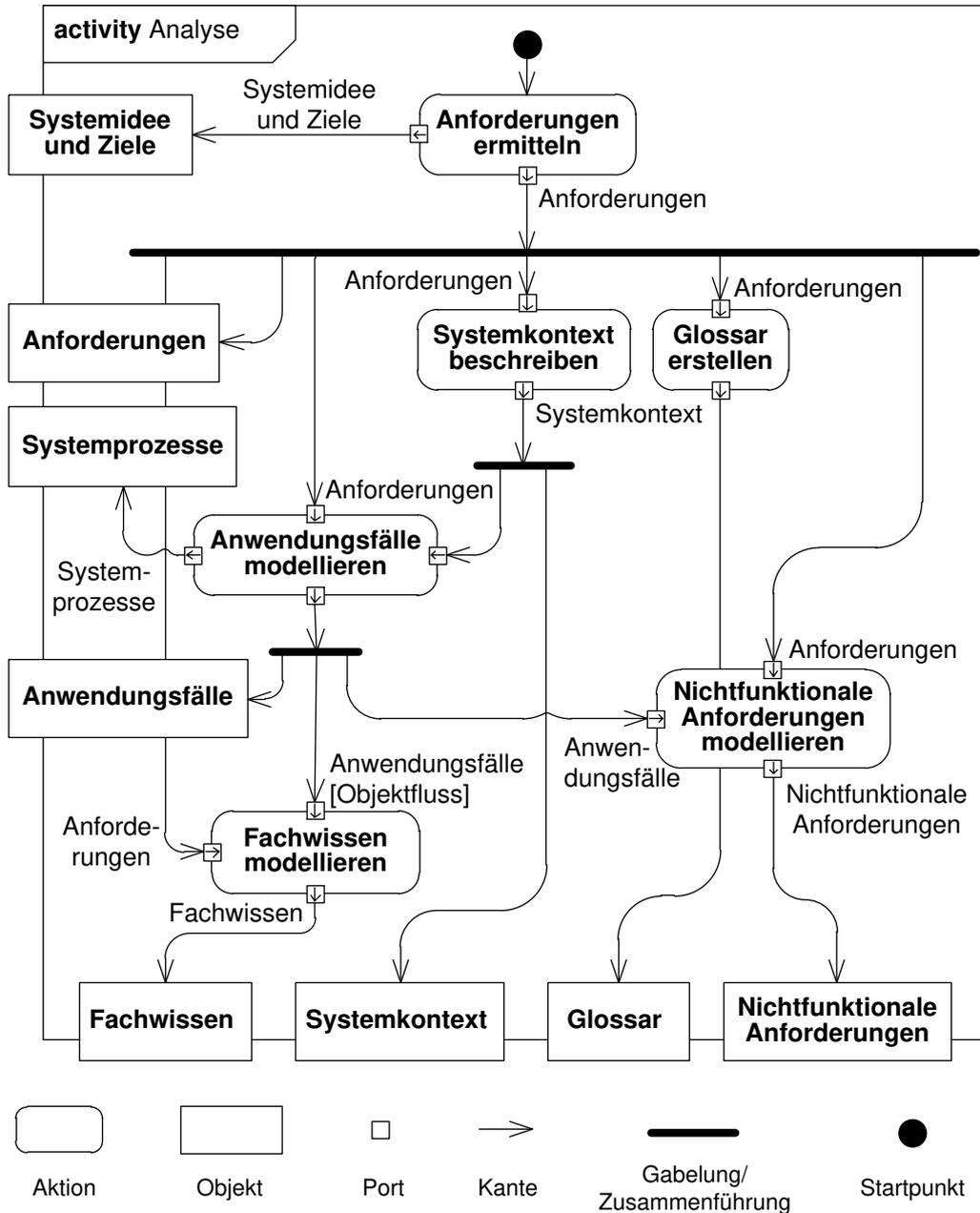


Bild 3-11: SYSMOD – Analyse Vorgehensmodell [Wei06, S.30]

Die Systemprozesse können mit einem Activity Diagram modelliert werden. Damit lässt sich insbesondere die Nebenläufigkeit mehrerer Anwendungsfälle ausdrücken. Geht es jedoch nur um eine hierarchische Gliederung, kann auch ein Funktionsbaum mittels bdd aufgestellt werden. Die Systemprozessmodellierung der Anwendungsfälle ermöglicht nun, redundante Anwendungsfälle zu finden. Sie zeichnen sich durch gleiche Ein- und Ausgangsgrößen aus. Hiernach können die Anwendungsfallabläufe modelliert werden.

Gemeint sind damit die Abläufe der Anwendungsfälle mit allen Ausnahmen und Varianten. Hierfür sollte wieder ein Activity Diagram verwendet werden. Aufbauend auf der sachlogischen Reihenfolge können darin auch die Objektflüsse, die im Prinzip Datenflüsse sind, beschrieben werden. Insgesamt ergibt sich damit die Beschreibung des gesamten Systemverhaltens auf oberster Ebene [Wei06].

Außerdem wird **Fachwissen modelliert**. Hier werden die sogenannten „fachlichen Systembausteine“ beschrieben. „Ein fachlicher Systembaustein repräsentiert einen Gegenstand, ein Konzept, einen Ort oder eine Person aus der realen Fachlichkeit in einem fachlich geringen Detaillierungsgrad, d.h. einen fachlich elementaren Begriff“ [Wei06, S.124]. Das Glossar beinhaltet Erläuterungen aller wichtigen Begriffe für das Entwicklungsprojekt bzw. für das System [Wei06].

Nach der Analyse- folgt die Designphase (Bild 3-12). Sie beginnt mit der Aktivität **System/Akteur-Interaktion modellieren**. Die Menge an Elementen, die dafür in Frage kommen, sind im Systemkontextmodell schon definiert. Unter Hinzunahme der Anwendungsfälle können in einem Sequence-Diagram Informationen aus beiden Diagrammen zusammengeführt werden. Es werden die Blöcke aus dem Umfeld und das eigentliche System verwendet, und die Aktivitäten aus den Anwendungsfallabläufen gesucht und eingezeichnet, die die Interaktion zwischen den Elementen darstellen [Wei06].

Es folgt der Schritt **Systemschnittstellen ableiten**. Das erstellte Interaktionsdiagramm wird nun Nachricht für Nachricht durchgegangen, um die Schnittstellen, die das System benötigt, zu identifizieren und zu definieren [Wei06].

Zuletzt geht es daran, **Systemstrukturen zu modellieren**, also die interne Struktur des Systems zu beschreiben. Es werden die Bausteine modelliert, aus denen das System zusammengesetzt wird. Die Entwicklung der Struktur erfolgt anwendungsfallgetrieben, schließlich sind die Anwendungsfälle die Dienstleistungen, dessen Ausführung gerade die Aufgabe des Systems ist. Zu jedem Anwendungsfall werden also die Elemente gesucht und modelliert, die für die Realisierung nötig sind. Dabei sind natürlich die schon modellierten Interaktionspunkte und Schnittstellen zu berücksichtigen. Die Entwicklung erfolgt parallel im ibd und sd. In Ersterem wird die statische Struktur des Systems beschrieben während in Letzterem das Verhalten der Struktur, also die nachrichtentechnische Interaktion, modelliert wird. Die Systembausteine können ihrerseits natürlich intern weiter modelliert werden. Das Modell wird abgerundet, indem das dynamische Verhalten der Systembausteine mittels Parametric Diagram beschrieben wird und indem die Aktivitäten aus den Anwendungsfallabläufen per Allocation-Beziehung mit den ausführenden Systembausteinen verbunden werden. So ist nicht zuletzt sichergestellt, dass jede Aktion, die das System ausführen soll, tatsächlich durch einen Baustein realisiert wird [Wei06].

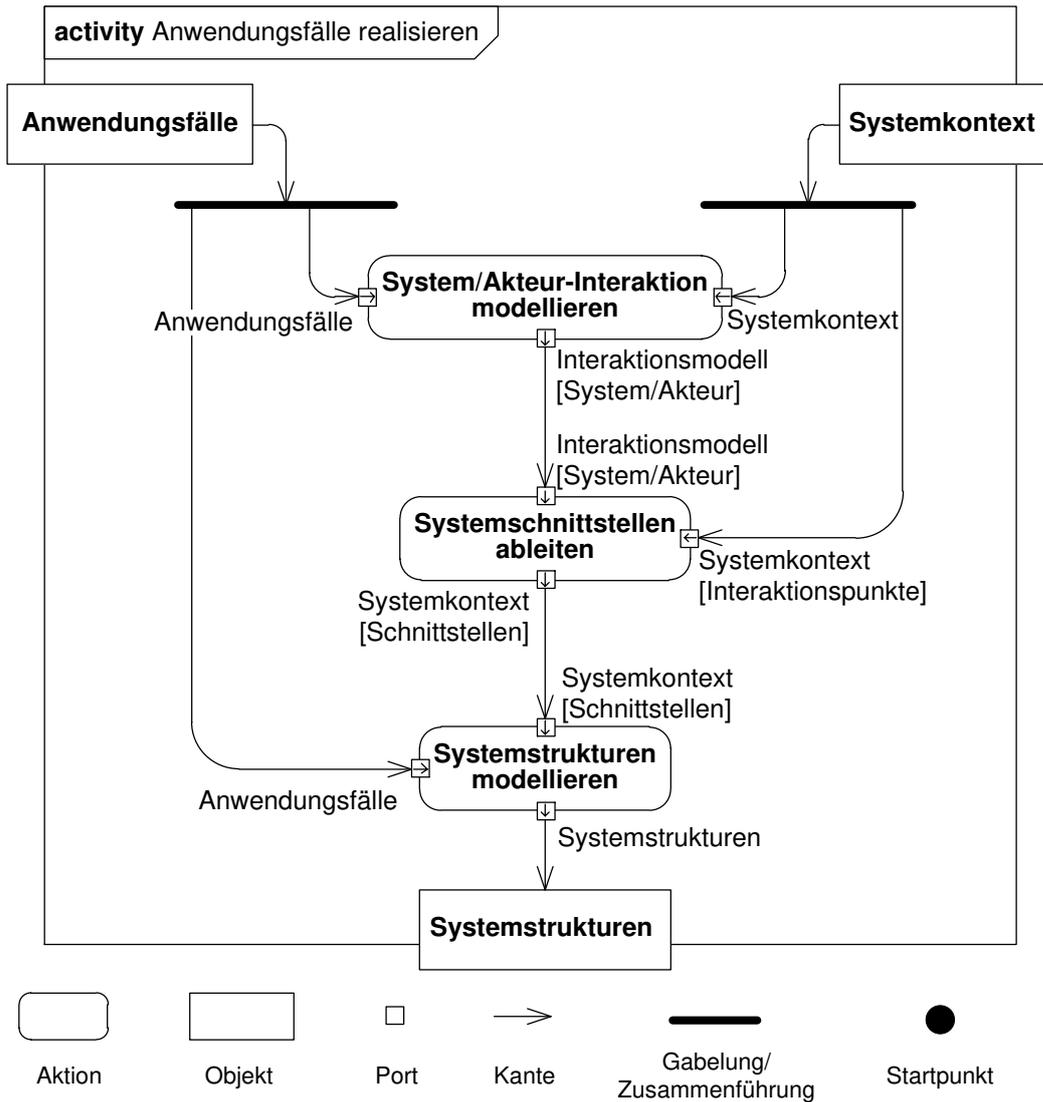


Bild 3-12: SYSMOD - Design Vorgehensmodell [Wei06, S.31]

**Bewertung:** Das Vorgehen ist anwendungsfallgetrieben, was vor allem bedeutet, dass die Realisierung der Anwendungsfälle getrennt voneinander betrachtet wird. Dies mag für softwareintensive Systeme sinnvoll sein, für Systeme mit einem mechanisch-elektrischen Schwerpunkt ist es jedoch ungünstig, da die gegenseitige Beeinflussung der Lösungselemente unzureichend berücksichtigt wird. Auch ist fraglich, ob die Modellierung der nachrichtentechnischen Interaktionen ausreicht, um das komplexe Zusammenspiel technischer Elemente zu beschreiben. Hier werden Energie- und Stoffflüsse vernachlässigt.

### 3.2.2 FAS – Funktionale Architekturen für Systeme

FAS - „Funktionale Architekturen für Systeme“ ist ein anwendungsfallgetriebenes Vorgehen zur Erstellung funktionaler Architekturen. Es zielt auf die abstrakte und funktionale Beschreibung eines Systems, ohne auf die Implementierung einzugehen. Vor dem Hintergrund fortwährenden technischen Wandels verspricht dies eine

technologieunabhängige und lösungsneutrale Systemarchitektur, die somit zum einen langlebiger und zum anderen domänenübergreifend ist. Das FAS-Vorgehensmodell ist in Bild 3-13 in Form eines Aktivitätsdiagramms beschrieben. Die eingezeichneten Aktivitäten sollen im Folgenden kurz beschrieben werden [LW10].

Das Vorgehen beginnt mit dem Schritt **Anforderungen** ermitteln. Bei der Ermittlung von Anforderungen wird zwischen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen unterschieden. Anschließend werden **Anwendungsfälle** modelliert. Sie ergeben sich aus der Sicht eines Anwenders (in der SysML „Akteur“) auf das System. Für ihn spielt keine Rolle, was innerhalb des Systems abläuft, sondern lediglich, welche Dienstleistungen bzw. Funktionen ihm das System zur Verfügung stellt. Anwendungsfälle werden deshalb stets mit mindestens einem Akteur verbunden. Außerdem werden die Anwendungsfälle mit den entsprechenden funktionalen Anforderungen verknüpft. Im späteren Verlauf der Entwicklung können Anwendungsfälle dann auch mit Verhaltensdiagrammen, typischerweise in Form von Aktivitätsdiagrammen, detailliert werden [LW10]. Es folgt die Modellierung der **funktionalen Architektur**. Ausgangsbasis bildet dabei eine funktionale Dekomposition der Anwendungsfälle. Die identifizierten Teilfunktionen werden zu Funktionsstrukturen verbunden. Die Beziehungen zwischen den funktionalen Elementen können informationeller, stofflicher oder energetische Natur sein [LW10].

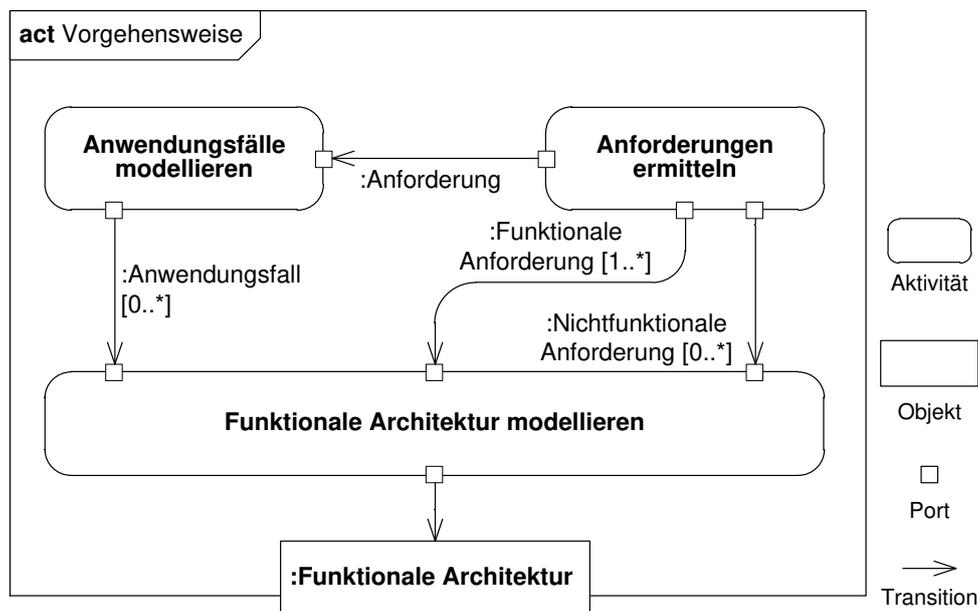


Bild 3-13: FAS Vorgehensmodell [LW10]

FAS ist durch die wenigen Arbeitsschritte ein für den Praktiker schnell zu überblickendes Vorgehen. KORFF et al. zeigen die werkzeugtechnische Umsetzung auf [KLW11b].

**Bewertung:** Die Methode ist kein vollständiges Vorgehen für ein durchgängiges Systemmodell, sie kann aber eine interessante Erweiterung, bspw. für SYSMOD sein, bei dem eine lösungsneutrale Modellierung fehlt. Eine funktionale Architektur – als Vorstufe zur

eigentlichen Lösungsfindung – ermöglicht das Suchen bekannter Lösungsmuster und die Wiederverwendung von Lösungen.

### 3.2.3 OOSEM – Object-Oriented Systems Engineering Method

Die Entwicklungsmethodik OOSEM – „Object-Oriented Systems Engineering Method“ ist eine Vorgehensmethodik für die Spezifikation und den Entwurf technischer Systeme. Das Vorgehensmodell ist in Bild 3-14 in Form eines Aktivitätsdiagramms abgebildet. Nachfolgend sollen die Aktivitäten erläutert und auch auf die entsprechenden Modellierungsaspekte, die sich hier auf SysML beziehen, eingegangen werden.

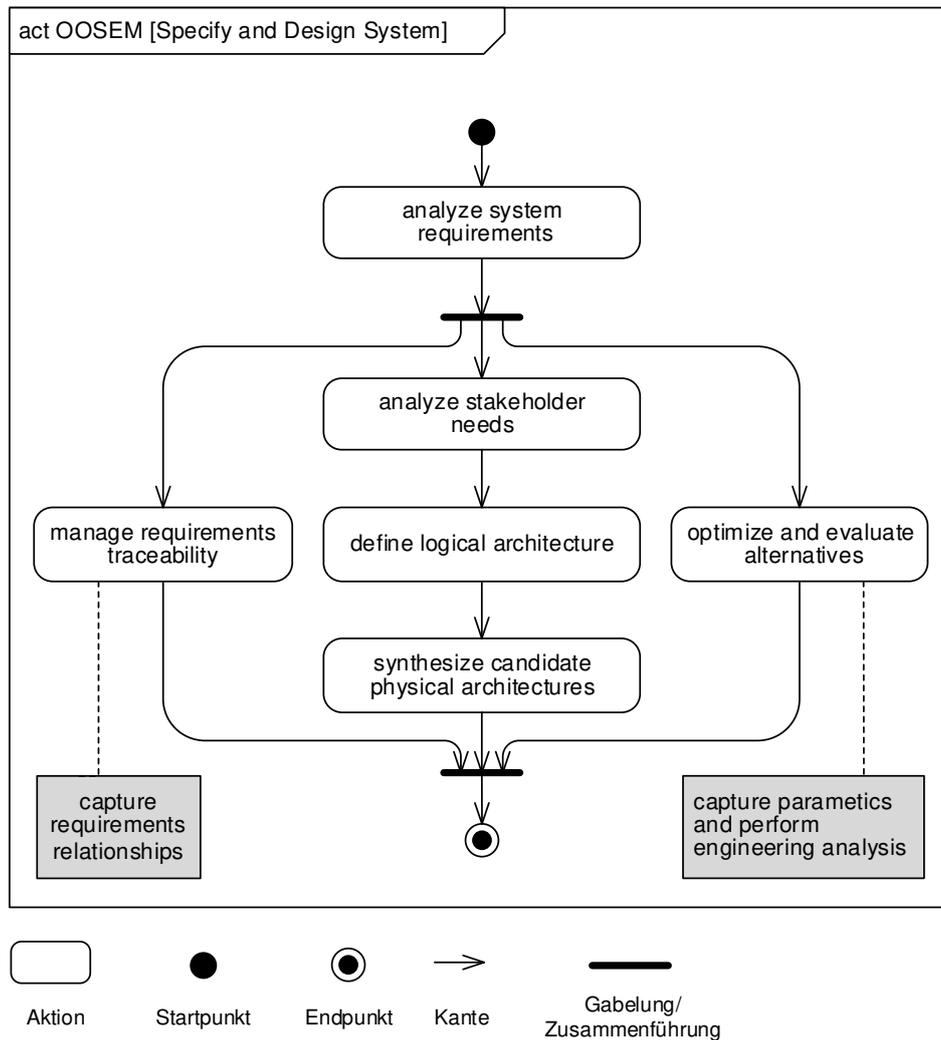


Bild 3-14: OOSEM Vorgehensmodell (als SysML Aktivitätsdiagramm) [FMS11, S.402]

Der erste Schritt **Analyse stakeholder needs** dient im Wesentlichen der Analyse der Aufgabenstellung. Es wird hier zwischen einer bestehenden, weiterzuentwickelnden Lösung und einer Neuentwicklung unterschieden. Für den erstgenannten Fall wird zunächst die Ist-Struktur des bestehenden Systems mit einem Block-Definitions-Diagramm grob

modelliert. Dabei werden auch Umfeldelemente, die eine entscheidende Wechselwirkung mit dem System haben, berücksichtigt. Auf diese Weise wird ein ganzheitlicher Blick auf das betrachtete System erlangt. Das ganze System wird nun mittels Kausalanalyse näher untersucht, um Verbesserungspotentiale zu finden. Dazu werden Faktoren wie die Herstellungskosten des Systems, die Betriebssicherheit, Kundenzufriedenheit usw. ermittelt, die für den Erfolg des Produkts wichtig sind. Anschließend sucht man nach Einflüssen, die diese Faktoren beeinflussen. So lassen sich entscheidende Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung finden [FMS11].

Das bisher beschriebene Vorgehen lässt sich nur mit einer bereits bestehenden Lösung vollziehen. Die folgenden Schritte sind aber auch bei Neuentwicklungen anwendbar. Es werden nun die „Mission Requirements“, also die Hauptanforderungen, mit einem Requirement Diagram modelliert. Darauf aufbauend kann die grobe Soll-Struktur des Systems analog zu der vorher beschriebenen Ist-Struktur in einem bdd modelliert werden. Es spielen Module auf oberster Ebene des Systems eine Rolle sowie die Elemente des Umfelds, wobei eine Systemgrenze in dem Sinne, wie sie bspw. in CONSENS betrachtet wird, nicht existiert. Es lassen sich aus diesem Diagramm leicht die regulären Anwendungsfälle des Systems ableiten, die in einem Use Case Diagram festgehalten werden können. Zusätzlich können aber auch Ausnahmefälle, insbesondere Störfälle, mit aufgenommen werden. Die Anwendungsfälle werden, wie schon bei der SYSMOD-Erläuterung diskutiert, von Akteuren ausgelöst und müssen neben der grafischen Verknüpfung auch textuell beschrieben sein [FMS11].

Im Schritt **Analyze System Requirements** werden zunächst die Anwendungsfälle näher betrachtet, die beschrieben wurden. Für die Anwendungsfälle sollen alle denkbaren Szenarien entworfen werden, die letztlich aus verschiedenen Einflussausprägungen der Umfeldelemente hervorgehen müssen. Darin eingeschlossen sind bspw. auch Fehler-Szenarien. Die Anwendungsfälle werden mit Activity oder Sequence Diagrams modelliert. Nach der Verhaltensspezifikation wird auch der Systemkontext, also das Umfeld des Systems, in einem Internal-Block-Diagramm beschrieben. Auch das System selbst wird abgebildet, es kann durchaus aus mehreren Modulen bestehen, sofern klar ist, dass es diese geben wird. Die Informationen über die Interaktionen mit der Umgebung (aus dem zuvor erstellten Activity Diagram) werden hier als Schnittstelleninformationen wieder aufgegriffen. Denn die In- und Output-Größen der Aktivitäten müssen sich letztlich in den Schnittstellen und entsprechenden Ports der ausführenden Elemente wiederfinden. Die Ports sollten nach ihrer physikalischen Natur typisiert werden, wie bspw. Material, Fluid oder Signal und nicht nach ihrem logischen Inhalt.

Die Zustände des Systems müssen nachfolgend noch in einem State Machine Diagramm genauer beschrieben werden. Über einen Zustandsautomaten werden die Anwendungsfälle angestoßen und entsprechende Zustandsübergänge ausgelöst. An dieser Stelle werden also auch die Bedingungen für das Auslösen von Transitionen festgelegt. Das Verhalten der Zustände wird dann durch Aktivitätsdiagramme beschrieben. Die

Verhaltensbeschreibung innerhalb des Systems geht also stets von den Zuständen des Systems aus; es gibt in diesem Sinne kein übergeordnetes Aktivitätsdiagramm [FMS11].

Mit der Aktivität **Define Logical Architecture** beginnt der eigentliche Entwurf des Systems. Die logischen Komponenten, die nun modelliert werden, sind eine Abstraktion der realen Komponenten, die das System realisieren. Sie enthalten keine Informationen über das Lösungsprinzip, sind also lösungsneutral. Das System wird in bdd-Sicht in seine logischen Komponenten zerlegt. Anschließend wird ein logisches Activity Diagramm angefertigt, welches natürlich konsistent zu dem vorher modellierten Verhalten in den Anwendungsszenarien sein muss, das an die logischen Elemente allokiert wird und die Operationen des Systems beschreibt. Durch die Allokationen wird sichergestellt, dass die Komponenten die geforderten Anwendungsfälle tatsächlich realisieren. Die logischen Komponenten können nun weiter spezifiziert werden. Diese Entwicklung erfolgt wieder ausgehend von dem allokierten Verhalten, denn die Aufgabe einer Komponente ist das Erfüllen der ihr zugeordneten Aktivität. Es wird also zunächst das Verhalten der Komponente spezifiziert und danach die in der betrachteten Komponente enthaltenen Elemente entsprechend allokiert. Dies sind somit die Properties der betrachteten Komponente. Im Prinzip wiederholt sich hier also das Vorgehen, das schon zuvor auf das System als black-box angewendet wurde [FMS11].

In dem Schritt **Synthesize Candidate Physical Architectures** werden die physikalischen Komponenten gesucht, die das System realisieren. Unter den Begriff „physikalische Komponente“ fallen hier Hardware-, Daten-, Steuerungs- und Softwarekomponenten. Zunächst wird das System modularisiert. Bei der Modularisierung sollte darauf geachtet werden, möglichst einfache Schnittstellen und eine geringe gegenseitige Beeinflussung zu erreichen. Die Modularisierung wird auf Basis der logischen Struktur entwickelt und erfolgt typischerweise hinsichtlich der geografischen Lage der Komponenten. Man kann also von einer bauraumbezogenen Modularisierung sprechen. Nun werden physikalische Komponenten, die eine logische Komponente realisieren, an diese allokiert. Die Entwurfsbeschränkungen, die in einer vorherigen Aktivität entwickelt wurden, werden natürlich über die logischen Komponenten hinweg auf die physikalischen übertragen. Es können verschiedene Lösungsvarianten, in Form verschiedener physikalischer Strukturen, entwickelt werden. Die Modellierung der physikalischen Struktur wird im ibd vorgenommen. Die Beziehungen zwischen den Elementen gehen aus den Verhaltensdiagrammen hervor [FMS11].

Die Aktivität **Optimize and Evaluate Alternatives**, bei der es im Wesentlichen darum geht, Analysen durchzuführen, erfolgt parallel zu den vorher beschriebenen Entwurfschritten. Welche Analysen konkret durchgeführt werden sollten, ist stark vom Entwicklungsprojekt abhängig, darunter kann beispielweise fallen [FMS11]:

- Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Robustheit des Systems
- Auswahl der präferierten Lösung aus den Entwurfsalternativen

- Verifikation eines Entwurfs
- Frühzeitige Risikoanalyse

Während des Entwicklungsprozesses ergeben sich immer wieder neue Anforderungen. Das Requirements Diagram bietet zum einen die Möglichkeit, diese Anforderungen zu strukturieren. Zum anderen können Blöcke, die Anforderungen erfüllen, mittels der Satisfy-Beziehung mit einer Anforderung verknüpft werden. Dies geschieht in der Aktivität **Manage Requirements Traceability**. Damit wird die Erfüllung der Anforderung kontrollierbar gemacht. Die Verknüpfung ist auch nützlich, wenn sich Anforderungen ändern. So kann der Einfluss einer Änderung auf das System direkt überblickt werden [FMS11].

**Bewertung:** Die OOSEM-Methode ist, wie SysMod auch, anwendungsfallgetrieben. Jedoch wird durch die Trennung zwischen logischer und physikalischer Struktur eine Möglichkeit gefunden, das System lösungsneutral zu betrachten und unabhängige Lösungsvarianten zu erarbeiten. Im Prinzip ähnelt dieses Verfahren dem Aufstellen der Funktionsstruktur innerhalb der Entwicklungsmethodik nach PAHL/BEITZ [PBF+07]. Der Entwurf erfolgt ausgehend von Aktivitätsdiagrammen über lösungsneutrale, logische Komponenten zur Auswahl der Lösungselemente. Die mögliche gegenseitige Beeinflussung von Lösungselementen wird dabei aber nicht berücksichtigt. Die Methode ist deshalb für softwareintensive Systeme geeignet, nicht jedoch für Systeme mit mechanisch-elektrotechnischem Schwerpunkt. Die stringente Verwendung der Allocation-Beziehung und entsprechender Sichten ist eine überzeugende Herangehensweise, um die Prozesse, die auf dem System sowie zwischen dem System und dem Umfeld ablaufen, zu modellieren.

### 3.3 Ansätze der Prozessbeschreibung

Der Modellierung von Produktionsabläufen bzw. von Prozessen kommt in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung bei. Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle einige Ansätze zur modelltechnischen Beschreibung von Prozessen dargestellt werden. Es existiert eine große Vielzahl von Ansätzen auf diesem Gebiet. Im Folgenden werden daher einige wichtige und für diese Arbeit bedeutsame Ansätze herausgegriffen.

#### 3.3.1 Vorranggraphen

Ein Vorranggraph dient dazu, Arbeitselemente bzw. Prozesse und die entsprechende Reihenfolgebeziehung darzustellen. Es handelt sich dabei um einen gerichteten Graphen, der aus Knoten und Kanten besteht. Ein Knoten stellt ein Arbeitselement dar. Es wird durch eine Elementnummer eindeutig identifiziert und kann bspw. mit einer Elementzeit versehen werden, die die Bearbeitungszeit angibt. Eine Kante verbindet zwei Arbeitselemente und stellt damit die Bearbeitungsreihenfolge eines zu produzierenden Produkts dar. Bild 3-15 zeigt ein Beispiel eines Vorranggraphen [GT12].

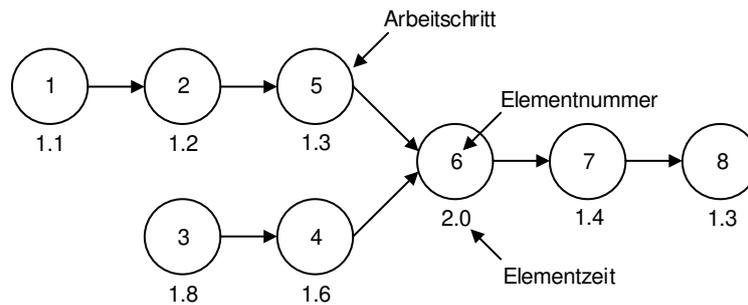


Bild 3-15: Beispiel eines Vorranggraphen [GT12]

Der Vorranggraph ist die Ausgangsbasis zur Strukturierung und Optimierung des Produktionsprozesses. So können beispielsweise mehrere Arbeitselemente zu Bearbeitungsstationen zusammengefasst werden mit dem Ziel, gleichmäßige Taktzeiten über den Prozess hinweg zu erreichen [GT12].

Als verwandte Ansätze zum Vorranggraphen existieren weitere Modellierungsansätze. Bspw. bestehen **Petri-Netze** ebenfalls aus Knoten und Kanten. Hier wird jedoch zwischen zwei Arten von Knoten unterschieden: „Stellen“ (oder „Plätze“) und „Transitionen“. Erweitert wird dieser Ansatz durch die Idee von Marken (oder „Tokens“), die den modellierten Ablauf durchlaufen [Rei10].

Marken repräsentieren diskrete Objekte, die in einem Speicher gesammelt und von einem Verbraucher dort entnommen werden können. Eine Stelle speichert Marken. Transitionen verbinden die Stellen. Schalten sie, wird eine Marke aus dem Speicher des Vorbereichs entnommen und in den im Nachbereich transportiert.

**Bewertung:** Vorranggraphen beschreiben den Produktionsprozess auf einer elementaren Ebene. Sie sind geeignet, Prozessreihenfolgen zu visualisieren und sind Ausgangsbasis für Optimierungen. Sie sind in ihrer Anwendung aber zu fokussiert, um im Sinne eines ganzheitlichen Systemmodells Abhängigkeiten von Produkt, Prozess und Ressource darzustellen.

### 3.3.2 Beschreibungssprachen für Geschäftsprozesse

Zur Beschreibung von Geschäftsprozessen existieren zahlreiche Beschreibungs- bzw. Modellierungssprachen. An dieser Stelle werden zwei Vertreter dieser Klasse analysiert: ARIS und OMEGA.

#### ARIS

ARIS – „ARchitektur integrierter Informations-Systeme“ ist ein Modellierungskonzept, das primär „zur Beschreibung von Unternehmen und betriebswirtschaftlichen Anwendungssystemen“ [Sei06, S.12] geeignet ist. Im Wesentlichen wird dazu die grafische Modellierungssprache EPK (Ereignisgesteuerte Prozesskette) genutzt. Die folgenden Objekte werden zur Modellierung verwendet:

- **Funktion:** Eine Funktion beschreibt einen Transformationsprozess von Informationsobjekten. Sie ist eine komplexe Tätigkeit, die ggf. noch weiter untergliedert werden kann [Gad12].
- **Daten/Informationsobjekt:** Dies sind Abbilder von materiellen oder immateriellen Gegenständen oder Dingen der realen Welt [Gad12].
- **Organisationseinheit:** Hiermit wird die Gliederungsstruktur eines Unternehmens modelliert. Auf ihr werden Funktionen ausgeführt [Gad12].
- **Ereignis:** Es handelt sich um einen passiven Objekttypen, der eine Funktion auslösen und auch Ergebnis einer Funktion sein kann. Ereignisse beschreiben einen eingetretenen Zustand, das heißt sie beschreiben ein Objekt, das eine Zustandsänderung erfahren hat [Gad12].
- **Verbindung:** Es wird zum einen zwischen Kontrollfluss und Datenfluss unterschieden. Ersterer stellt einen zeitlich-logischen Zusammenhang her, während Letzterer beschreibt, ob eine Funktion gelesen, geschrieben oder geändert wird. Zum anderen gibt es Zuordnungen, die für Ressourcen und Organisationseinheiten gedacht sind [Gad12].
- **Operator:** Dies sind Verknüpfungsoperatoren, die den logischen Ablauf eines Prozesses beeinflussen. Typischerweise werden „Und“, „Oder“ und „Exklusives Oder“ verwendet [Gad12].

Die Berücksichtigung vieler Aspekte macht ein Diagramm schnell unübersichtlich. Ein zentrales Konzept von ARIS ist deshalb das Bilden verschiedener Beschreibungssichten. Dazu gehört bspw. die Funktionssicht, in der fachliche Aufgaben oder Tätigkeiten an einem Objekt beschrieben werden, oder die Organisationssicht, die den Aufbau der Organisationseinheit, welche die Träger von Funktionen sind, beschreibt. Bild 3-16 zeigt beispielhaft ein ARIS Prozess-Diagramm [Sei06].

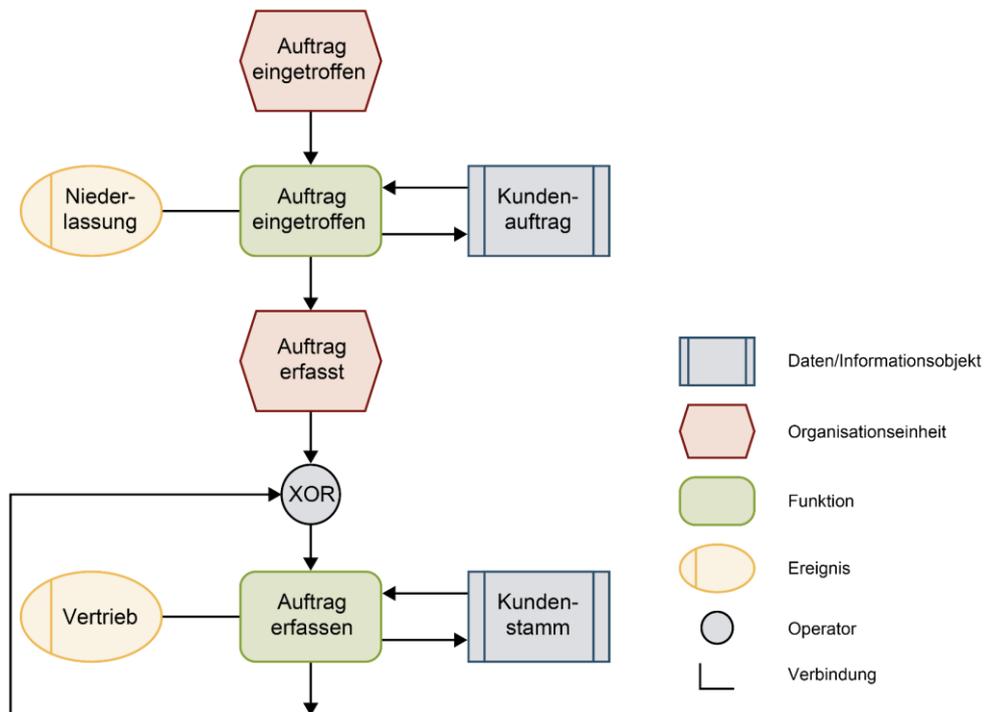


Bild 3-16: Darstellung einer Auftragsabwicklung (Ausschnitt) mit ARIS EPK [GP14, S.251]

## OMEGA

OMEGA – „Objektorientierte METHode zur Geschäftsprozessmodellierung und -Analyse“ ist eine Modellierungstechnik, die die Darstellung einer Ablauforganisation adressiert. Sie berücksichtigt dabei die Abbildung von Prozessketten sowie die von Informations- und Materialflüssen. Für die Modellierung werden die folgenden Konstrukte verwendet [GP14]:

- **Geschäftsprozesse und Aktivitäten:** Dies sind Tätigkeiten oder Aktionen, deren Ziel entweder die Erbringung eines Ergebnisses oder die Transformation eines Objekts ist. Sie besitzen einen definierten Anfang und ein Ende. Natürlich können sie auch hierarchisiert werden.
- **Organisationseinheiten:** Sie repräsentieren Stellen innerhalb der Aufbauorganisation, die Prozess oder Aktivitäten ausführen bzw. verantworten können.
- **Externe Objekte:** Es handelt sich um Subjekte im Umfeld der Organisation, die mit ihr Informationen, genauer gesagt Bearbeitungsobjekte, austauschen.
- **Bearbeitungsobjekte:** Dies sind die Objekte, die durch Geschäftsprozesse oder Aktivitäten erzeugt oder transformiert werden. Sie fließen entlang der Kommunikationsbeziehungen. Im Kontext von Aufbauorganisationen lässt sich die Menge an möglichen Objekten gut eingrenzen, so gibt es bspw. ein IT-Objekt, ein Papierobjekt oder ein Materialobjekt.

- **Technische Ressourcen:** Technische Ressourcen unterstützen oder ermöglichen die Durchführung von Geschäftsprozessen. Typische Ressourcen sind IT-Applikationen oder Betriebsmittel. Die technischen Ressourcen müssen sich immer innerhalb einer Organisationseinheit befinden und werden von ihr entsprechend bedient.
- **Kommunikationsbeziehungen:** Die Geschäftsprozesse werden mittels Kommunikationsbeziehungen miteinander gekoppelt. Die Beziehung kann aber auch zwischen Geschäftsprozess und technischer Ressource bestehen. Sie transportiert die Bearbeitungsobjekte und kann außerdem mit Entscheidungsknoten erweitert werden.

Es existieren noch weitere spezielle Modellelemente; die hier genannten reichen aber für das grundlegende Verständnis der OMEGA-Diagramme aus. Das Bild 3-17 zeigt beispielhaft ein OMEGA-Diagramm. Zwar ist die Sprache für Ablauforganisationen konzipiert und ausgelegt, eine Adaption für Produktionsanlagen ist aber denkbar. In diesem Fall würde man bspw. weniger von einem Geschäftsprozess als vielmehr von einem Fertigungsprozess sprechen. Die Bearbeitungsobjekte entsprechen dann den zu bearbeitenden Werkstücken.

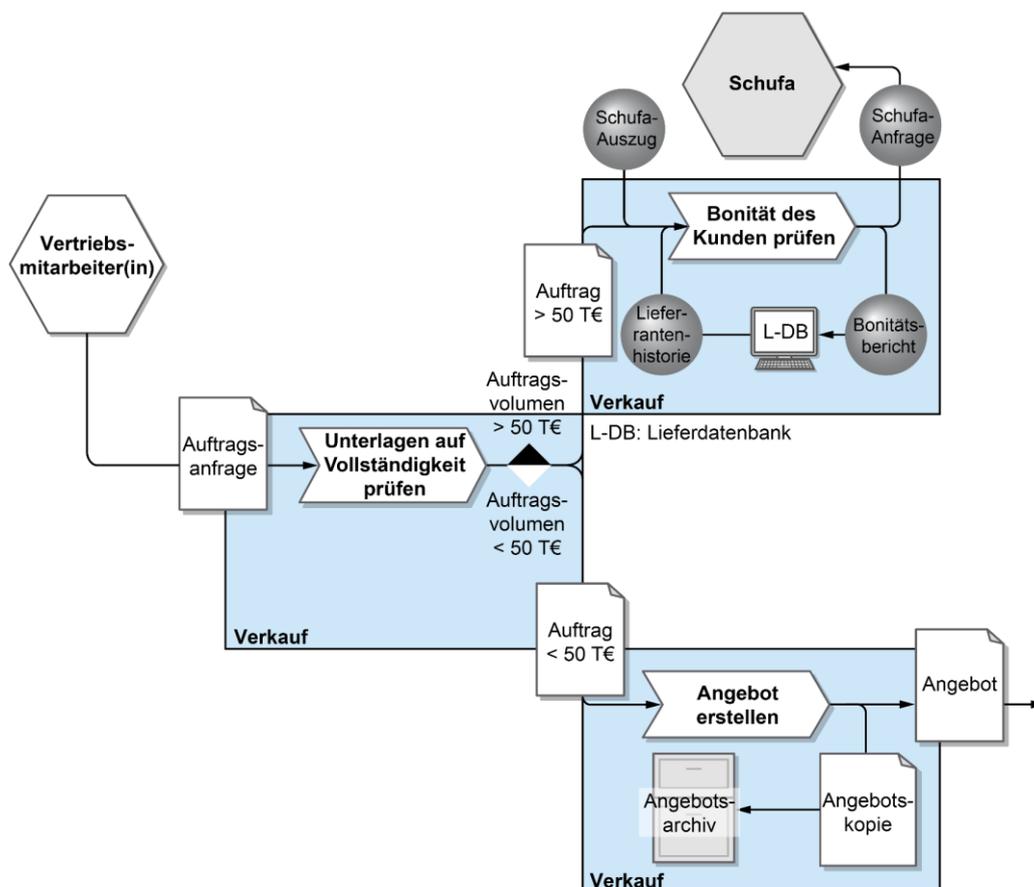


Bild 3-17: Verkürzte Darstellung einer Auftragsabwicklung (OMEGA) [GP14, S.258]

**Bewertung:** ARIS ist ein Modellierungskonzept, das die Beschreibung von Prozessen zusammen mit den ausführenden Elementen ermöglicht. Das Bilden verschiedener

Sichten ermöglicht überdies die Abbildung eines komplexeren Systems. Auch OMEGA-Modellierung zielt auf Organisationsprozesse. Es werden zwei Ebenen der Allokation propagiert. Zum einen werden Prozesse zu Verantwortungsbereichen zugeordnet. Daneben bedienen sich die Verantwortungsbereiche verschiedener technischer Ressourcen. Das heißt, dass die Funktionsebene von der Ressourcenebene getrennt wird.

Beschreibungssprachen für Geschäftsprozesse adressieren naturgemäß nicht die spezifischen Aspekte von Produktionsanlagen. Gleichwohl können zahlreiche Analogien gezogen werden. In beiden Fällen steht die Beschreibung eines sequentiellen Ablaufs und die Zuordnung zu ausführenden Ressourcen im Fokus. Es gilt, verschiedene Alternativen und parallele Prozesse zu berücksichtigen. Grundlegende Modellierungsprinzipien lassen sich daher auch auf die Modellierung von Produktionsanlagen übertragen.

### 3.3.3 Aktivitätsdiagramm der UML/SysML

Die UML<sup>20</sup> – „Unified Modeling Language“ ist eine grafische Modellierungssprache zur Beschreibung von Software, die aus unterschiedlichen Diagrammtypen besteht. Die SysML ist als Erweiterung der UML spezifiziert [OMG17]. Eines dieser Diagramme – das Aktivitätsdiagramm – ist geeignet, allgemeine Abläufe und Prozesse zu beschreiben, es muss sich dabei also nicht unbedingt um Abläufe innerhalb eines Softwareprogramms handeln [RQZ07, S.259]. Das Aktivitätsdiagramm besteht im Wesentlichen aus den folgenden Elementen:

- **Aktion:** Sie steht für den Aufruf eines Verhaltens oder einer Bearbeitung innerhalb einer Aktivität, die nicht weiter zerlegt wird. Sie beschreibt einen Einzelschritt, der zur Realisierung der Aktivität beiträgt. Die Summe aus Aktionen, einschließlich ihrer Reihenfolge und der zur Laufzeit erzeugten Ergebnisse, realisieren die Aktivität [RQZ07, S.270].
- **Aktivität:** Eine Aktivität bezeichnet die gesamte Einheit, die in einem Aktivitätsdiagramm modelliert wird. Zu beachten ist, dass eine Aktion innerhalb einer Aktivität durchaus wiederum den Aufruf eines Ablaufs darstellen und damit auch als Aktivität betrachtet werden kann. Aktivitäten können also verschachtelt sein [RQZ07, S.274].
- **Objektknoten:** Sie spezifizieren den Transport von Daten, Werten oder Objekten während eines Ablaufs innerhalb einer Aktivität. Der Objektknoten oder dessen Inhalt ist immer das Ergebnis einer unmittelbar vorangegangenen Aktion und auch der Eingang für die darauf folgende Aktion. Es muss beachtet werden, dass ein Objektknoten nicht zu verwechseln ist mit der Instanz, die er repräsentiert; er darf deshalb keine Attribute oder Operationen enthalten. Um auszudrücken, dass sich das Objekt

---

<sup>20</sup> An dieser Stelle wird von der Version UML 2 ausgegangen, die im Vergleich zur der vorherigen Version teilweise signifikante Diskrepanzen hinsichtlich Modellierungsvorschriften und Begriffen aufweist [RQZ07].

eines Objektknotens in einem bestimmten Zustand befindet, kann dieser Zustand annotiert werden. Objektknoten können auch als Puffer eingesetzt werden, indem sie spezifizieren, welcher Token zu welchem Zeitpunkt weitergegeben wird [RQZ07, S.276f.].

- **Kontrollelement:** Es handelt sich hierbei um Knoten, die den Ablauf einer Aktivität steuern. Dies sind zunächst Start- und Endknoten, die immer vorhanden sein müssen. Dazu kommen Verzweigung- und Verbindungsknoten sowie Parallelisierungs- und Synchronisationsknoten [RQZ07, S.287].
- **Kante:** Kanten sind die Übergänge zwischen zwei Knoten (bspw. Aktionen oder Objektknoten). Sie sind stets gerichtet. Es werden zwei Arten von Kanten unterschieden: **Kontrollflüsse**, die zwischen zwei Aktionen oder zwischen einer Aktion und einem Kontrollelement bestehen und über die keine Objekte transportiert werden können. Und **Objektflüsse**, an denen mindestens ein Objektknoten beteiligt ist und die folglich auch Objekte übertragen [RQZ07, S.283f.].
- **Allokation:** Die Allokation, auch „Swimlane“ genannt, ermöglicht das Partitionieren einer Aktivität in verschiedene Bereiche. Dies kann dazu dienen, bspw. Verantwortlichkeiten, Abteilungen oder Subsysteme voneinander zu trennen und so unter anderem die Übersichtlichkeit des Diagramms zu erhöhen [RQZ07, S.304].

Neben den genannten Elementen existieren zwar noch einige weitere Modellelemente, die eben beschriebenen reichen aber für ein Grundverständnis des Aktivitätsdiagramms aus. Zur Erläuterung und zum Verständnis eines Aktivitätsdiagramms wird häufig der sog. Token herangezogen. Ein Token ist eine Marke, die logisch den Punkt anzeigt, an dem sich der Ablauf gerade befindet. Das Fortschreiten des Tokens bedeutet also die Abarbeitung einer Aktivität. Der Token transportiert auch das mögliche Objekt, das übertragen wird. An Entscheidungs- oder Vereinigungsknoten (dargestellt als Raute) geht immer nur ein Token heraus. An Parallelisierungsknoten hingegen vervielfacht sich der Token, sodass er an jeder ausgehenden Kante anliegt. Entsprechend wird ein Synchronisationsknoten erst dann ausgelöst, wenn an jedem Eingang ein Token anliegt. Abschließend zeigt Bild 3-18 ein Beispiel für ein UML-Aktivitätsdiagramm [RQZ07].

**Bewertung:** Das Aktivitätsdiagramm ist geeignet, Prozessfolgen formal zu beschreiben. Dabei bietet es mehr sprachliche Mittel als die bloße Modellierung von Abläufen. So können z.B. die transportierten Objekte näher spezifiziert werden. Daneben ermöglicht die Partitionierung der Aktivitäten die Zuordnung zu den Elementen, die diese Aktivität oder Aktion realisieren.

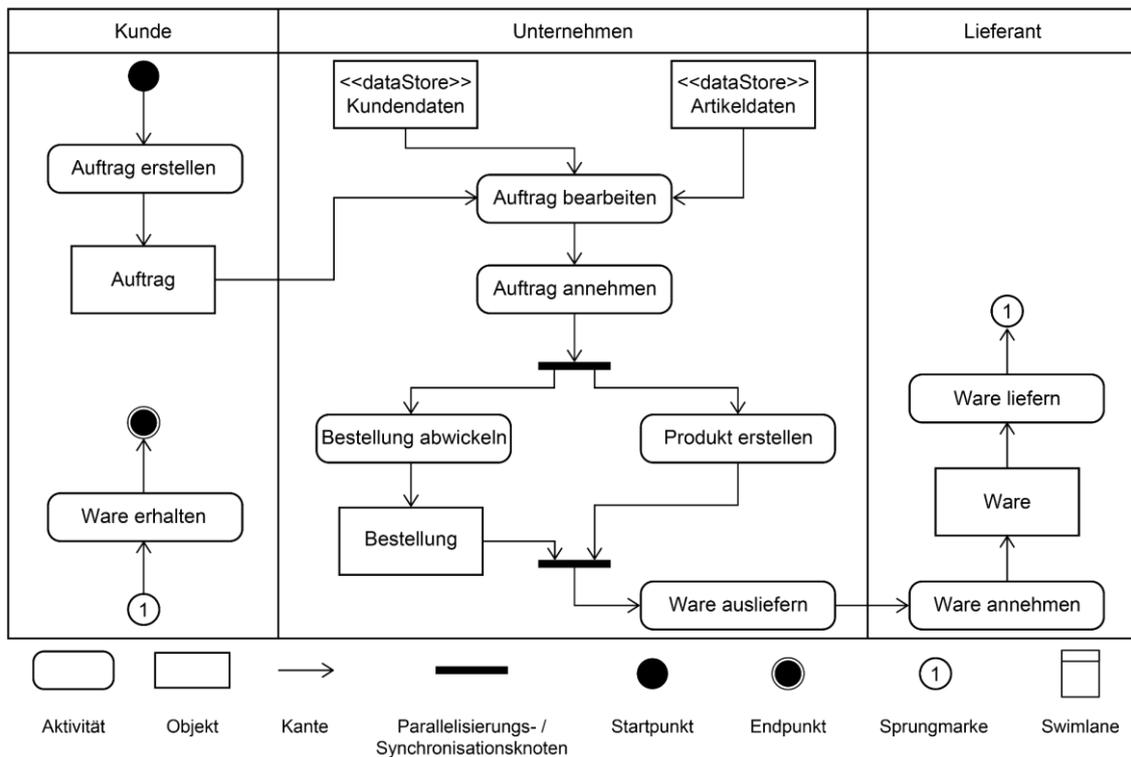


Bild 3-18: Vereinfachte Darstellung einer Auftragsbearbeitung (UML Aktivitätsdiagramm) [RQZ07, S.267]

### 3.3.4 Wertstrom-Diagramm

Die Wertstrommodellierung befasst sich mit der ganzheitlichen Betrachtung der Produktion. Das bedeutet, dass die Verbindungen aller Aktivitäten, die nötig sind, um ein Produkt vom Ausgangszustand in den gewünschten Endzustand zu bringen, betrachtet werden. Dies beinhaltet nicht nur die eigentlichen Fertigungsprozesse samt Materialfluss, sondern auch die Aktivitäten, mit denen Prozesse und Materialfluss gesteuert werden. Ein Wertstrom-Diagramm ist stets in fünf Bereiche unterteilt [Kle07]:

- **Kunde:** Kunden werden durch ein Fabriksymbol dargestellt und mit der Information versehen, welche Mengen an Produkten dieser in welchem Rhythmus erhält [Kle07, S.39].
- **Prozesse und Materialfluss:** Hier werden die Fertigungsprozesse in sachlogischer Reihenfolge dargestellt und zudem die Anzahl der Bediener und ähnliche Parameter notiert. Die Prozesse können natürlich hierarchisiert werden. Durch Pfeile wird der Materialfluss angezeigt. Außerdem können Bestände durch Dreiecke visualisiert werden [Kle07, S.42f.].
- **Steuerung und Informationsfluss:** In diesem Bereich werden die Steuerungsaktivitäten dargestellt. Dazu sind Funktionen nötig, die bestimmte Objekte, bspw. einen Fertigungsauftrag, erzeugen. Durch Pfeile wird der Strom dieses Objekts an den

entsprechenden Fertigungsprozess visualisiert. Der Transportweg, bspw. per Papier oder elektronisch, wird an dem Pfeil notiert [Kle07, S.55ff.].

- **Lieferanten:** Lieferanten werden wie Kunden behandelt und entsprechend dargestellt [Kle07, S.44].
- **Kennzahlen und Zeiten:** Dargestellt werden hier Durchlaufzeiten und Wertschöpfungszeiten [Kle07, S.44].

Das Wertstrom-Diagramm fokussiert nicht nur die Abläufe innerhalb der Fertigung, sondern den gesamten Ablauf der im Zusammenhang mit der Produktion steht. Dies ist vor allem sinnvoll, um den Gesamtprozess zu optimieren. Das bedeutet aber auch, dass eine umfassende Darstellung aller Prozesse, inklusive Nebenläufigkeit oder logischer Entscheidungen, in den Hintergrund rückt. Bild 3-19 zeigt als Beispiel den Abschnitt Prozesse und Materialfluss eines Wertstrom-Diagramms.

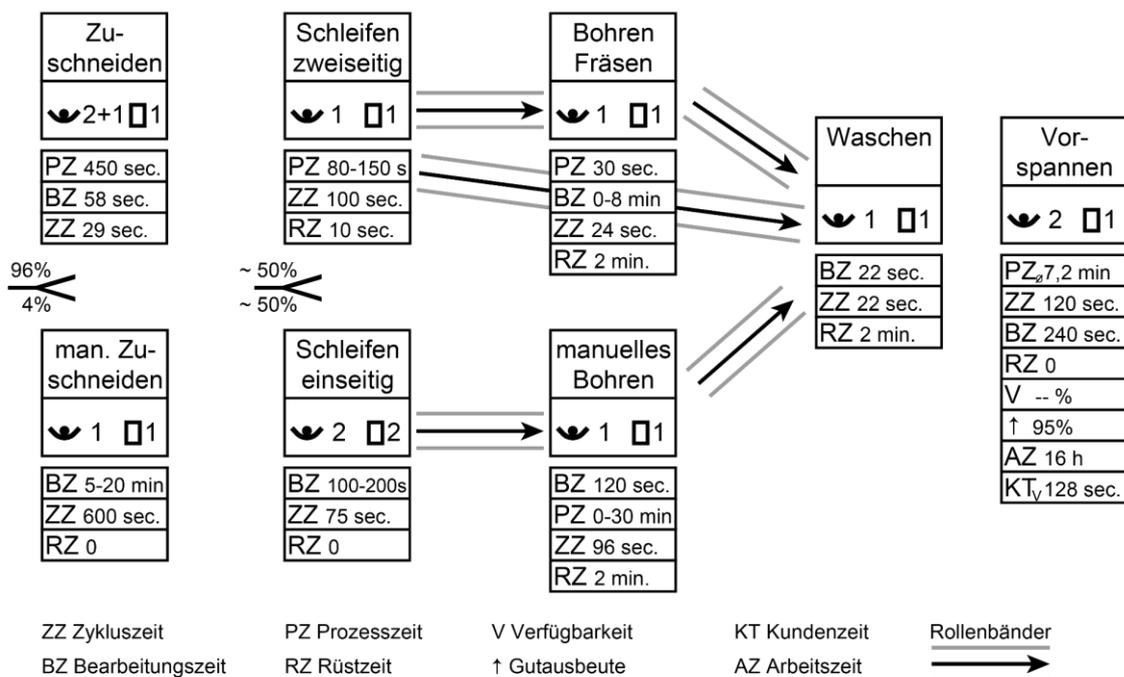


Bild 3-19: Beispielhafter Produktionsprozess als Wertstrom-Diagramm [Er10, S.339]

**Bewertung:** Mit dem Wertstrom-Diagramm werden Produktionsabläufe inklusive der Kunden- und Lieferantenbeziehungen und der Ablaufzeiten abgebildet. Damit legt es einen besonderen Fokus auf die ganzheitliche Betrachtung. Aus syntaktischer Sicht sind die Diagramme aber relativ simpel aufgebaut. So fehlen neben logischen Entscheidungsknoten oder Synchronisationen auch die in dieser Arbeit gesuchten Verknüpfungen der Fertigungsprozesse auf die Ressourcen. Hier werden nur die Funktionen berücksichtigt.

### 3.4 Handlungsbedarf

Ein Vergleich des Stands der Technik mit den in Kapitel 2.7 aufgeführten Anforderungen führt zu folgender Bewertung, die Bild 3-20 zusammenfasst:

**A1) Unterstützung der Planung flexibler Produktionsanlagen:** Die untersuchten durchgängigen Ansätze berücksichtigen grundsätzlich zwar den Planungsprozess von Produktionsanlagen. Sie gehen allerdings auf den Aspekt der Flexibilität kaum ein oder berücksichtigen ihn lediglich am Rande.

**A2) Einbeziehung der installierten Basis:** Die installierte Basis wird in einigen Ansätzen berücksichtigt. Dies geschieht, indem das bestehende System aufgenommen und mit seinen Schnittstellen beschrieben wird. Ein solches Vorgehen ist auch für das zu entwickelnde Konzept zu berücksichtigen.

**A3) Aufbau eines Systemmodells:** Grundsätzlich zielen zahlreiche untersuchte Ansätze auf den Aufbau eines Systemmodells. Im Falle der MBSE-Methoden liegt dies in der Natur der Methodik. Aber auch dedizierte Modellierungs- und Planungsansätze der Anlagenplanung propagieren ein Systemmodell, das das System in verschiedenen Sichten darstellt. Der Ansatz von GAUSEMEIER et al. zeigt auf, wie die benötigten Aspekte prinzipiell berücksichtigt werden können. SCHAEFER et al. beschreiben verschiedene Ebenen eines Systemmodells, die geeignet sind, verschiedene Abstraktionsniveaus zu berücksichtigen. Im Modellierungsansatz nach VOGEL-HEUSER wird ein umfassendes Systemmodell propagiert, das alle relevanten Subsysteme einer Anlage umfasst.

**A4) Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource:** Die Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource wird explizit im PPR-Modell nach FELDMANN adressiert, jedoch erfolgt dies nicht im Sinne eines durchgängig modellbasierten Ansatzes. Die Integrative Spezifikationstechnik nach GAUSEMEIER et al. leistet dies auch nur bedingt, da sie von einem zu entwickelnden Produkt ausgeht und das zugehörige Produktionssystem beschreibt.

**A5) Frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten:** Keiner der untersuchten Ansätze adressiert die frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten. Diese erfolgt weder im Bereich der Beschreibungssprachen durch entsprechende Modelle, noch innerhalb der untersuchten Planungsansätze.

**A6) Grundlage für Kommunikation/ Kooperation:** Zahlreiche untersuchte Ansätze sind geeignet, Kommunikation und Kooperation der Entwicklungsbeteiligten zu ermöglichen. Dies geht in der Regel mit der Erstellung eines Systemmodells einher, das die nötigen Informationen enthält.

**A7) Werkzeugunterstützung:** Vor allem die SysML-basierten Ansätze bieten eine Werkzeugunterstützung. Für die Sprache stehen zahlreiche Tools zu Verfügung. Andere Ansätze bieten teilweise dedizierte Werkzeuge. Die Ableitung von der SysML bietet den

besten Zugang zu einer Werkzeugunterstützung, da damit die gängigen SysML-Werkzeuge eingesetzt werden können.

Keine der untersuchten Ansätze und auch keine triviale Kombination selbiger erfüllt alle Anforderungen in vollem Umfang. Wesentliche Schwachstellen sind die Berücksichtigung von Flexibilität in der Systembeschreibung, die durchgängige Verknüpfung aller relevanten Aspekte und die Berücksichtigung von Produktvarianten. Es fehlt an einem Ansatz, der die Modellierung von Produktionsanlagen vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 adressiert. Somit besteht Handlungsbedarf für ein Konzept für eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering*.

<b>Bewertung</b> der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.  <b>Bewertungsskala:</b>  = nicht erfüllt  = teilweise erfüllt  = voll erfüllt		Anforderungen (A)						
		Unterstützung der Planung flexibler Produktionsanlagen	Einbeziehung der installierten Basis	Aufbau eines Systemmodells	Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource	Frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten	Grundlage für Kommunikation/Kooperation	Werkzeugeunterstützung
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung	Sprachkonzepte							
	PPR-Modell nach FELDMANN et al.							
	SysML4Mechatronics nach VOGEL-HEUSER							
	Sichtenkonzept nach SCHAEFER et al.							
	Integrative Spezifikation von Produkt und Produktionssystemen nach GAUSEMEIER et al.							
	Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse in der Produktion nach SCHOLZ-REITER							
	Methoden zur modellbasierten Anlagenplanung							
	Modellierungsmethodik für Produktionsanlagen nach BASSI et al.							
	Entwicklungsprozess für verteilte Automatisierungssysteme nach FAY et al.							
	MecPro <sup>2</sup> Referenzprozess für Cybertronische Produktionssysteme							
	SysML basierte MES-Konzipierung nach PIÉTRAC et al.							
	Methoden des MBSE	SysMod						
FAS								
OOSEM								
Ansätze der Prozessbeschreibung	Vorranggraphen							
	Beschreibungssprachen für Geschäftsprozesse							
	Aktivitätsdiagramm der UML/SysML							
	Wertstrom-Diagramm							

MBSE: Model-Based Systems Engineering

Bild 3-20: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen



## 4 Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit und präsentiert eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering*. Kapitel 4.1 gibt zunächst einen Überblick über das Konzept, das aus drei wesentlichen Bestandteilen besteht. In den darauf folgenden Kapiteln werden diese Bestandteile weiter erläutert. Die Basis für das Konzept bildet ein MBSE-Modellierungskonzept, das in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Es strukturiert die zu modellierenden Aspekte. In Kapitel 4.3 wird ein Vorgehen zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen vorgestellt. Es beinhaltet sowohl ein Vorgehensmodell, das den Anwender zur Erarbeitung eines Systemmodells anleitet, als auch eine detaillierte Beschreibung der Modellierung der einzelnen Sichten. In Kapitel 4.4 wird dann die prototypische SysML-basierte Implementierung einer Werkzeugunterstützung erläutert, die für die Anwendung des Modellierungskonzepts benötigt wird.

Zur Illustration des Konzepts wird in diesem Kapitel eine **Abfüllanlage** als **Beispiel** verwendet. Die Abfüllanlage füllt Flaschen der Größen 0,5 L und 1,0 L ab. Die Flaschen werden verschlossen und abhängig von ihrer Größe mit einem oder zwei Etiketten versehen. Zuletzt erfolgt eine Bündelung zu sechs Flaschen. Es sei an dieser Stelle jedoch betont, dass es sich um ein veranschaulichendes Beispiel handelt, bei dem nicht der Anspruch einer vollständigen Modellierung besteht. Die im Folgenden genutzten Modelle haben Beispielcharakter und stellen letztlich nur Ausschnitte des Gesamtmodells einer Abfüllanlage dar.

### 4.1 Die Systematik im Überblick

Die Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen ist in Bild 4-1 visualisiert. Es besteht aus drei Bestandteilen:

Das **MBSE-Modellierungskonzept** bildet die Grundlage des Ansatzes. Es beschreibt die Sichten des Systemmodells, die durch Diagramme und die enthaltenen Modellelemente realisiert werden. Zwischen den Modellelementen bestehen Beziehungen, die die einzelnen sich ergänzenden Aspekte letztlich zu einem Systemmodell integrieren. Das Modellierungskonzept hat den Anspruch, die Modellierung einer flexiblen Produktionsanlage im Sinne des MBSE zu ermöglichen und damit die Planung solcher Systeme zu unterstützen.

Das **Vorgehensmodell** leitet dazu an, ein Systemmodell unter Berücksichtigung des MBSE-Modellierungskonzepts aufzubauen. Es beschreibt, wie der Anwender die einzelnen Aspekte erarbeiten und modellieren kann. Das Vorgehen ist so aufgebaut, dass die einzelnen Schritte inhaltlich und modelltechnisch aufeinander aufbauen. Die Anwendung des Vorgehens unterstützt die Planung und die Erweiterung einer flexiblen

Produktionsanlage. Es liefert als Resultat eine entsprechende Anlagenstruktur, die mit den Mitteln des MBSE beschrieben ist.

Um das Modellierungskonzept zur Anwendung zu bringen, ist eine entsprechende **Werkzeugunterstützung** nötig. Sie ermöglicht die rechnerinterne Repräsentation des Systemmodells und ist insb. für die Pflege und Weiterverwendung des Modells unerlässlich. Um die Weiterverwendung der erarbeiteten Inhalte zu gewährleisten, wird im Rahmen dieser Arbeit das Open-Source-Produkt Eclipse-Papyrus gewählt [Pap17-ol].

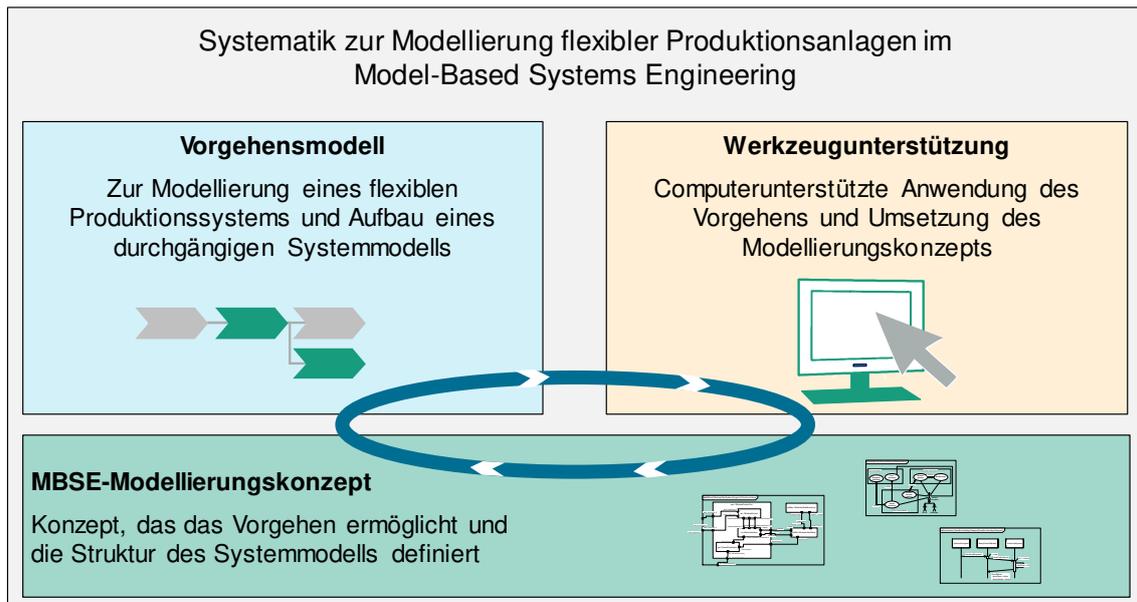


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen

Um die Integration in das Model-Based Systems Engineering zu erlauben und eine Werkzeugunterstützung zu ermöglichen, beinhaltet der Ansatz zur Werkzeugunterstützung ein **SysML-Profil**. Es setzt das Modellierungskonzept um, indem es die Modellierungssprache formal definiert. Dabei erweitert es die SysML um entsprechende modellierungssprachliche Elemente bzw. Stereotypen. Durch die Referenzierung des Quasi-Standards SysML wird erreicht, dass der Ansatz auf Basis des Profils praktisch mit allen SysML-Werkzeugen zur Anwendung gebracht werden kann. Außerdem ist es so möglich, MBSE-Ansätze aus verschiedenen Anwendungsbereichen wie bspw. der Produktspezifikation oder der Absicherung zusammenzuführen, vorausgesetzt, dass auch diese auf der SysML basieren.

## 4.2 MBSE-Modellierungskonzept

Das Modellierungskonzept wird im folgenden Abschnitt 4.2.1 erläutert. An dieser Stelle erfolgt zunächst die Beschreibung der Modellarchitektur. Die Modellarchitektur beschreibt, welche inhaltlichen und modelltechnischen Aspekte im Systemmodell enthalten sein sollen und wie diese zueinander in Beziehung stehen. Die Festlegung einer



In der **technischen Sicht** finden sich Informationen zu technischen Beziehungen in der Anlage und Eigenschaften des Produkts. Das Ziel ist, die technisch bzw. physikalisch relevanten Informationen abzubilden. Als relevant sind in diesem Zusammenhang Informationen einzustufen, die für die Lösungsfindung bzw. den weiteren Produktentstehungsprozess von Bedeutung sind und mehr als einem Stakeholder haben (an dieser Stelle sei auch auf die Modellbildung im Sinne des MBSE (Kap. 2.5.3) und der Modelltheorie (S. 8) verwiesen). Konkret bedeutet dies, dass die Frage nach der Modelltiefe bzw. -detaillierung immer nur vor dem Hintergrund des Entwicklungsprojekts beantwortet werden kann. Ob also bspw. die Beziehungen innerhalb eines Elektromotors modelliert werden sollen oder ob die Beschreibung von Schnittstellen (also etwa der Stromaufnahme, der Ausgangswelle und Art der Befestigung) ausreicht, hängt davon ab, inwieweit im Laufe des Entwicklungsprojekts Einfluss auf diesen Elektromotor genommen wird, ob es Störbeziehungen zu beachten gilt oder inwieweit die Wärmeentwicklung zu betrachten ist. Diese Einschätzung ist Aufgabe des (System-)Ingenieurs. Ziel in der technischen Sicht ist es also, die technischen Abhängigkeiten zu beschreiben. Für das zu produzierende Produkt bedeutet dies, dass beschrieben wird, aus welchen Bestandteilen das Produkt besteht, und wie diese Bestandteile von einem Ausgangs- in einen Zielzustand überführt werden können. Insbesondere sind dabei auch die entsprechenden Bedingungen zu beschreiben, die zu einem Zustandsübergang führen. Auf Anlagenebene werden Abhängigkeiten und Schnittstellen der Systemelemente beschrieben.

In der **funktionalen Sicht** werden hingegen lösungsneutral Zusammenhänge dargestellt, die funktionalen Charakter haben – dies sind insb. Prozessfolgen. Die Modellierung und Benennung von Prozessen und Funktionen soll dabei bewusst keine Lösung vorwegnehmen. Prozesse werden daher typischerweise lediglich durch ein entsprechendes Verb oder einer Substantiv-Verb Kombination beschrieben. Auch Funktionen werden, soweit möglich, als Substantiv-Verb Kombination formuliert. Ferner ist darauf zu achten, auch durch die Wahl der Beschreibung keine Lösung vorweg zu nehmen. Ein Prozessschritt „Werkstück abdrehen“ wäre also unglücklich gewählt, da er bereits die Lösung auf einer Drehmaschine vorwegnimmt. Der Prozess sollte vielmehr bspw. „Rundteil herstellen“ genannt werden. Auf Basis der funktionalen Beschreibung können Lösungselemente systematisch zugeordnet werden.

Das Systemmodell gliedert sich darüber hinaus in drei Ebenen. Diese werden nachfolgend erläutert.

Auf der **Prozessebene** liegt der Fokus auf der Beschreibung des Produkts und der Prozesse, welche die Anlage realisiert. Die zentrale Fragestellung der Modellierung ist, welche Arten von Produkten auf welche Weise verarbeitet werden sollen. Dazu wird die Zustandsbeschreibung des Produkts erstellt. Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Produkten bzw. ihrer Vorstufen werden ebenso beschrieben. Alle möglichen Werkstücke – seien es Ausgangswerkstoffe, Halbzeuge oder Teilprodukte sowie Endprodukte – werden allgemein als Objekte betrachtet. Für die Objekte kann definiert werden, in welchem Ausgangszustand sie sich zu Beginn des Prozesses befinden, welche Zustandsübergänge sie

erfahren können und welcher Endzustand angestrebt wird. In der funktionalen Sicht kann auf Basis dieses Wissens ein Ablauf der nötigen Fertigungsprozesse modelliert werden.

Auf **Anlagenebene** wird dann die Anlage selbst beschrieben. Hier werden zum einen die funktionalen bzw. prozessualen Zusammenhänge modelliert sowie die technischen Wechselwirkungen der in der Anlage befindlichen Produktionssysteme oder Systemelemente beschrieben. Die zu realisierenden Fertigungsprozesse sind im Allgemeinen bereits durch die modellierte Prozessebene bekannt. Sie werden in der funktionalen Sicht zu den jeweiligen, die Prozesse realisierenden, Fertigungsressourcen zugeordnet. Damit ergeben sich einige zentrale Bestandteile der Anlage. In der technischen Sicht werden auch alle weiteren Teilsysteme der Anlage (in geeignet abstrahierter Form) modelliert und in Beziehung gesetzt.

Auf **Teilsystemebene** werden die einzelnen Produktionssysteme modelliert. Auch hier werden, ähnlich wie auf Anlagenebene, technische Beziehungen und die funktionale Struktur beschrieben. Auf der funktionalen Seite wird, wie für im MBSE für konventionelle technische Systeme üblich, eine Funktionshierarchie modelliert, die die Gesamtfunktion (im Falle eines Produktionssystems den zu realisierenden Prozessschritt) in Teilfunktionen aufschlüsselt. In der technischen Sicht werden die Systemelemente und ihre Beziehungen untereinander sowie zu ihrer Umwelt beschrieben.

Ziel des Modellierungskonzepts ist ein durchgängiges Systemmodell. Der Ansatz berücksichtigt daher, die verschiedenen beschriebenen Aspekte zu verknüpfen. Konkret bedeutet dies, dass die modellierten Produkte bzw. Objekte verknüpft werden mit den Zuständen, die sie einnehmen können und der Produktionsanlage, durch die sie geschleust werden. Die Produktionsanlage besteht wieder aus Teilsystemen, die weiter hierarchisiert werden. Im Folgenden wird erläutert, wie die genannten Querbeziehungen im Modell realisiert werden.

Bild 4-3 zeigt die Zusammenhänge zwischen der Modellierung des Produktionsobjekts – also dem zu produzierendem Produkt oder Teilen davon – und der Anlagenstruktur. Die Definition der Produktionsobjekte erfolgt in den Bildteilen A, B und C. Die entsprechende Anlage ist in Teil D abgebildet. Die konkreten Modellierungsvorschriften werden im späteren Abschnitt 4.2.2 vorgestellt. An dieser Stelle sollen die Zusammenhänge der Bereiche erläutert werden.

In Bereich A erfolgt die Definition der **Produktionsobjekte**. Es können **Aggregationen** beschrieben werden, die entstehen, wenn ein Teil durch das Zusammenfügen zweier Bauteile entsteht. Außerdem können **Generalisierungen** beschrieben werden, mit denen gleiche Objekteigenschaften zusammengeführt werden. Dementsprechend besteht ein Flaschengebinde aus mehreren Flaschen sowie einer Verpackung. Die Eigenschaften einer 0.5L Flasche lassen sich damit abstrahieren zu einem Objekt Flasche.

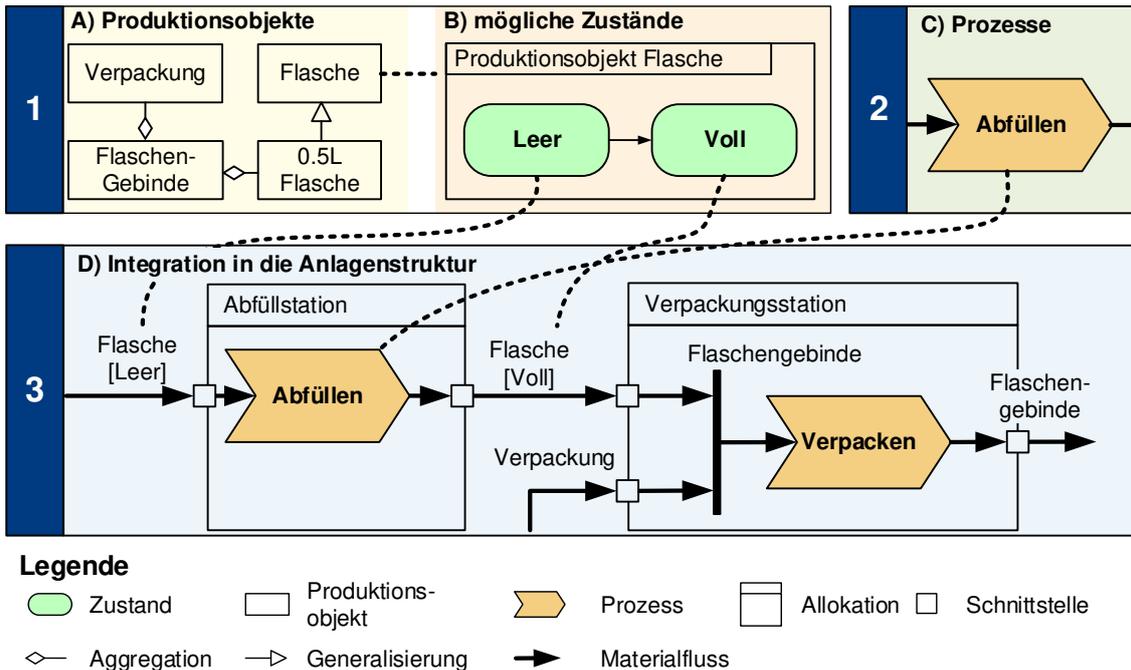


Bild 4-3: Zusammenhänge der Modellierung des Produktionsobjekts

Jedem Objekt, in diesem Beispiel dem Objekt „0,5L Flasche“, können **Zustände** zugeordnet werden (Bildteil B). Das Produktionsobjekt kann von einem Ausgangs-, über eine Zwischen- in einen Endzustand überführt werden. Die Überführung in den Endzustand ist Aufgabe einer Produktionsmaschine.

In Bildteil C ist der **Prozess** abgebildet, der sich aus dem betrachteten Zustandsübergang herleitet. Da das Produktionsobjekt vom Ausgangszustand Leer in den Zielzustand Voll überführt werden soll, ist ein Prozessschritt Abfüllen notwendig. Er wird im weiteren Verlauf der Modellierung ggf. in vor- oder nachgeschaltete Prozesse integriert. Angemerkt sei, dass sich die Beschreibung der Prozesse auf das konkret betrachtete Produktionsobjekt bezieht.

Bildteil D zeigt die **Anlagenstruktur**, die das definierte Objekt produziert. Sie führt die modellierten Prozesse (die ggf. auch aus mehrere Prozessdiagramm bzw. verschiedenen zu produzierenden Produkten stammen können) zusammen. Ein Teilsystem der Anlage wird hierbei durch eine Allokation repräsentiert, welche Ein- und Ausgänge in Form von Materialflüssen hat. Die Schnittstellen dieser Allokationen werden klassifiziert durch ein zuvor definiertes Objekt. In der Abfüllstation wird das Fertigungsobjekt Flasche vom Ausgangs- in den Endzustand überführt. In der Verpackungsstation wird das aggregierte Objekt, also das Gebinde erzeugt; hierfür benötigt es als Eingang das Fertigungsobjekt Flasche sowie ein weiteres Objekt: die Verpackung. Durch die Allokation wird also die Verbindung zu den zu produzierenden Objekten der Anlage hergestellt. Auf andere notwendige Prozesse wie den Verschluss der Flaschen oder die Pufferung wird in diesem verkürzten Beispiel der Einfachheit wegen nicht eingegangen.

Bild 4-4 zeigt die weitere Modellierung der Anlage. Diese wird durch eine Wirkstruktur beschrieben. Die Produktionsobjekte werden dabei mittels Stoffflüssen zwischen den Teilsystemen der Anlage transportiert.

Zu sehen ist in Bildabschnitt A die **Wirkstruktur der Anlage** mit den bereits zuvor beschriebenen Produktionssystemen Abfüllstation und Verpackungsstation. Dargestellt werden hier die technischen Abhängigkeiten und Flüsse in der Anlage

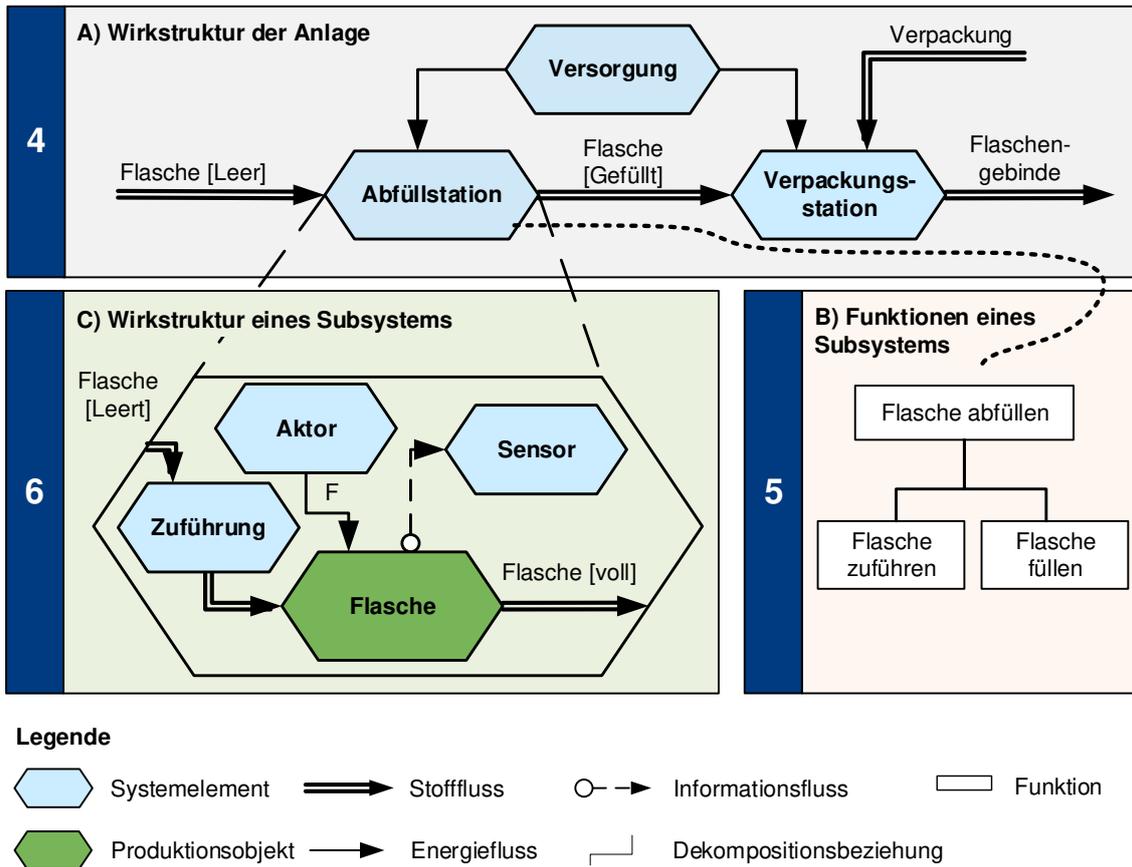


Bild 4-4: Zusammenhänge zwischen Anlagen- und Maschinenbeschreibung

Zur funktionalen Beschreibung eines Subsystems kann eine **Funktionshierarchie**, wie in Bildabschnitt B visualisiert, verwendet werden. Sie ist verknüpft mit dem entsprechenden Systemmodell. Die Gesamtfunktion leitet sich aus dem zugeordneten Prozess (in der Allokationssicht) ab.

Jedes Systemelement der Anlage kann weiter detailliert werden. So ergibt sich bspw. für die Abfüllstation eine weitere **Wirkstruktur eines Subsystems** (Bildabschnitt C). Innerhalb dieser Wirkstruktur können die zu bearbeitenden Objekte nicht nur als Flüsse betrachtet, sondern auch dezidiert als Produktionsobjekte modelliert werden. Der Modellierer befindet sich sonst in dem Dilemma, ein Produktionsobjekt in der Wirkstruktur zwar als Fluss, nicht jedoch als physisches Element modellieren zu können. Dies ist aber notwendig, weil Systemelemente auch konkret auf das Produktionsobjekt einwirken.

Beispielsweise ist zum Verpacken der Flaschen eine Krafteinwirkung erforderlich, um die Flaschen in Position zu bringen.

## 4.2.2 Modellierung der Sichten

Im Folgenden wird die Modellierung der einzelnen Ebenen der Modellarchitektur und der entsprechenden Sichten vorgestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden daher die drei Ebenen Prozessebene, Anlagenebene und Teilsystemebene erläutert. Bei der Definition der Sichten wird, soweit möglich, auf bestehenden Ansätzen der SysML oder CONSENS aufgebaut. Es werden die zu verwendenden Modellelemente und die entsprechenden Modellierungsregeln erläutert. Die hier dargestellten Modellelemente stellen die Grundlage für das in Kap. 4.4.1 vorgestellte SysML-Profil dar.

Als **Beispiel** wird dafür weiterhin eine flexible **Abfüllanlage** verwendet. Die Anlage füllt Flaschen der Größen 0,5 L und 1 L ab. Die Flaschen werden verschlossen und abhängig von ihrer Größe mit einem oder zwei Etiketten versehen. Zuletzt erfolgt eine Bündelung zu sechs Flaschen.

### 4.2.2.1 Prozessebene

Die Prozessebene dient der Beschreibung des Produktionsprozesses und der Objekte oder Produkte, die produziert werden. Hierbei wird die eigentliche Produktionsanlage bewusst ausgeklammert – sie wird in der darunterliegenden Ebene beschrieben. Die Prozessebene ist vergleichbar mit der Modellierung zum Planen und Klären der Aufgabe im Sinne der Konstruktionsmethodik [PBF+07].

Zentraler Gegenstand der Modellierung sind die zu produzierenden Produkte. Ein Produkt, Teilprodukt, Halbzeug o.ä. wird in der Modellierung als Produktionsobjekt angesehen. Ein Produktionsobjekt kann aus anderen Produktionsobjekten bestehen. Außerdem kann ein Produktionsobjekt verschiedene Zustände aufweisen – es kann bspw. verschmutzt oder sauber sein. Ziel der Produktionsanlage ist es zum einen, die Produktionsobjekte von ihrem Ausgangszustand in den gewünschten Endzustand zu bringen. Zum anderen zielt es darauf, das gewünschte Produktionsobjekt durch Zusammenfügen der Teilobjekte herzustellen. Die Anlage stellt dafür die entsprechenden Fertigungs- und Montageprozesse bereit.

Auf der Prozessebene erfolgen also drei Modellierungen: Die Produktionsobjekte werden definiert, die möglichen Zustände der Produktionsobjekte werden beschrieben und die als Resultat benötigten Prozesse werden modelliert. Bild 4-5 visualisiert diese modelltechnischen Zusammenhänge.

Im Folgenden werden die drei genannten Aspekte konkret erläutert. Auch wenn dabei eine logische Reihenfolge der inhaltlichen Erarbeitung zugrunde liegt, ist ein iteratives

Vorgehen zur Erarbeitung der Inhalte notwendig. Zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Aspekten sind der Grund.

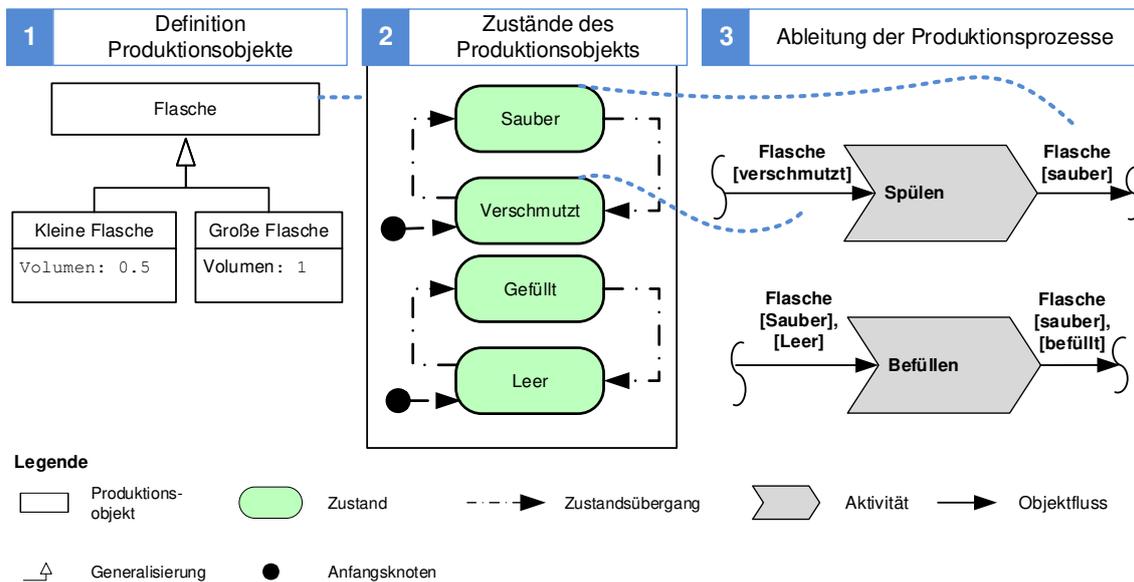


Bild 4-5: Übersicht Modellierungsaspekte auf Prozessebene

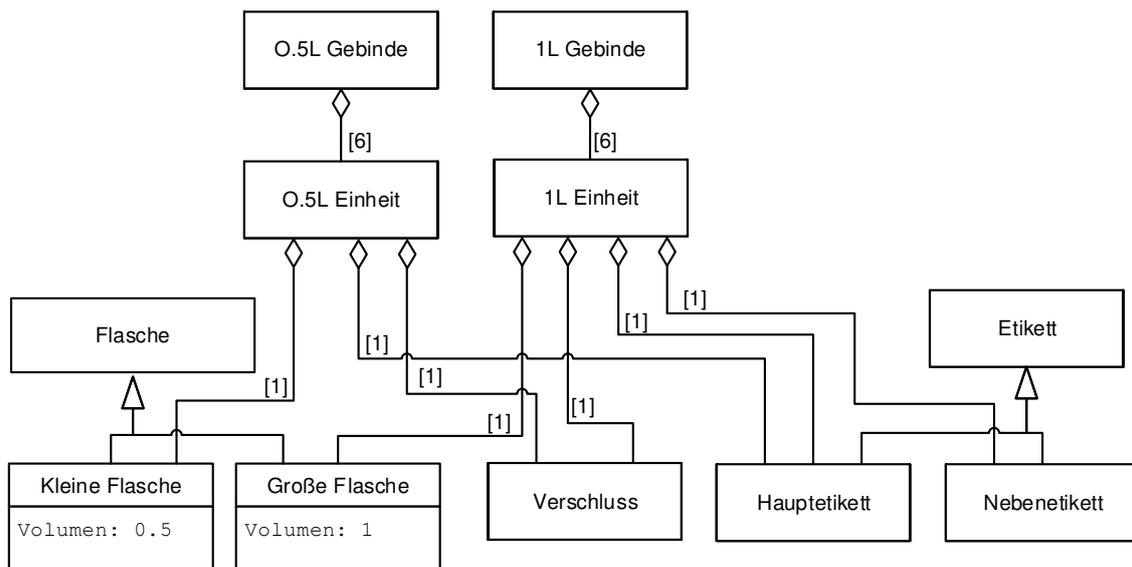
## Modellierung der Produktionsobjekte

Die Produktionsobjekte repräsentieren das Produkt bzw. dessen Vorstufen. Im Modell der Produktionsobjekte werden die Objekte definiert und eine Dekomposition vorgenommen, die sich in einer entsprechenden Montagefolge spiegelt. Die Objekte verfügen außerdem über Eigenschaften und insb. Zustände. Letztere werden separat modelliert und den Objekten zugeordnet. Sie können aber zwischen den Objekten vererbt werden. Bild 4-6 zeigt ein beispielhaftes Modell von Produktionsobjekten.

Zur Beschreibung der Produktstruktur wird die **Aggregationsbeziehung** genutzt. Sie beschreibt die Dekomposition eines Objekts in Teilobjekte. Anders herum formuliert ergibt sich aus der Montage oder Zusammenfügung von Teilobjekten das durch die Aggregation beschriebene Objekt. Die Aggregationsbeziehung kann ferner mit einem Multiplizitätsfaktor versehen werden. Im oben gezeigten Beispiel werden zwei verschiedene Gebinde (0,5 L oder 1 L) mit je sechs Einheiten unterschieden. Die Einheiten bestehen aus Flaschen der entsprechenden Größe und werden außerdem mit Etikett und Verschluss versehen. Zu erkennen ist, dass beide Größen mit einem Hauptetikett versehen werden. Die größere Flasche verfügt zusätzlich über ein Nebenetikett. NORDSIEK beschreibt ein Verfahren und ausgehend von der Produktkonzeption die Baustruktur abzuleiten [Nor12]. Dieser Ansatz kann an dieser Stelle genutzt werden um die Produktionsobjekte hierarchisch (hinsichtlich der Montage) zu erarbeiten.

Um Eigenschaften von Produktionsobjekten zusammenführen zu können, wird die **Generalisierungsbeziehung** genutzt. Sie drückt aus, dass verschiedene Objekte Eigenschaften von ihrem gemeinsamen Eltern-Objekt erben. Dies ist insb. für die folgende Modellierung der Zustände interessant. Im Beispiel unterscheiden sich die beiden Flaschenarten

prinzipiell nur durch ihre Größe. Andere Eigenschaften und insb. Prinzipien der Handhabung sind gleich. So wird nur ein Zustandsdiagramm für das Objekt „Flasche“ modelliert, das dann für beiden Flaschentypen gilt. Dieser Zusammenhang ist auch im weiteren Verlauf der Lösungsfindung relevant. So lassen sich bspw. Abfüllstationen finden, die beide Flaschengrößen handhaben können. Es macht dann Sinn, direkt auf das Objekt „Flasche“ zu verweisen, wodurch die erbbenden Objekte eingeschlossen sind (Prinzip der Polymorphie, siehe Abschnitt 2.5.2). Die folgende Tabelle 4-1 listet die Modellelemente übersichtlich auf. Die Modellelemente sind der Klassennotation der UML bzw. der Blockdiagrammnotation der SysML entnommen und werden auf die Beschreibung von Produktionsobjekten übertragen.



#### Legende



Bild 4-6: Produktionsobjektstruktur für eine Abfüllanlage (vereinfachtes Beispiel)

Tabelle 4-1: Modellelemente für die Modellierung der Produktionsobjekte

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Produktionsobjekt		Ein Produktionsobjekt ist ein Werkstück oder (Teil-)Produkt, das innerhalb einer Produktionsanlage gehandhabt oder produziert wird. Das Produktionsobjekt kann durch Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Objekten konkreter beschrieben werden.
Generalisierung		Diese Beziehung drückt eine Vererbung von Eigenschaften zwischen Objekten aus. Vererbt werden können dabei insb. mögliche Zustände eines Objekts.
Aggregation		Die Aggregationsbeziehung drückt aus, aus welchen Bestandteilen ein Produktionsobjekt besteht. Die Aggregation spiegelt sich typischerweise in Form eines Montage- oder Fügeprozesses in der Prozesssicht wider.

### Modellierung der Zustände von Produktionsobjekten

Ziel dieses Diagramms ist es, darzustellen, was mit einem Produktionsobjekt geschehen kann und soll. Ein Produktionsobjekt hat einen bestimmten Ausgangszustand und einen gewissen Zielzustand. Eine Flasche kann im Beispiel der Abfüllanlage verschmutzt oder sauber sein sowie leer oder gefüllt. Ziel des Prozesses ist, die Flasche zu füllen. Dies kann jedoch nur geschehen, wenn diese auch sauber ist. Es bedarf daher zunächst eines Spülprozesses, um einen sauberen Zustand herzustellen. In Bild 4-7 ist das genannte Beispiel modelliert.

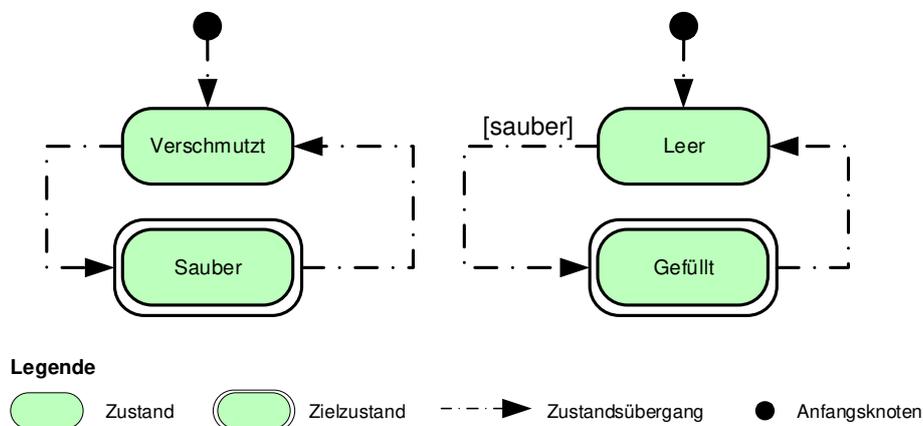
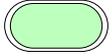
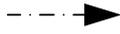


Bild 4-7: Zustandsdiagramm für Produktionsobjekt „Flasche“ in einer Abfüllanlage (vereinfachtes Beispiel)

Die Anfangsknoten zeigen den initialen Zustand des Objekts an. Grundsätzlich gilt, dass sich ein Objekt parallel in mehreren Zuständen befinden kann. Daher sind auch mehrere Anfangsknoten erlaubt. Die Zielzustände des Objekts werden mit einer speziellen Form des Zustands gekennzeichnet. Der mögliche Zustandsübergang wird ebenfalls modelliert. Dieser wird erwirkt durch einen entsprechenden fertigungs- oder verfahrenstechnischen Prozess. Der Zustandsübergang kann mit Bedingungen versehen werden, wodurch letztlich Anforderungen an den Materialfluss oder auch den einzelnen Prozess gestellt werden. So kann im Beispiel die Flasche nur gefüllt werden, wenn sie sauber ist. Andere Bedingungen wie möglicherweise den benötigten Reinheitsgrad, können annotiert werden. Tabelle 4-2 listet die zur Verfügung stehenden Modellelemente auf. Die Beschreibungselemente entstammen größtenteils aus der Notation von Zustandsautomaten. Sie sind um das Element des Zielzustands erweitert.

*Tabelle 4-2: Modellelemente für die Modellierung der Produktionsobjekt-Zustände*

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Zustand		Beschrieben wird der Zustand, in dem sich ein Produktionsobjekt befinden kann. Mehrere parallele Zustände sind möglich.
Zielzustand		Eine spezielle Form des Zustands, der das durch den Prozesseinsatz zu erreichende Ziel beschreibt.
Zustandsübergang		Der Zustandsübergang beschreibt die Transition von einem Zustand in einen anderen. Der Übergang kann mit Bedingungen und Auslösern versehen werden.
Anfangsknoten		Der Anfangsknoten ist der Einstieg in das Zustandsdiagramm. Er verweist (mittels Zustandsübergang) auf den Zustand, der initial bei einem Produktionsobjekt vorliegt.

### Modellierung der Prozesse

Das Prozessmodell stellt eine funktionale und lösungsneutrale Sicht auf die Produktionsanlage dar. Sie basiert inhaltlich auf den zuvor beschriebenen Aspekten der Produktionsobjektmodellierung. Gegenstand der Modellierung ist eine Prozessfolge zur Erzeugung der zu produzierenden Produkte. Die Prozesse sind geeignet, Zustandsübergänge der Objekte herbei zu führen oder sie zu aggregieren. Verbunden werden die Prozesse mit Objektflüssen, an die das fließende Objekt mit seinen relevanten Zuständen annotiert wird. Das Prozessmodell beschreibt also die nötigen Prozessschritte, um aus den

Ausgangsprodukten das gewünschte Endprodukt herzustellen. Die Prozessschritte beziehen sich speziell auf die Produktionsobjekte. Sie beschreiben also im weiteren Sinne Fertigungsprozesse. Weitere Produktionsprozesse wie bspw. Logistikprozesse werden noch nicht modelliert. Diese werden erst auf Anlagenebene ergänzt. Bild 4-8 zeigt das Beispiel eines Prozessmodells.

Im Beispielmodell ist zu erkennen, dass das Objekt „Flasche“ zunächst gereinigt und anschließend befüllt wird. Die entsprechenden Zustände sind an den Objektflüssen annotiert. Neben Prozess und Objektfluss stehen Knoten für die Parallelisierung/Synchronisation und Entscheidung/Zusammenführung zur Verfügung. Eine Synchronisation wird genutzt, da bspw. für das Verschließen der Flasche zwei Objekte für den Prozess bereitstellen müssen: die Flaschen selbst und der Verschluss. Im weiteren Verlauf wird ein Entscheidungsknoten genutzt, um zwischen kleiner und großer Flasche zu unterscheiden – die Flaschen werden unterschiedlich etikettiert. Die Produktionsprozesse der Anlage werden somit mit Bezug auf die definierten Objekte modelliert.

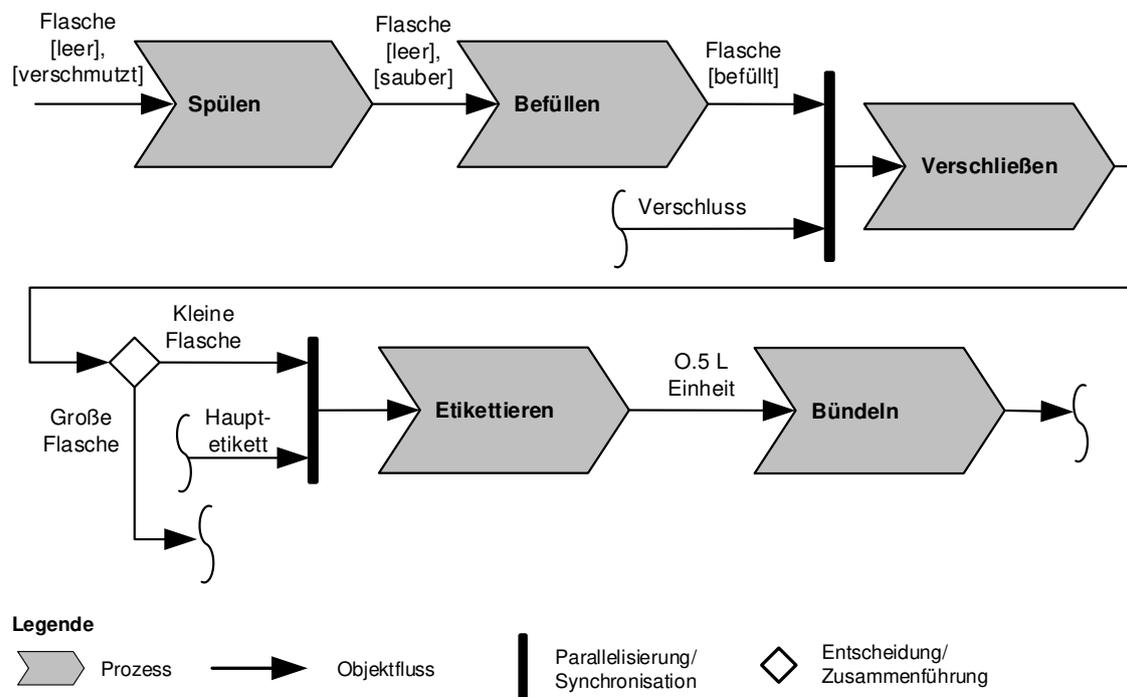
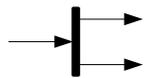
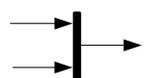
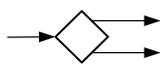
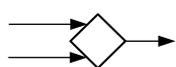


Bild 4-8: Prozessmodell für eine Abfüllanlage (vereinfachtes Beispiel)

Die Modellierung der Prozesse orientiert sich insgesamt am Aktivitätsdiagramm der UML/SysML. Die Modellelemente sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Anders als in der UML/SysML wird als Transition ein Objektfluss definiert, der die zuvor beschriebenen Objekte gewissenmaßen transportiert. Auf die Modellierung weitere Flüsse, wie bspw. eines Kontrollflusses wird verzichtet.

Tabelle 4-3: Modellelemente für die Modellierung der Produktionsprozesse

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Prozess		Prozessschritt, der einen Vorgang in der Produktion beschreibt. Ein Prozess führt bspw. einen Zustandsübergang eines Produktionsobjekts herbei oder erzeugt ein Objekt auf Basis einer Aggregationsbeziehung.
Objektfluss		Beschreibt das Aufeinanderfolgen von Prozessen. Ein Objektfluss transportiert gedanklich das Produktionsobjekt, das Ergebnis eines Prozesses ist, zum Eingang des nächsten Prozesses.
Startpunkt		Beschreibt den Startpunkt der Prozessfolge.
Endpunkt		Beschreibt den Endpunkt der Prozessfolge.
Parallelisierung		Die Parallelisierung stößt alle folgenden Prozess gleichzeitig an, wenn der hinführende Prozess ausgeführt wurde.
Synchronisation		Der folgende Prozess wird erst ausgeführt, wenn alle hinführenden Prozesse ausgeführt wurden bzw. die entsprechenden transportierten Objekte vorliegen.
Entscheidung		Abhängig von der hinterlegten Entscheidungsregel wird der entsprechende Ausgang gewählt und einer der folgenden Prozesse angestoßen.
Zusammenführung		Wenn einer der hinführenden Prozesse ausgeführt wurde, wird der folgende Prozess angestoßen.

#### 4.2.2.2 Anlagenebene

Auf Anlagenebene wird die Produktionsanlage selbst beschrieben. Dabei kann eine funktionale und eine strukturelle Sicht gewählt werden. In der funktionalen Sicht stehen die Prozesse der Anlage im Vordergrund. Sie werden modelliert und mit den Maschinen oder Subsystemen verknüpft, die diese ausführen. Dies erfolgt mit Hilfe von Allokationen, welche das charakteristische Unterscheidungsmerkmal zur Prozessmodellierung auf Prozessebene darstellen. Die Sicht wird in dem vorliegenden Konzept daher als

Allokationssicht bezeichnet. Die strukturelle Sicht beschreibt im Gegensatz hierzu alle in der Anlage befindlichen Maschinen oder Teilsysteme ohne ihren funktionalen Charakter. Es werden vielmehr statische oder strukturelle Beziehungen beschreiben. Die in der Allokationssicht verknüpften Systeme tauchen hier wieder als Systemelemente auf. Es werden darüber hinaus aber weitere Teile der Anlage beschrieben, die zwar keinen Produktionsprozess ausführen, für die Anlage aber dennoch von Bedeutung sind, wie bspw. eine Energieversorgung der Teilsysteme.

Der Zusammenhang der beiden genannten Modelle auf Anlagenebene ist in Bild 4-9 visualisiert. Nachfolgend wird die Modellierung der beiden Sichten im Detail erläutert.

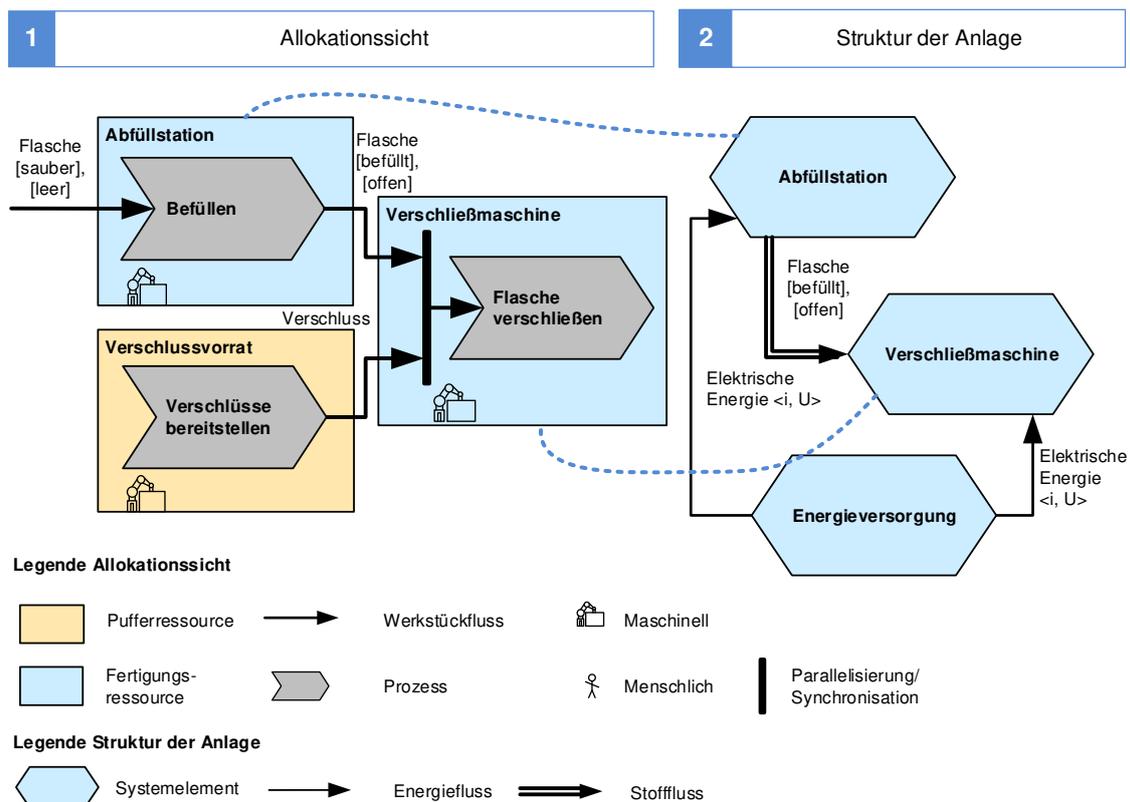


Bild 4-9: Zusammenhang zwischen den Modellen auf Anlagenebene

### Modellierung der Allokationssicht

Die Ausgangsbasis für die Allokationssicht bildet die vorangegangene Prozessbeschreibung. Sie wird in zweierlei Hinsicht erweitert. Die bisher modellierten Prozesse haben sich auf den zentralen Produktionsprozess bezogen. Nebenprozesse, die bspw. für die Bereitstellung von Material benötigt werden, werden also auf der Anlagenebene ergänzt. Darüber hinaus wird durch Allokationen der Bezug zu den ausführenden

Produktionsressourcen<sup>21</sup> hergestellt. So entsteht die Verknüpfung der Prozesse auf bzw. mit der Struktur der Anlage.

Unter den Produktionsressourcen werden drei Arten unterschieden: **Fertigungsressourcen** führen die klassischen Fertigungsprozesse durch. Sie realisieren die Prozesse, die auch einen Zustandsübergang eines Produktionsobjekts auslösen können. **Pufferressourcen** dienen dazu, Material oder Produktionsobjekte zwischenzulagern. Sie werden benötigt, um Prozesse mit unterschiedlichen Taktungen zu verbinden. Auch beim Übergang von diskreten zu kontinuierlichen Prozessen oder umgekehrt werden sie benötigt. **Transportressourcen** dienen dazu, den Materialfluss zwischen den übrigen Ressourcen herzustellen. Prinzipiell ist zwischen allen Fertigungs- oder Pufferressourcen ein Materialfluss denkbar. Wird keine Transportressource zwischen diesen eingezeichnet, wird davon ausgegangen, dass die Ressourcen direkt miteinander verbunden sind und der Materialfluss zwischen ihnen innerhalb der Maschinen geregelt wird.

Ein Beispiel für eine Allokationssicht ist in Bild 4-10 abgebildet. Zu erkennen ist, dass befüllte Flaschen direkt in die Verschließmaschine gebracht werden. Diese benötigt also im Sinne des Prozesses zusätzlich Verschlüsse, um die Flaschen zu verschließen. Der anschließende Puffer staut die Flaschen auf, um sie in Gebinden verpacken zu können.

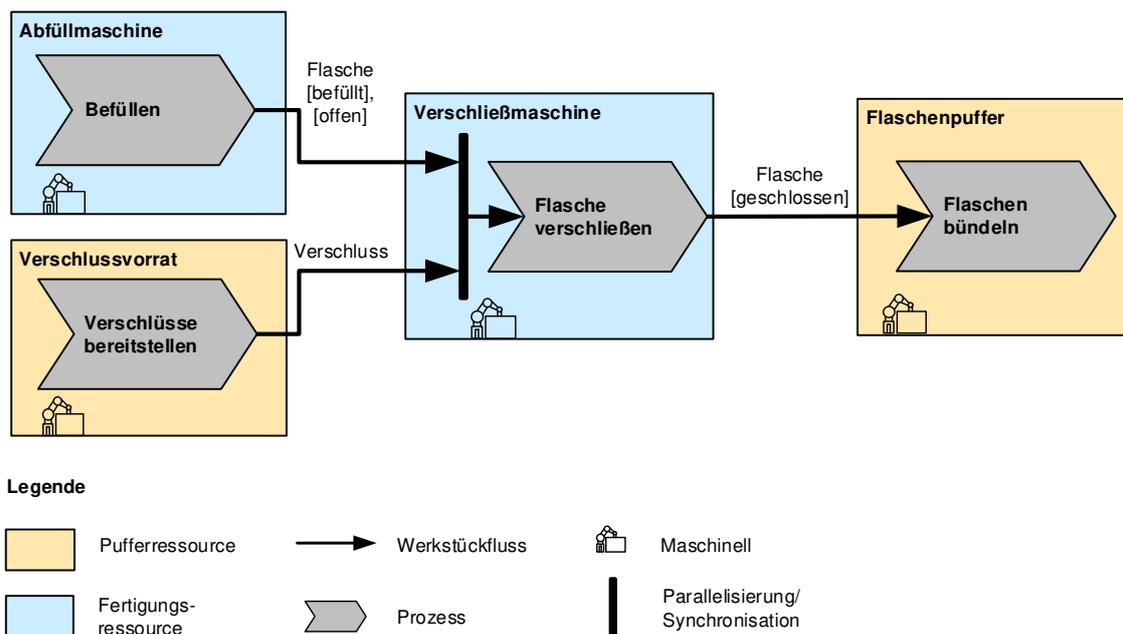


Bild 4-10: Allokationssicht für das Beispielsystem Abfüllanlage (Ausschnitt)

Bei der Zuordnung der Produktionsressourcen gilt, dass sämtliche ausführbaren Schritte der Prozessbeschreibung entsprechenden Ressourcen zugeordnet werden müssen. Dies gilt also nicht nur für Prozesse, sondern auch für Entscheidungs- oder

<sup>21</sup> Als Produktionsressource wird in diesem Zusammenhang eine Maschine, ein System, ein Vorrichtung o.ä. verstanden, die einen Prozess ausführt.

Synchronisationsknoten. Die Beschreibung der Ressourcen kann durch die Markierung als maschinelle oder menschliche Ressource weiter präzisiert werden.

Die in der Allokationssicht genutzten Modellelemente sind zum einen die des Prozessdiagramms (siehe Tabelle 4-3). Hinzu kommen Modellelemente, die zur Beschreibung der Allokation nötig sind. Sie sind in der folgenden Tabelle 4-4 verzeichnet. Das Prinzip der Allokation ist aus der UML/SysML Modellierung für Aktivitätsdiagramme übernommen. Hinzu kommen dabei aber die verschiedenen bereits definierten Stereotypen bzw. Ressourcenarten sowie mögliche Zusatzattribute.

*Tabelle 4-4: Zusätzliche Modellelemente der Allokationssicht (Ergänzend zum Prozessdiagramm)*

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Allokation Fertigungsressource		Verweist auf Ressourcen bzw. Systeme, die Zustandsänderungen an Produktionsobjekte herbeiführen.
Allokation Pufferressource		Verweist auf Ressourcen bzw. Systeme, die Produktionsobjekte speichern und sie auch in Bündeln aufnehmen oder abgeben können.
Allokation Transportressource		Verweist auf Ressourcen bzw. Systeme, die den Materialfluss zwischen anderen Ressourcen herstellen.
Maschinelle Lösung		Zusatzattribut einer Allokation, das kennzeichnet, dass die Ressource ausschließlich maschinell betrieben wird.
Personelle Lösung		Zusatzattribut einer Allokation, das kennzeichnet, dass die Ressource menschliche Arbeit erfordert.

Methodisch bildet die Allokationssicht einen zentralen Schritt in der Lösungsfindung für Produktionsanlagen ab. In der Sicht werden den Prozessen die entsprechenden Ressourcen zugeordnet. Die Sicht ist damit Ausgangspunkt für die Struktur der Anlage selbst.

### **Modellierung der Struktur der Anlage**

Während die Allokationssicht eine funktionale bzw. prozesstechnische Sicht auf die Anlage darstellt, wird nun die Struktur der Anlage modelliert. Gegenstand der Modellierung sind die in der Anlage befindlichen Systeme oder Maschinen sowie ihre Beziehungen

zueinander. Beschrieben werden nicht die prozessualen Vorgänge, sondern die statischen Abhängigkeiten und Beziehungen innerhalb der Anlage. Das Umfeld der Anlage kann einbezogen werden. Bild 4-11 zeigt ein Beispiel für die Struktur einer Anlage.

Inhaltlich greift das Modell zunächst die in der Allokationssicht bereits definierten Systeme auf. Die Aufgabe der Anlage insgesamt ist es, den Betrieb dieser Systeme zu ermöglichen. Die Anlagenstruktur besteht also aus den Produktionssystemen sowie ergänzenden Systemen, die deren Versorgung mit Betriebsstoffen oder Energie ermöglichen. Im Beispiel ist dies anhand der Abfüllstation ersichtlich. Die Verarbeitungskette der zu füllenden Flasche ist aus der Allokationssicht bereits bekannt. Die Abfüllstation erfordert darüber hinaus elektrische Energie für den Betrieb. Zudem ist eine Versorgung mit Inertgas erforderlich, um Sauerstoff in der Flasche zu verhindern. Die Modellierung ergibt im Ergebnis, ausgehend von der prozessgetriebenen Betrachtung, die Struktur der Anlage insgesamt.

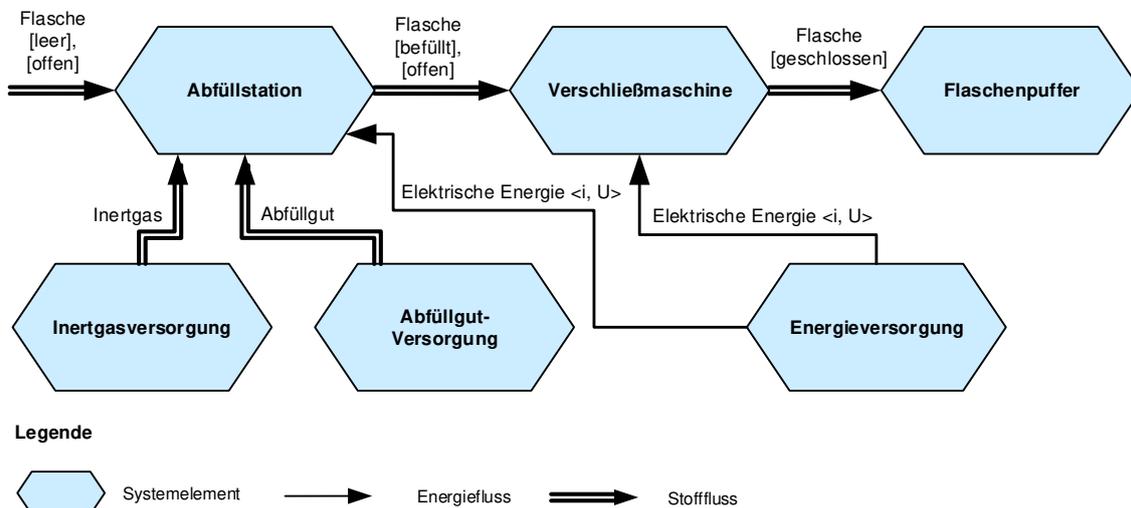
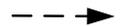


Bild 4-11: Anlagenstruktur für das Beispielsystem Abfüllanlage (Ausschnitt)

Das Modellierungsprinzip entspricht dem einer Wirkstruktur (vgl. Kapitel 3.1.1.4). Die Bestandteile der Produktionsanlage werden als Systemelemente aufgefasst. Zwischen ihnen können Informations-, Energie-, oder Stoffflüsse bestehen. Die in der Allokationssicht noch als Objektfluss modellierte Verbindung zwischen den Ressourcen ist in dieser Sicht ebenfalls als Stofffluss zu betrachten. In Tabelle 4-5 sind die Modellelemente für die Modellierung der Struktur der Anlage aufgelistet. Sie stimmen mit der Modellierung der Spezifikationstechnik CONSENS überein.

Tabelle 4-5: Modellelemente für die Anlagenstruktur

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Systemelement		Technisches Subsystem oder Teil der Produktionsanlage. Ein Systemelement kann seinerseits weitere Systemelemente enthalten.
Umfeldelement		Mit der Anlage in Beziehung stehendes technisches System in der Umgebung der Anlage.
Energiefluss		Repräsentiert einen Transfer von Energie bzw. Leistung zwischen Systemelementen.
Stofffluss		Beschreibt den Transport von Stoffen. Hierunter fallen sowohl Produktionsobjekte als auch andere Materialien oder Betriebsstoffe.
Informationsfluss		Beschreibt die Übertragung von Informationen zwischen Systemelementen.

#### 4.2.2.3 Teilsystemebene

Auf der dritten und detailliertesten Ebene werden die einzelnen Teilsysteme der Anlage betrachtet. Als Teilsystem können prinzipiell alle Bestandteile der Anlagen angesehen werden. Entscheidend sind die im Modellierungskontext zu wählenden Systemgrenzen (vgl. Begriffsdiskussion in Kap. 2.1). Typischerweise werden Modellierer und Anlagenplaner die Systemgrenzen der Teilsysteme so wählen, dass Verhalten gekapselt wird und möglichst eindeutige und überschaubare Schnittstellen vorhanden sind. Bereits auf Anlagenebene sind die Teilsysteme in Form von Systemelementen definiert worden – die Wahl dieser Systemgrenzen ergibt sich also auch aus den definierten Produktionsprozessen und ist mit der Modellierung auf den unterschiedlichen Modellebenen in Einklang zu bringen.

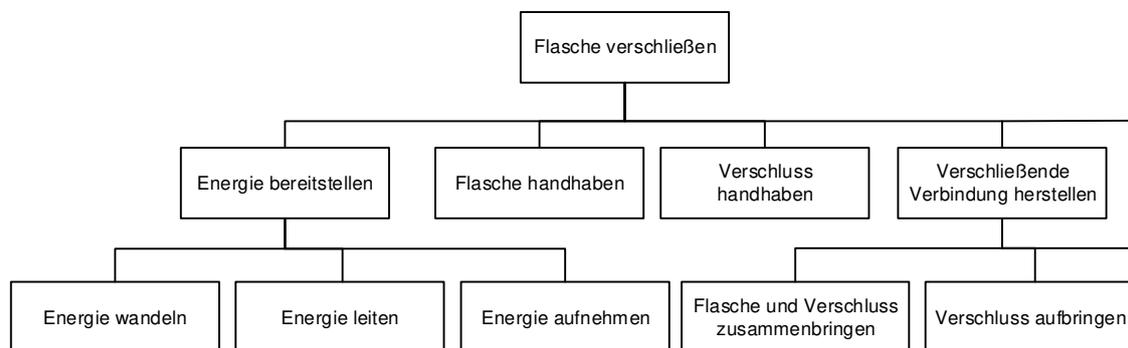
Ziel der Modellierung auf Teilsystemebene ist die Grobspezifikation der Teilsysteme. Sie liefert Informationen über Schnittstellen, Wirkungsweisen, Funktionen und Abhängigkeiten der Anlage. Das Modell besteht wie auch die übergeordnete Ebene aus einer funktionalen und einer statischen/technischen Sicht. Die funktionale Sicht wird mit einer Funktionshierarchie realisiert. Die Modellierung orientiert sich damit an der Modellierung konventioneller mechatronischer Systeme und der Spezifikationstechnik CONSENS (Abschn. 3.1.1.4). Für die technische Sicht wird eine Wirkstruktur modelliert. Die darin verwendeten Systemelemente realisieren die definierten Funktionen. Erkenntnisse oder Modellinhalte aus der Wirkstruktur werden zurück in die Anlagenstruktur gespiegelt. So ergibt sich insgesamt ein iteratives Modellierungsvorgehen in den verschiedenen

Modellebenen. Die beiden Modelle Funktionshierarchie und Wirkstruktur werden im Folgenden erläutert.

### Funktionshierarchie

Das Funktionsmodell zielt auf eine lösungsneutrale Beschreibung des Systems. Die Gesamtfunktion wird in Haupt- und Teilfunktionen herunter gebrochen, bis jeder Funktion ein konkretes Lösungselement zugeordnet werden kann. Dies ergibt eine hierarchische Gliederung der Funktionen, wie sie beispielhaft in Bild 4-12 abgebildet ist. Die Formulierung von Funktionen erfolgt soweit wie möglich als Substantiv-Verb-Kombination. Ferner gilt es, Funktionen möglichst lösungsneutral zu formulieren und technische Aspekte zunächst außer Acht zu lassen.

Im Beispiel wurde die Verschleißmaschine weiter detailliert. Die Hauptfunktion ergibt sich dabei direkt aus dem auf Anlagenebene definierten Prozess „Flasche verschließen“. Die Gesamtfunktion wird in Hauptfunktionen gegliedert, die sich typischerweise aus den Anforderungen ergeben, die die Modellierung auf Anlagenebene ergeben hat. Hier ist z.B. zu klären, welche Energieformen zur Verfügung stehen oder ob bereits bestimmte Waren-Transportmittel festgelegt wurden. Dies äußert sich in entsprechenden Schnittstellen der Subsysteme zur Anlage und erfordert entsprechende Funktionalitäten.



#### Legende

□ Funktion    └─┬─ Funktionale Dekomposition

*Bild 4-12: Beispielhafte Funktionshierarchie einer Verschleißmaschine (Ausschnitt)*

Bei der Dekomposition einer Funktion ist zu beachten, dass sie nur Sinn macht, wenn mindestens zwei Unterfunktionen zu einer Funktion gefunden werden können. Die weitere Dekomposition in Teilfunktionen erfolgt solange, bis zu jeder Teilfunktion ein Lösungselement gefunden werden kann. Dabei gilt, dass die jeweils untergeordneten Funktionen genau die übergeordnete Funktion erfüllen. Ist jede Teilfunktion erfüllt, ist auch die Gesamtfunktion der Hierarchie realisiert. Die benötigten Modellelemente sind in Tabelle 4-6 verzeichnet. Sie stimmen mit der Modellierung in der Spezifikationstechnik CONSENS überein.

Tabelle 4-6: Modellelemente für die Modellierung einer Funktionshierarchie

Modellelement	Graphische Repräsentation	Erläuterung
Funktion		Lösungsneutrale Beschreibung einer Funktion oder Teilfunktion eines technischen Systems.
Dekompositions- be- ziehung		Beschreibt die Unterteilung einer Funktion in eine Teilfunktion.

### Wirkstruktur

Die Wirkstruktur bildet die Struktur des Systems ab. Sie enthält die Bestandteile – oder Systemelemente – des Systems und setzt diese miteinander und mit der Umgebung in Beziehung. Dazu werden Energie-, Stoff- und Informationsflüsse genutzt.

Bei der Entwicklung der Wirkstruktur sind verschiedene Randbedingungen zu betrachten. Zunächst einmal befindet sich das zu modellierende System bereits in einem technischen Umfeld – der Produktionsanlage. Diverse Schnittstellen und Abhängigkeiten sind bekannt und äußern sich entsprechend an der Systemgrenze des betrachteten Systems. Mit der Wirkstruktur müssen die eingehenden Flüsse aufgenommen und verarbeitet und die geforderten Ausgänge realisiert werden. Daneben ist es das Ziel, die in der Funktionshierarchie definierten Funktionen zu ermöglichen. Dafür geeignete Systemelemente werden identifiziert (z.B. mittels morphologischem Kasten), ausgewählt (z.B. auf Basis einer Nutzwertanalyse) und in die Wirkstruktur integriert [PBF+07]. Ein Beispiel für eine Wirkstruktur ist anhand der Verschleißmaschine innerhalb einer Abfüllanlage in Bild 4-13 abgebildet.

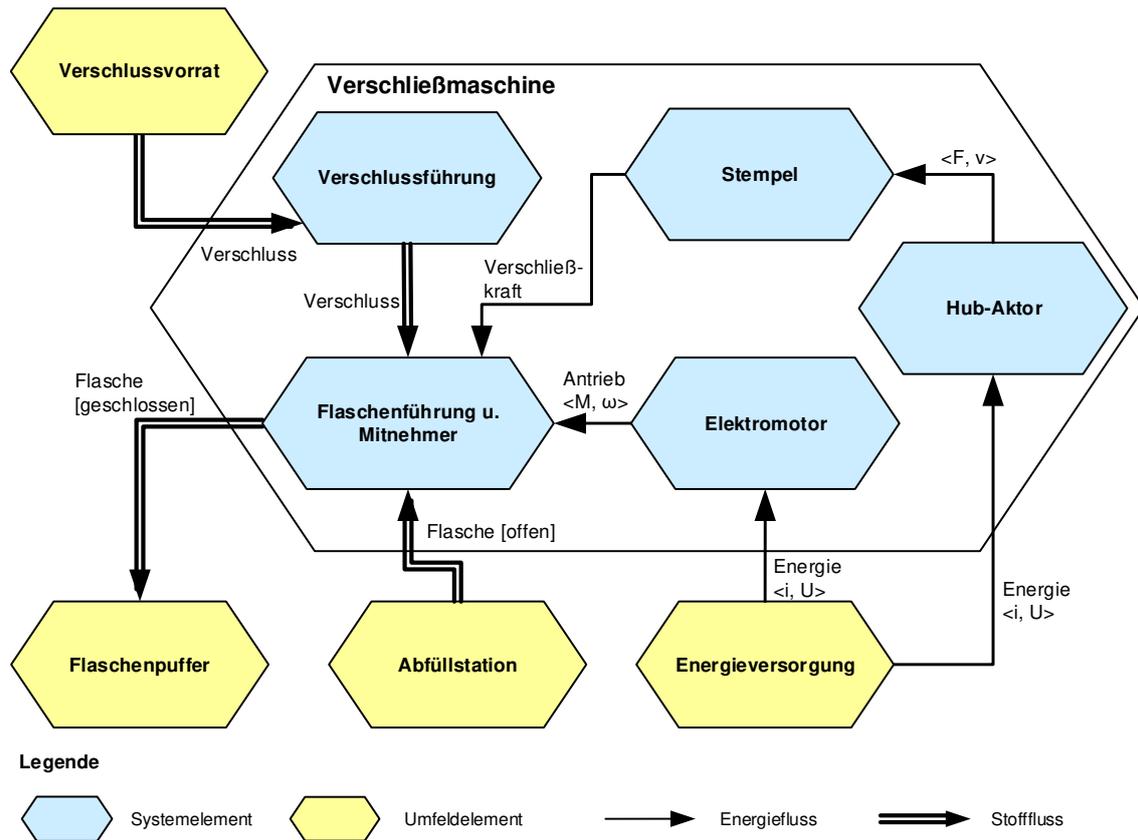


Bild 4-13: Beispiel einer Wirkstruktur für eine Verschleißmaschine (Ausschnitt)

Die Wirkstruktur auf Anlagenebene ist nun das Umfeld der Verschleißmaschine. Damit sind wesentliche Ein- und Ausgänge dieses Systems bereits definiert. Weitere Elemente ergeben sich aus den geforderten Funktionen. Das Detaillevel der Modellierung ist davon abhängig, wie hoch die beteiligten Anlagenplaner und -betreiber den Spezifikationsbedarf einschätzen. Sollen Teile des Systems selbst programmiert oder in Betrieb genommen werden, ist ein höherer Detailgrad erforderlich als wenn Maschinen in Gänze extern eingekauft werden.

Die verwendeten Modellelemente sind identisch mit den bereits auf Anlagenebene verwendeten Elementen zur Modellierung der Wirkstruktur. Sie können also Tabelle 4-5 entnommen werden. Eine Sondersituation kann eintreten, wenn Beziehungen zu dem im System bearbeiteten Produktionsobjekt visualisiert werden sollen. Dieses ist dann gleichermaßen ein Materialfluss, der von außen in das System geführt wird, sowie ein Umfeldelement, auf welches Systemelemente einwirken. Beide Ansätze der Modellierung sind möglich. Die Ausgestaltung ist abhängig von der Charakteristik des modellierten Systems und den Ansprüchen an das zu erzielende Systemmodell.

### 4.3 Vorgehensmodell zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen

Das in diesem Abschnitt vorgestellte *Vorgehensmodell* dient der *Modellierung flexibler Produktionsanlagen*. Primäres Ziel ist ein durchgängiges Systemmodell im Sinne des MBSE. Es enthält Informationen, die für die weiteren Planungsschritte relevant sind und dient der Kommunikation und Kooperation zwischen Anlagenplaner, -betreiber und -entwickler. Das Vorgehensmodell unterstützt die systematische Informationserhebung und die logisch aufeinander aufbauende Modellierung. Dabei bezieht es sich auf das zuvor vorgestellte MBSE-Modellierungskonzept, das die Voraussetzung zur Beschreibung bzw. Modellierung der im Vorgehensmodell beschriebenen Ergebnisse ist.

Die erste Phase dient der Beschreibung der Produktionsobjekte. Dieser werden strukturiert und mittels Zustandsmodellen beschrieben. In der zweiten Phase erfolgt die Erarbeitung der Produktionsprozesse sowie die anschließende Zuordnung der Produktionsressourcen. Die dritte Phase adressiert die Anlagenarchitektur, die sich aus den identifizierten Produktionsressourcen ableitet. Die letzte Phase dient der Detaillierung der Modelle auf Ebene der Teilsysteme. Damit sind insgesamt die im Sinne des MBSE zu erarbeitenden Teilmodelle modelliert und das durchgängige Systemmodell erreicht. Anwendung findet das durchgängige Systemmodell als:

- Ausgangsbasis für die Detailplanung und weitere Entwurfsarbeit für Produktionsanlagen. Es enthält relevante Informationen für die verschiedenen aufbauenden Tätigkeiten.
- Grundlage für eine Änderungsplanung im Produktportfolio. Das Modell bietet eine Basis zur Planung neuer zu produzierender Produkte in einer bestehenden Anlage.
- Grundlage zur Erweiterung der Anlage. Das Modell beinhaltet Informationen über die bestehende Anlage und ihre Produktionsressourcen. Diese können bei Erweiterung der Anlage herangezogen werden.

Das in Bild 4-14 visualisierte Vorgehensmodell benennt die auszuführenden Phasen, wesentlichen Aufgaben und zu erarbeitenden Resultate des Vorgehens.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die Phasen zwar aufeinander aufbauen und sinnvollerweise in ebendieser Reihenfolge zu erarbeiten sind. Gleichwohl bestehen aber viele Abhängigkeiten zwischen den erstellten Modellen. Kein Modell kann nach seiner initialen Erstellung bereits als finales Ergebnis angesehen werden. Iterationen zwischen den einzelnen Schritten und über die verschiedenen Modellebenen hinweg sind sinnvoll, wenn neue Informationen erarbeitet werden. Das Vorgehen ist zwar stringent aufgebaut, Iterationen aber werden ausdrücklich nicht ausgeschlossen. Nachfolgend wird das Vorgehensmodell erläutert.

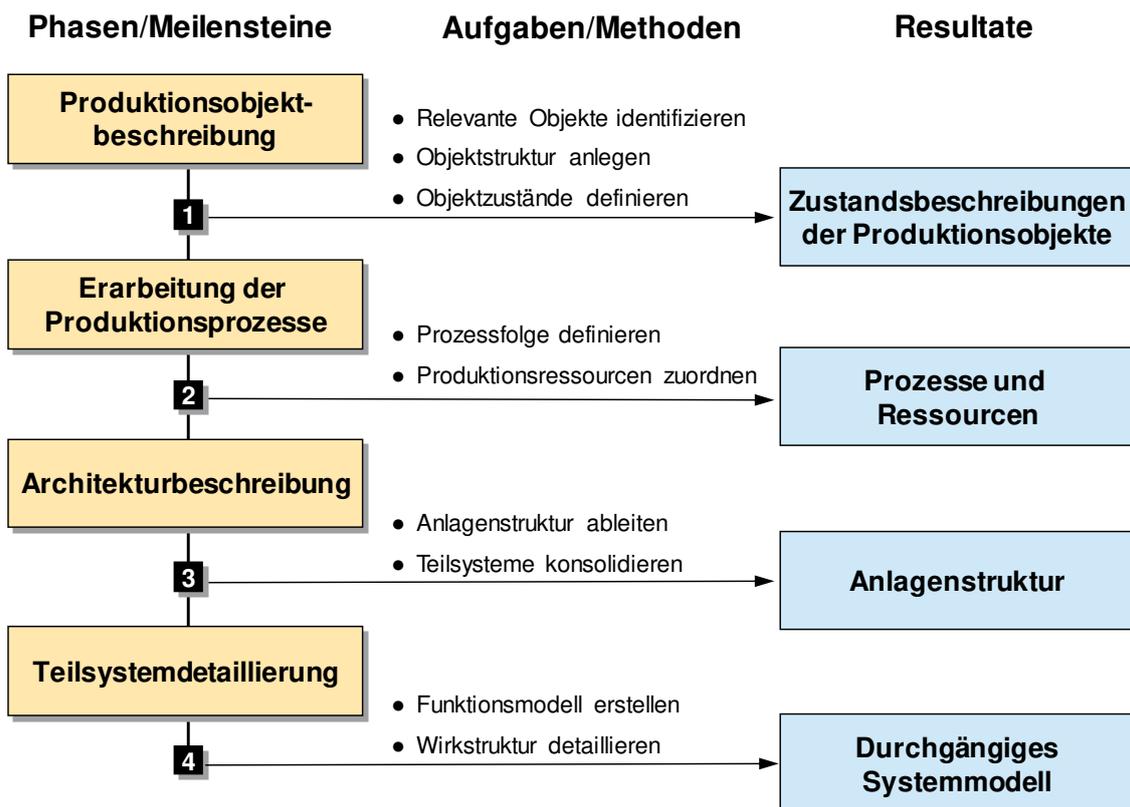


Bild 4-14: Vorgehensmodell zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen

### 4.3.1 Phase 1: Produktionsobjektbeschreibung

Der erste Schritt des Vorgehens dient gewissermaßen dem Planen und Klären der Aufgabenstellung für die Produktionsanlage. Die Modellierung erfolgt auf Prozessebene (siehe Kap. 4.2.2.1). Zunächst wird geklärt, welche **relevanten Produktionsobjekte** die Anlage überhaupt verarbeiten soll. Dazu wird zum einen eine Produktionsobjektstruktur angelegt. Die Produktionsobjektstruktur ist eine Baumstruktur, die die Montagefolge bzw. Bauzusammenhänge wiedergibt. Das Produkt, als Ergebnis des Produktionsprozesses sowie all seine Vorstufen, Teile etc. werden als Produktionsobjekte angesehen, die über verschiedene Stufen hinweg zum Endprodukt zusammengefügt werden.

Als nächstes wird die **Objektstruktur angelegt**. Die Objektstruktur lässt sich typischerweise aus bereits bestehenden Dokumenten wie der Produktionsspezifikation ableiten (siehe z.B. [Bra14]). Da häufig verschiedene Produkte in einer Anlage produziert werden, werden verschiedene Produktionsobjektstrukturen angelegt.

Mit der Baumstruktur lässt sich allerdings lediglich die Montagefolge ableiten. Was darin fehlt, sind bspw. verfahrenstechnische Prozessschritte, die Veränderungen an einem Zwischenprodukt (oder „Objekt“) herbeiführen. Dieser Aspekt wird durch die **Definition von Objektzuständen** abgedeckt. Jedes Produktionsobjekt kann mit einem Zustandsdiagramm beschrieben werden. Es zeigt an, welchen Ausgangszustand ein bestimmtes Objekt hat und in welche Zustände es unter definierten Bedingungen überführt werden kann.

Durch Benennung eines Zielzustands wird definiert, wie mit einem Produktionsobjekt verfahren werden soll, bevor es verbaut wird.

Ziel der Produktionsanlage ist es, die Produktionsobjekte vom Ausgangs- in den Endzustand zu überführen sowie die einzelnen Objekte zu dem gewünschten Endprodukt zusammen zu fügen. Durch die lösungsneutrale Beschreibung des Produkts ist die Ausgangsbasis geschaffen, die benötigten Prozesse zu identifizieren und schließlich die entsprechenden Produktionsressourcen auszuwählen. Zusammenfassend werden in der Phase die folgenden **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Produktionsobjektstruktur (vgl. Kap. 4.2.2.1)
- Zustandsmodellierung der Produktionsobjekte (vgl. Kap. 4.2.2.1)

Als **Resultat** der Phase *Produktionsobjektbeschreibung* liegt eine Zustandsbeschreibung der Produktionsobjekte vor. Sie besteht aus der Objektstruktur sowie entsprechender Zustandsmodelle. Auf dieser Basis können in der folgenden Phase die notwendigen Prozesse abgeleitet werden.

### 4.3.2 Phase 2: Erarbeitung der Produktionsprozesse

Aufbauend auf der Definition der Produktionsobjekte werden nun die benötigten Produktionsprozesse und Produktionsressourcen abgeleitet. Die Modellierung erfolgt auf Prozess- und Anlagenebene (siehe Abschnitt 4.2.2.1 und 4.2.2.2).

Zunächst wird eine **Prozessfolge definiert**, die unabhängig von den Produktionsressourcen die auszuführenden Prozesse beschreibt. Montageprozesse ergeben sich aus dem hierarchischen Aufbau der Produktionsobjekte. Andere fertigungstechnische Prozesse werden aus der Betrachtung der jeweiligen Zustände abgeleitet. Bei der Modellierung werden Fallunterscheidungen berücksichtigt, indem etwa Entscheidungs- oder Synchronisationsknoten modelliert werden. So werden unterschiedliche Arten von Produkten berücksichtigt.

Im nächsten Schritt werden Lösungen für die definierten Prozesse modelliert, indem die **Produktionsressourcen zugeordnet** werden. Dabei gilt, dass jeder Knoten des Prozessdiagramms und jeder modellierte Prozess durch eine entsprechende Ressource der Anlage realisiert werden muss. Modelliert wird damit die Allokationssicht. Im Zuge dieser Zuordnung werden Prozesse zusammengefasst oder auch weiter differenziert, abhängig von den Möglichkeiten der Produktionsressourcen. So sind Prozesse möglicherweise zu umfangreich um sie mit genau einer Ressource zu lösen. Eine Aufteilung in einzelne Prozessschritte ist dann nötig. Aufgabe des Anlagenbetreibers und -planers ist es außerdem, vor dem Hintergrund der Planungsaufgabe ggf. auf bestehende Produktionsressourcen zurückzugreifen und andere Randbedingungen der einsetzbaren Ressourcen zu berücksichtigen. Zusammenfassend werden in der Phase die folgenden **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Prozessmodell (vgl. Kap. 4.2.2.1)

- Allokationssicht (vgl. Kap.4.2.2.2)

Als **Resultat** der Phase *Erarbeitung der Produktionsprozesse* liegen die Prozesse und Ressourcen vor, die benötigt werden um das betrachtete Produktionsobjekt zu produzieren. Diese Informationen bilden die Basis, um die Anlagenarchitektur zu beschreiben.

### 4.3.3 Phase 3: Architekturbeschreibung

Nachdem die Produktionsressourcen als wesentliche Bestandteile der Anlage identifiziert wurden, wird in dieser Phase die Anlagestruktur insgesamt aufgebaut. Die Modellierung erfolgt demzufolge auf Anlagenebene (Abschnitt 4.2.2.2).

In der **Anlagenstruktur** werden die Produktionsressourcen als Systemelemente angesehen, die miteinander in Beziehung stehen. Die Verknüpfung zwischen den Produktionsprozessen ergibt einen entsprechenden Materialfluss in der Anlagenstruktur. Die weiteren Bestandteile der Anlage ergeben sich aus der Notwendigkeit, die Produktionsressourcen mit Energie, Material usw. zu versorgen. Dementsprechend wird die Anlagenstruktur aufgebaut. Sie dient dazu, Abhängigkeiten und Zusammenhänge innerhalb der Anlage zu beschreiben.

Jedes Systemelement der Anlage kann selbst als System betrachtet werden, das aus Systemelementen besteht. Systemelemente können also zu Teilsystemen zusammengefasst oder separiert werden. Der nächste Schritt besteht daher darin, die **Teilsysteme zu konsolidieren** und geeignet voneinander abzugrenzen. Das Ziel ist, eindeutige Schnittstellen zu finden und Teilsysteme zusammenzuführen, wenn diese identisch sind. Ein typischer Fall ist in diesem Zusammenhang beispielsweise das Transportsystem. Prozessual werden in der Regel verschiedene Transportprozesse identifiziert. Diese könnten nun alle durch unterschiedliche Transportsysteme realisiert werden. Denkbar ist aber auch, dass das selbe Transportsystem verschiedene Prozesse übernimmt. So könnte beispielweise das Transportsystem, das eine leere Grundstruktur oder ein Gehäuse trägt, auch das später erzeugte Zwischenprodukt mit den in der Grundstruktur montierten Elementen tragen. Es ist dann notwendig, aus den zwei durch die Allokation entstandenen Transportsystemen eines zu machen. Die entsprechenden Systemelemente werden also in ein Subsystem integriert. Die Änderung muss dann in die Allokationssicht übertragen werden, da nun eine Allokation für mehrere Prozesse gilt (bzw. mehrere Allokationen auf dasselbe Systemelement verweisen).

Auch der umgekehrte Fall ist denkbar. Wenn erkannt wird, dass ein Prozess besser geteilt und durch unterschiedliche Systemelemente realisiert wird. Zusammengefasst wird in diesem Schritt also eine Konsolidierung der Anlagenstruktur vorgenommen. Änderungen gilt es, entsprechend in die darüber liegenden Modellebenen zu übertragen.

Es werden in der Phase folgendes **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Anlagenstruktur (vgl. Kap.4.2.2.2)

Als **Resultat** der Phase *Architekturbeschreibung* liegt die Anlagenstruktur vor. Sie beschreibt, welche Systemelemente sich in der Anlage befinden und wie diese miteinander in Beziehung stehen. Dabei werden sowohl der Materialfluss, also auch andere Arten von Flüssen (Energie, Information etc.) berücksichtigt. Damit ist die Grundlage für die weitere Detaillierung der Teilsysteme gelegt.

#### 4.3.4 Phase 4: Teilsystemdetaillierung

In der letzten Phase des Vorgehens gilt es, die einzelnen Teilsysteme zu detaillieren. Ziel ist dabei aber weiterhin eine disziplinübergreifende Modellierung im Sinne des MBSE. Die detailliertere Modellierung dient der Erarbeitung einer modellbasierten Grobspezifikation. Auf dieser Basis können Einflüsse, die auf Anlagenebene relevant sind, identifiziert werden und die Beschaffung, Ausarbeitung, Anpassung oder Auslegung einzelner Produktionsmaschinen initiiert werden. Die Modellierung erfolgt auf Teilsystemebene (Abschnitt 4.2.2.3).

Im Sinne des MBSE kann ein einzelnes Teilsystem der Anlage wiederum als System betrachtet werden, auf das die etablierten Methoden des MBSE angewendet werden können. CONSENS oder andere Ansätze des MBSE (siehe Kap. 3.2) sind hierfür geeignet. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modellierungskonzept schließt daher mit den beiden zentralen Sichten ab, die eben diesen Übergang in andere Modellierungsansätze darstellen. Es sind die strukturelle und die funktionale Sicht auf ein Teilsystem.

Zunächst wird das Teilsystem funktional betrachtet. Hierfür eignet sich ein **Funktionsmodell** in Form einer Funktionshierarchie. Den meisten Teilsystemen ist bereits ein Prozess in der Allokationssicht zugeordnet worden. Dieser ist die Gesamtfunktion des Systems. Die Gesamtfunktion wird in Hauptfunktionen und weiter in Teilfunktionen untergliedert. Dabei gilt, dass die untergeordneten Funktionen die übergeordnete Funktion genau erfüllen. Die Hauptfunktionen ergeben sich aus den bereits identifizierten Schnittstellen des Systems sowie anderen Anforderungen, die im Zuge des Modellaufbaus gefunden wurden oder seitens der Anlage, des Anlagenbetreibers u.ä. bestehen. Die Dekomposition der Funktionen wird soweit durchgeführt, dass zu jeder Teilfunktion entsprechende Lösungs- oder Systemelemente gefunden werden können, die diese realisieren. Sind alle Teilfunktionen realisiert, kann auch die Gesamtfunktion als erfüllt angesehen werden. Die Lösungsfindung kann bspw. durch die Anwendung eines morphologischen Kastens (siehe bspw. [PBF+07], [Zwi71]) unterstützt werden.

Basierend auf der Funktionshierarchie und den identifizierten Lösungselementen kann die **Wirkstruktur detailliert** bzw. aufgebaut werden. Sie bettet sich in die Anlagenstruktur ein. Demnach ist die Systemgrenze bereits durch entsprechende Schnittstellen definiert. Sie kann jedoch im Rahmen der Modellierung verfeinert werden. In der Wirkstruktur werden die im System befindlichen Systemelemente modelliert und miteinander in Beziehung gesetzt. Dafür werden Stoff-, Energie- und Informationsflüsse verwendet.

Zusammenfassend werden in der Phase die folgenden **Hilfsmittel** eingesetzt:

- CONSENS Funktionshierarchie (vgl. Kap. 3.1.1.4 und 4.2.2.3)
- CONSENS Wirkstruktur (vgl. Kap. 3.1.1.4 und 4.2.2.3)

Als **Resultat** der Phase *Teilsystemdetaillierung* liegt ein durchgängiges Systemmodell vor, das sich von der Beschreibung der zu produzierenden Produkte über die Produktionsressourcen hin zu der Beschreibung der Teilsysteme erstreckt. Die Durchgängigkeit wird mittels der beschriebenen Querbeziehungen sichergestellt.

## 4.4 Werkzeugunterstützung

Voraussetzung der Anwendbarkeit des Modellierungskonzepts ist die Möglichkeit der Modellierung. Eine reine Zeichnung der Modelle, bspw. in Microsoft Visio, ist dabei nicht zielführend, da damit keine formale Repräsentation der Daten erzielt wird und die rechnerinterne Weiterverarbeitung und die Pflege des Modells kaum möglich ist. Auf Grund der Verbreitung der SysML als Modellierungssprache und der verschiedenen verfügbaren Werkzeuge wird daher im Rahmen dieser Arbeit die Werkzeugunterstützung auf Basis der SysML umgesetzt. Dazu erfolgt zum einen eine Profildefinition als Ableitung aus der SysML in Abschnitt 4.4.1. Der darauf folgende Abschnitt 4.4.2 erläutert die Anwendung des Profils im Werkzeuge Eclipse – Papyrus.

### 4.4.1 SysML Profil: SysML4ProductionPlants

Das in diesem Abschnitt vorgestellte SysML Profil setzt das MBSE-Modellierungskonzept um und stellt eine Erweiterung der SysML dar. Es ist im Sinne eines Metamodells<sup>22</sup> zu verstehen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung zur Umsetzung der SysML-basierten Werkzeugunterstützung. Es wird benötigt, da die SysML die im Modellierungskonzept vorgesehenen Modellelemente nicht direkt in vollem Umfang bereitstellt. Gleichwohl lässt sich konstatieren, dass die SysML einen signifikanten Teil der nötigen Modellelemente bereits berücksichtigt. Sie bietet darüber hinaus entsprechende Diagrammkonzepte für die Modellierung der Aspekte. Für das vorliegende Konzept ist die SysML auch aus einem anderen Grund als Basis gut geeignet. Die SysML wird durch eine breite Community vorangetrieben und weiterentwickelt. Darüber hinaus basieren zahlreiche MBSE-Werkzeuge auf der SysML (siehe Abschnitt 2.5.4). Ein SysML-Profil lässt sich daher relativ leicht auf verschiedene MBSE-Werkzeuge übertragen. Im Sinne der Übertragbarkeit und Weiterverwendung des hier entwickelten Ansatzes ist SysML daher eine geeignete Grundlage. Bild 4-15 zeigt die Einordnung des Profils auf. Es ist parallel zum

---

<sup>22</sup> Mit einem Metamodell wird eine (Modellierungs-)Sprache modellhaft beschrieben. Das Metamodell folgt seinerseits bestimmten Modellierungsvorschriften. Hierfür existiert bspw. im Rahmen der UML/SysML-Spezifikation die Meta-Object Facility (MOF) [GBS+17-ol], [OMG16].

Profil SysML4CONSENS anzusiedeln, das Systeme mit anderem Entwicklungsschwerpunkt adressiert und damit eine Ergänzung darstellt.

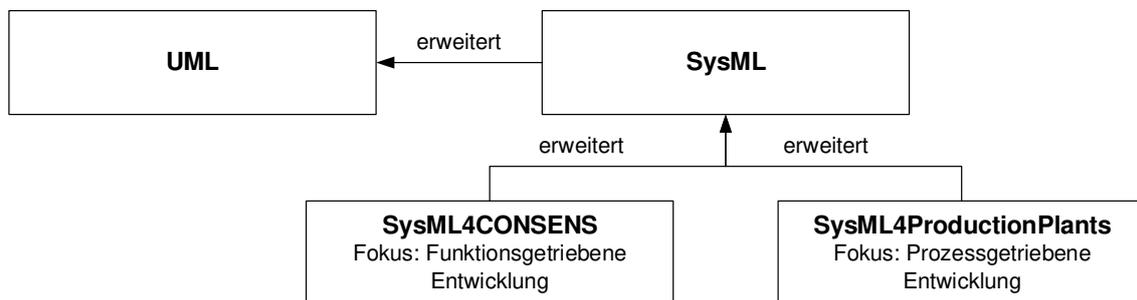


Bild 4-15: Einordnung des Profils

Bild 4-16 zeigt das SysML-Profil, das *SysML4ProductionPlants* genannt wird. Die Profilbeschreibung greift Elemente des SysML Metamodells auf (mit gestrichelten Linien dargestellt) und fügt weitere Stereotypen hinzu. Dabei muss beachtet werden, dass die SysML selbst als Erweiterung der UML definiert ist. Während stellenweise Modellelemente der UML direkt auch in der SysML verwendet werden können, sind andere Modellelemente als Stereotypen der UML für die SysML angelegt worden. Der Profilierungsmechanismus sieht vor, dass wenn von einer Metaklasse direkt abgeleitet werden soll, dies mittels einer Erweiterungsbeziehung erfolgt. Die Ableitung aus einem Stereotypen erfolgt hingegen mit der Generalisierungsbeziehung.

Für die Beschreibung von Produktionsobjekt und -zustand wurden Erweiterungen der Elemente Block und State vorgenommen. Die damit verbundenen Möglichkeiten der Modellierung aus der SysML (bdd bzw. stm) sind für den Modellierungsansatz ideal geeignet. Die außerdem auf Prozessebene benötigte Prozessbeschreibung wird mittels Aktivitäten realisiert. Dementsprechend wurde auch die Aktivität um einen entsprechenden Stereotypen „ProductionProcess“ erweitert.

Auf Anlagenebene spielt insb. die Allokationssicht eine Rolle. Die Allokation und die damit verknüpften Blöcke wurden daher mit den drei Klassen Puffer-, Transport- und Fertigungsressource erweitert. Darüber hinaus wird auf Anlagenebene die Modellierung einer Anlagenstruktur nach den Regeln der Wirkstruktur gefordert. Dies kann unter Verwendung des Profils SysML4CONSENS erfolgen [IKD+13], [RSR+17]. SysML4CONSENS kann als Ergänzung zur Modellierung von Anlagen gesehen werden, da es die Modellierung einzelner mechatronischer Systeme (bspw. Produktionssysteme) erlaubt.

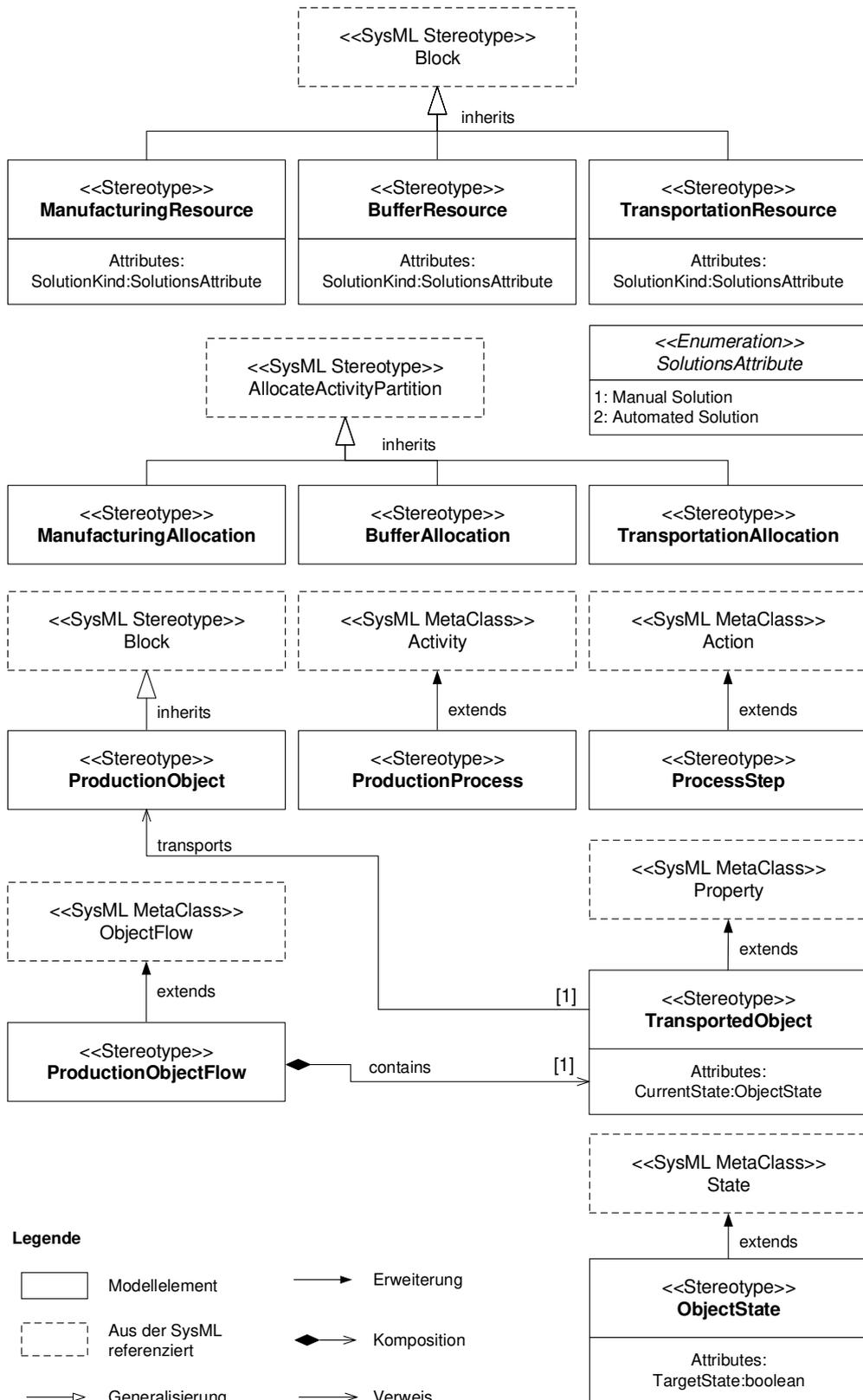


Bild 4-16: Metamodell des SysML-Profil SysML4ProductionPlants

Bei SysML4CONSENS handelt es sich um ein weiteres SysML-Profil, das erstellt wurde, um CONSENS-konform mit SysML-Werkzeuge arbeiten zu können. Es liegt u.a. in einer

Papyrus-Implementierung vor. Zu betonen ist, dass dieses Profil nicht als Alternative, sondern als Ergänzung zu dem hier beschriebenen SysML4Production zu sehen ist. Während SysML4Production Produktionsanlagen und die Beschreibung der entsprechenden Prozesse adressiert, zielt SysML4CONSENS auf konventionelle mechatronische Systeme. Beide Profile lassen sich in Eclipse-Papyrus parallel zur Anwendung bringen.

Auf Teilsystemebene kann vollständig auf die SysML4CONSENS zurückgegriffen werden. Eine zusätzliche Profildefinition im SysML4ProductionPlants erfolgt daher nicht. Das Profil SysML4CONSENS ist im Anhang verzeichnet (siehe Anhang A2).

#### 4.4.2 Vorstellung der Werkzeugunterstützung

Um die Modellierung gemäß dem spezifizierten Modellierungskonzept zu ermöglichen, bedarf es einer geeigneten Werkzeugunterstützung. Diese wurde gemäß des SysML-Profiles (Abschnitt 4.4.1) in Eclipse-Papyrus [Pap17-ol] implementiert. Das Werkzeug wird durch das PolarSys-Konsortium<sup>23</sup> finanziert und vorangetrieben. Bei Papyrus handelt es sich um ein Open-Source Werkzeug. Somit ist sichergestellt, dass die Implementierung Dritten leicht zugänglich gemacht und von diesen weiterverwendet werden kann. Bild 4-17 vermittelt einen Eindruck der Werkzeugunterstützung.

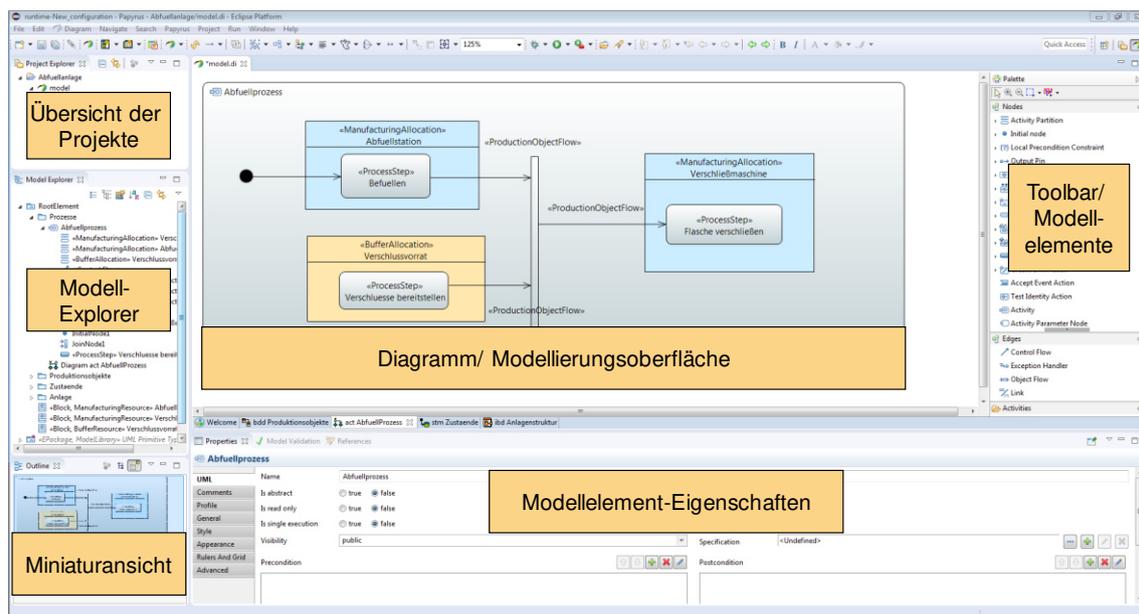


Bild 4-17: Modellierungswerkzeug Eclipse-Papyrus [Pap17-ol] mit dem SysML-Profil SysML4ProductionPlants

Anspruch an die Werkzeugunterstützung ist in erster Linie, das Modellierungskonzept anwendbar zu machen. Dies wird durch die Implementierung des zugrundeliegenden

<sup>23</sup> PolarSys ist ein Konsortium, das die Erstellung von Open-Source Werkzeugen insb. im Bereich des modellbasierten Software- und Systems Engineering vorantreibt. Mitglieder sind bspw. die Unternehmen Airbus, Ericsson oder Thales [Pol18-ol].

SysML-Profiles erreicht. Das Werkzeug unterstützt den Anwender darüber hinaus bei der Wartung, Erweiterung oder Sicherung des Modells und stellt die notwendige Usability her. Die Modelldaten werden im XML-Format<sup>24</sup> gespeichert. Somit ist die rechnerinterne Weiterverwendung der Daten möglich. Das Datenmodell ist gemäß des UML/SysML- sowie SysML4ProductionPlants-Metamodells gestaltet.

Gegenstand der Implementierung ist die Nutzung des Profilmehanismus<sup>25</sup>, der innerhalb von Papyrus vorgesehen ist. Die Erweiterung wurde in Form eines Ecore<sup>25</sup>-Modells erstellt. Dieses bildet die Profilerweiterung ab. Außerdem erfolgte die Anpassung der grafischen Oberfläche, sodass auch das vorgegebene Farbschema umgesetzt werden konnte. Die Implementierung wurde kompiliert, sodass sie als Plug-in in eine Papyrus-Installation integriert werden kann. Bild 4-17 zeigt einen Screenshot der Werkzeugunterstützung. Modelliert wurde der bereits beschriebene Abfüllprozess.

Der Editor verfügt auf der linken Bildseite über eine Übersicht der Projekte. Hierbei handelt es sich im Prinzip um ein Verzeichnis der Arbeitsumgebung in der die verschiedenen angelegten Projekte gezeigt werden und geöffnet werden können. Darunter befindet sich der Modellexplorer, der das geöffnete Modell in hierarchischer Form zeigt. Diese Darstellung enthält alle Modellelemente, aber auch Diagramme etc. In der darunter befindlichen Miniaturansicht findet sich eine kleine Darstellung des angezeigten Diagramms, die bei der Ansicht von großen Diagrammen hilfreich ist. Den meisten Raum nimmt die Diagramm- bzw. Modellierungsoberfläche ein. Hier werden die Diagramme visualisiert. Darunter befindet sich ein Fenster, das die Eigenschaften und Attribute eines angewählten Modellelements anzeigt. Auf der rechten Seite befindet sich die Toolbar. Sie enthält die zur Verfügung stehenden Modellelemente. Diese sind abhängig von der gewählten Diagrammart.

Im Folgenden soll die Modellierung im Werkzeug anhand zweier Beispiele veranschaulicht werden. Dabei wird die bereits vorgestellte Abfüllanlage erneut aufgegriffen. Bild 4-18 zeigt einen Ausschnitt des Modells der Produktionsobjekte. Die Modellierung erfolgt im BDD-Diagramm. Modelliert werden darin (SysML-)Blöcke, die durch einen zusätzlichen Stereotypen als Produktionsobjekt identifiziert werden. Mit der Aggregations- und Generalisierungsbeziehung werden die Beziehungen zwischen den Objekten modelliert (vgl. auch Bild 4-6).

---

<sup>24</sup> Bei XML handelt es sich um ein menschen- und maschinenlesbares Format, das zur Abbildung hierarchisch strukturierter Daten geeignet ist [W3C08-ol].

<sup>25</sup> Ecore ist eine Beschreibungssprache für Metamodelle, die von Eclipse verwendet werden

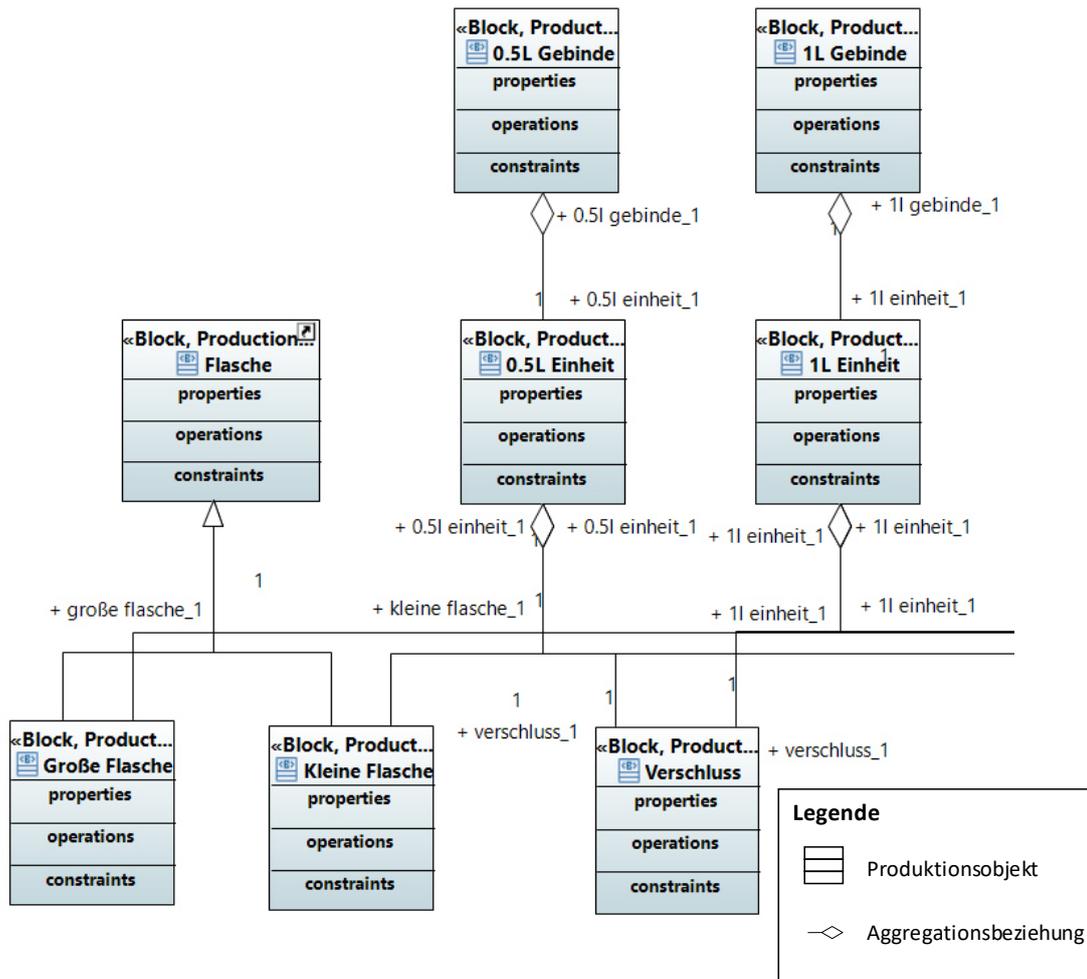


Bild 4-18: Beispielmodellierung in SysML4ProductionPlants: Produktionsobjektstruktur (Screenshot)

Bild 4-19 zeigt die Allokationssicht der bereits beschriebenen Abfüllanlage. Allokationen zu Fertigungs- oder Pufferressourcen werden damit entsprechend blau und gelb dargestellt. Erkennbar ist dies auch an den in eckigen Klammern notierten Stereotypenbezeichnungen. Die Visualisierung der Aktivitäten erfolgt konform zur SysML mit Kästen mit abgerundeten Ecken.

Neben der Anfertigung der Diagramme selbst gilt es auch, die Querbeziehungen zwischen den Modellelementen über die unterschiedlichen Ebenen des Modells hinweg zu setzen. Ziel ist es dabei, Nachverfolgbarkeit bzw. Durchgängigkeit herzustellen sowie die Plausibilität des Modells zu sichern.

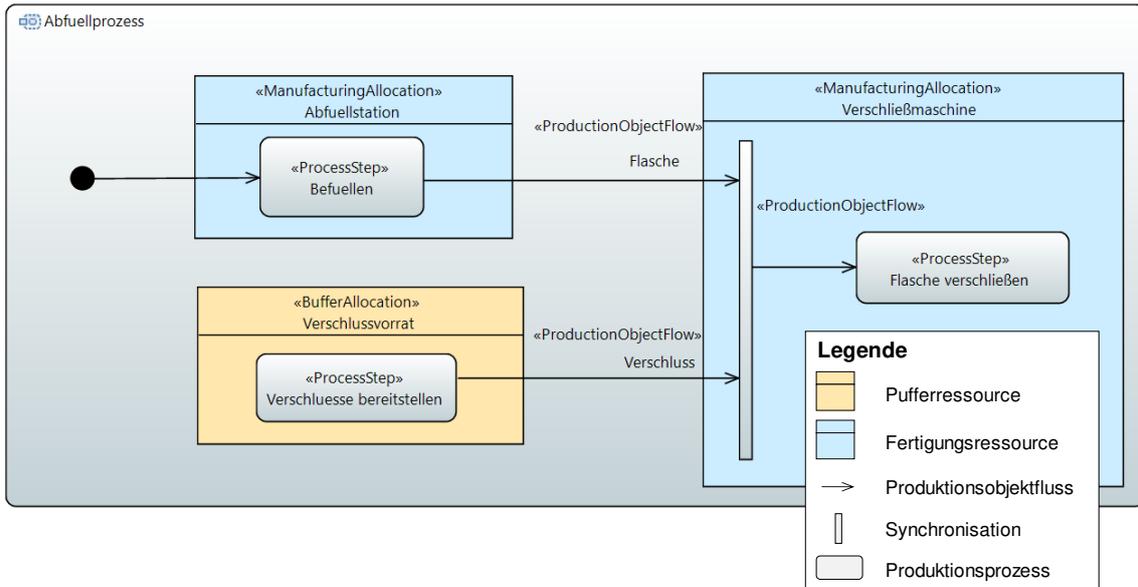


Bild 4-19: Beispielmodellierung in SysML4ProductionPlants: Allokationssicht (Screenshot)

In Bild 4-20 ist das Modellierungskonzept mit den zu setzenden Querbeziehungen abgebildet. Diese werden im Folgenden kurz erläutert, wobei insb. die Realisierung der Querbeziehung in der SysML beschrieben wird.

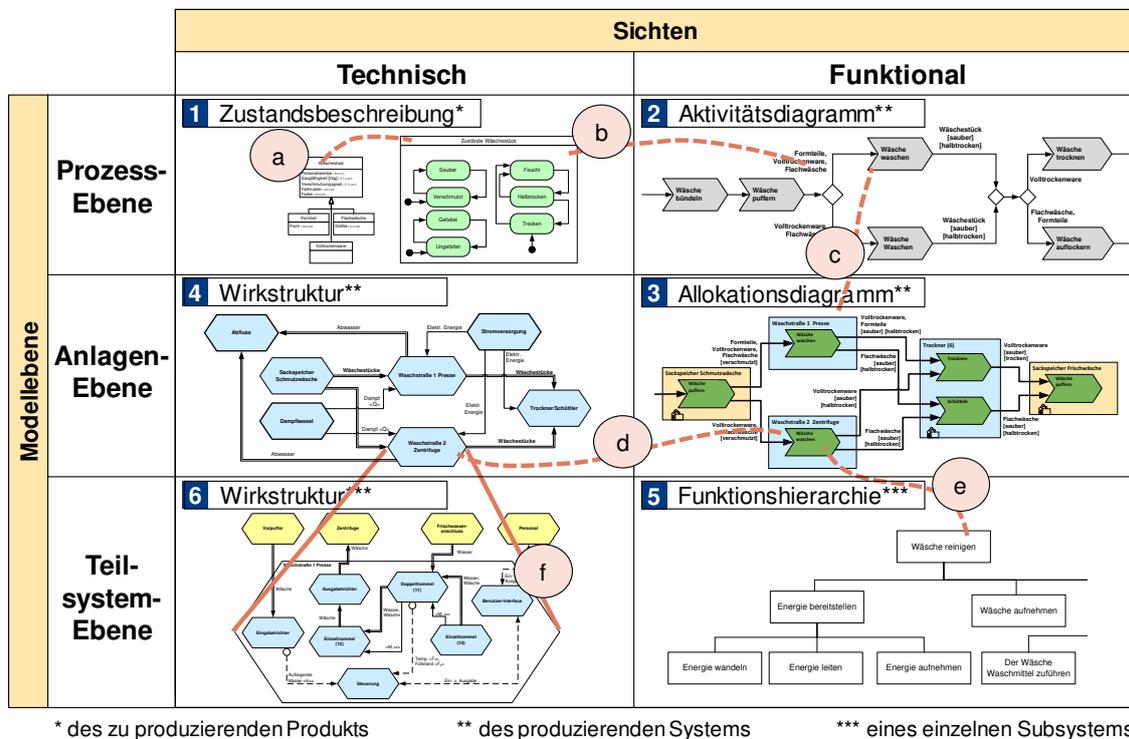


Bild 4-20: Modellierungskonzept mit Querbeziehungen

a: Referenz der Zustände: Jede Zustandsbeschreibung wird einem Produktionsobjekt zugeordnet. In der SysML wird dies erreicht, indem die Zustandsbeschreibung

hierarchisch in das entsprechende Produktionsobjekt gelegt wird oder ein geeigneter Trace gesetzt wird.

- b: Verweis auf die Produktionsobjekte: Die Produktionsobjekte werden zwischen den Prozessen mit ihrem entsprechenden Zustand beschrieben. Dies wird erreicht, indem die entsprechenden Produktionsobjekte in den Fluss zwischen den modellierten Prozessen eingetragen werden.
- c: Zuordnung der Prozesse: Die Produktionsprozesse auf Prozess- und Anlagenebene sind dieselben. Sie sind dementsprechend synchron zu halten. Im Modell wird dies durch Wiederverwendung der Modellelemente (und dementsprechender Sichtenbildung) erreicht.
- d: Verknüpfung der Allokation: Das in der Allokationssicht definierte Produktionssystem wird in der Anlagenstruktur wieder aufgegriffen. Im SysML-Modell wird der entsprechende Verweis in der Allokation eingetragen und so die Verknüpfung hergestellt.
- e: Zuordnung der Gesamtfunktionen: Die Gesamtfunktion einer Maschine ist der definierte Prozess. Durch Modellierung eines Traces zwischen Prozess und Funktion wird die Durchgängigkeit erreicht.
- f: Zuordnung der Teilsysteme: Die Teilsysteme stellen eine Detaillierung der auf Anlagenebene definierten Systeme dar. Dementsprechend wird die Modellierung in der SysML als internes Blockdiagramm (IBD) des übergeordneten Blocks vorgenommen.



## 5 Anwendung und Bewertung

In diesem Kapitel wird eine Validierung der beschriebenen Systematik vorgenommen. Dazu wird zum einen das MBSE-Modellierungskonzept und das Vorgehensmodell anhand des Beispiels einer Großwäscherei angewendet (Kap. 5.1). Zum anderen wird die Arbeit anhand der Anforderungen aus Kapitel 2 bewertet (Kap. 5.2).

### 5.1 Exemplarische Anwendung anhand einer industriellen Großwäscherei

Für die exemplarische Anwendung wird zunächst in Abschnitt 5.1.1 das Beispiel vorgestellt. In den vier darauffolgenden Abschnitten erfolgt die Anwendung des vier-phasigen Vorgehensmodells.

#### 5.1.1 Vorstellung des Beispiels

Das Beispielsystem ist eine industrielle Großwäscherei. Gereinigt wird dort Berufsbeleidung und Krankenhauswäsche sowie Hotel- und Gastronomiewäsche. Die im Beispiel geplante Wäscherei verfügt über zwei Waschstraßen, zahlreiche Wasch-Schleuder-Maschinen sowie einige weitere Maschinen zum Trocknen und Glätten der Wäsche. Bild 5-1 zeigt eine Prinzipdarstellung dieser Industriellen Großwäscherei.

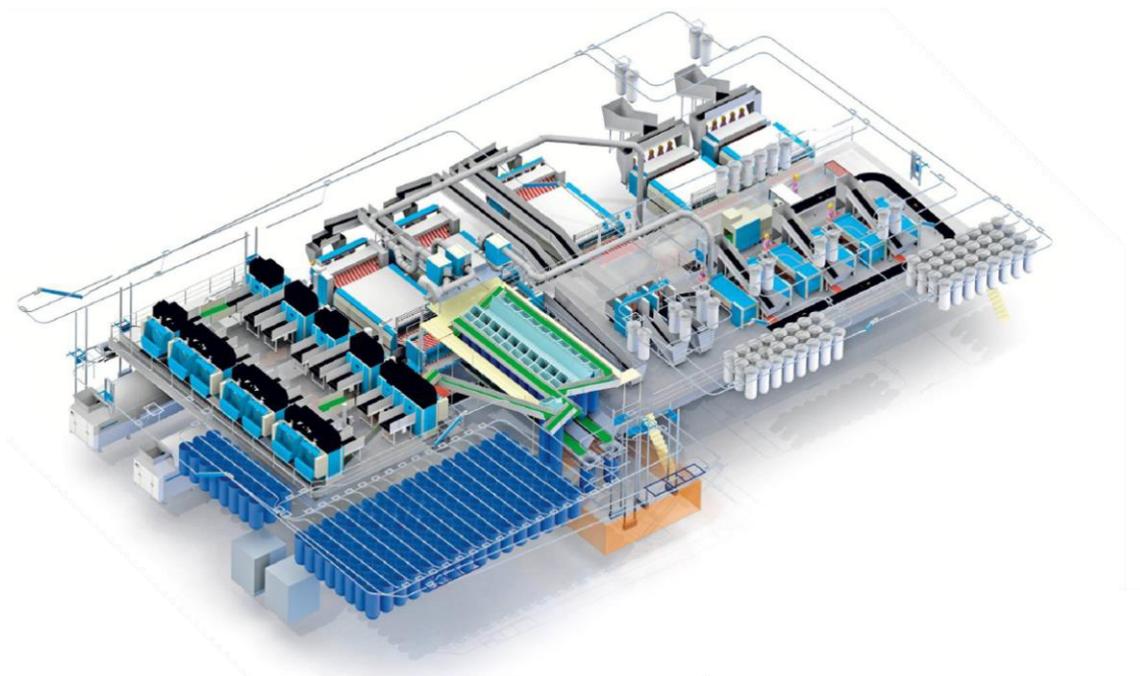


Bild 5-1: Industrielle Großwäscherei [Kan13-ol]

Entscheidend für die Gestaltung der Prozesse ist die Art der angelieferten Wäsche. Krankenhauswäsche wird in geschlossenen Beuteln angeliefert. Diese werden am Eingang

geöffnet und maschinell in größere Behälter befördert. Die Behälter können durch ein Fördersystem zu den Waschstraßen verfahren werden, um die Krankenhauswäsche dort hinein zu geben. In dasselbe Transportsystem werden auch sonstige Flachteile wie Tischdecken oder Serviertten und Volltrockenwäsche gegeben. Diese Teile stammen bspw. von Hotelbetrieben. Daneben gibt es noch personalisierte Wäsche. Es handelt sich dabei um Arbeitsbekleidung, die aus Werkstätten, Laboren usw. stammen kann, oder persönliche Kleidung, z.B. aus Altenheimen. Diese Wäsche wird mittels RFID-Chips markiert und typischerweise in Wasch-Schleuder-Maschinen gegeben. Das weitere Verfahren richtet sich nach der Art der Wäsche. Formteile, also Jacken, Hosen etc., werden in einem Formteilglätter, dem Finisher, geglättet und gefaltet. Flachteile, wie Tischdecken oder Serviertten, werden gemangelt und gefaltet. Volltrockenwäsche bedarf keiner expliziten Glättung. Sie wird getrocknet und direkt zur Falmmaschine gebracht [WFK17-01].

Industrielle Wäschereien lassen sich mit Produktionsanlagen vergleichen. Sie sind geprägt durch die sequentielle Abfolge von Prozessen, mit denen ein Ausgangsprodukt in den gewünschten Endzustand überführt wird, wie Bild 5-2 verdeutlicht.

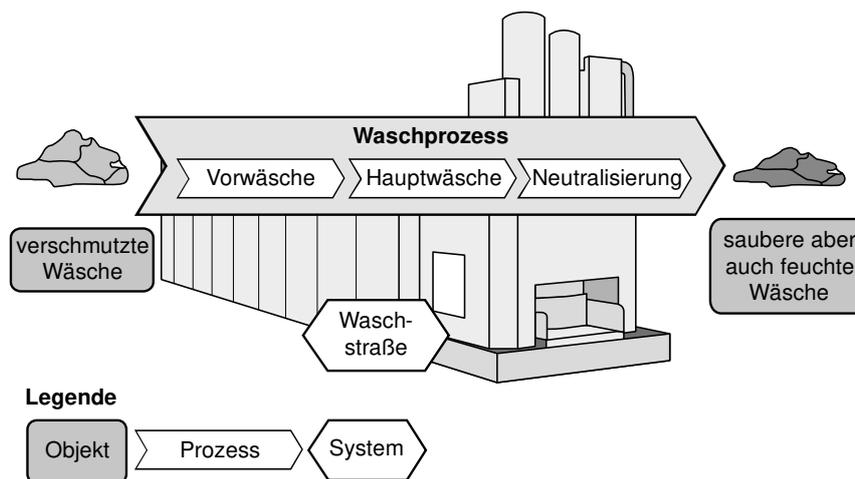


Bild 5-2: Prinzipdarstellung Waschprozess [DBK+15]

Die Konzipierung und Auslegung einer Wäschereianlage erfolgt prozessgetrieben. Das bedeutet, dass zunächst die Prozesse, die in der Anlage ablaufen sollen, qualitativ und quantitativ bekannt sein müssen, bevor die Anlage auf dieser Grundlage geplant werden kann. Eine entscheidende Rolle spielt dabei, welche Wäsche zu welchem Zeitpunkt und in welcher Menge angeliefert wird; so beeinflusst bspw. die Wäscheart die Prozesszeiten sehr stark. Dem muss durch höhere Kapazitäten in Form weiterer Maschinen entsprochen werden. Möglicherweise lässt sich jedoch auch ein geringerer Durchsatz in Kauf nehmen, der sich ausgleicht, da im späteren zeitlichen Verlauf Wäsche mit deutlich kürzeren Prozesszeiten angeliefert wird. Hieran wird deutlich, dass die Modellierung der Anlage, sowohl zur Konzipierung als auch zur Laufzeit hilfreich ist, um bspw. Alternativen abzuwägen. Das zugrundeliegende Modell muss die konsistente Abbildung vom System und den Prozessen gewährleisten. Denn während die Prozessbeschreibung Abläufe auf

logischer Ebene fokussiert, gehen Kapazitäten oder Durchlaufzeiten aus der Systembeschreibung hervor.

Das betrachtete System umfasst nur die eigentliche Wäschereianlage. Die Lieferung oder der Abtransport der Wäsche wird nicht betrachtet. Außerdem wird auf einige Sonderfälle, wie bspw. das Waschen von Matratzen oder Schmutzfangmatten, nicht eingegangen. Die Darstellung der im Folgenden erläuterten Modelle erfolgt (wie in Kap. 4 auch) in Microsoft Visio um eine bessere Lesbarkeit zu gewährleisten und die entscheidenden Informationen besser herausstellen zu können. Die Modellierung ist auch mit der entwickelten Werkzeugunterstützung möglich.

### **5.1.2 Phase 1: Produktionsobjektbeschreibung**

Die Phase besteht aus drei Aufgaben bzw. Methoden. Diese werden im Folgenden durchlaufen.

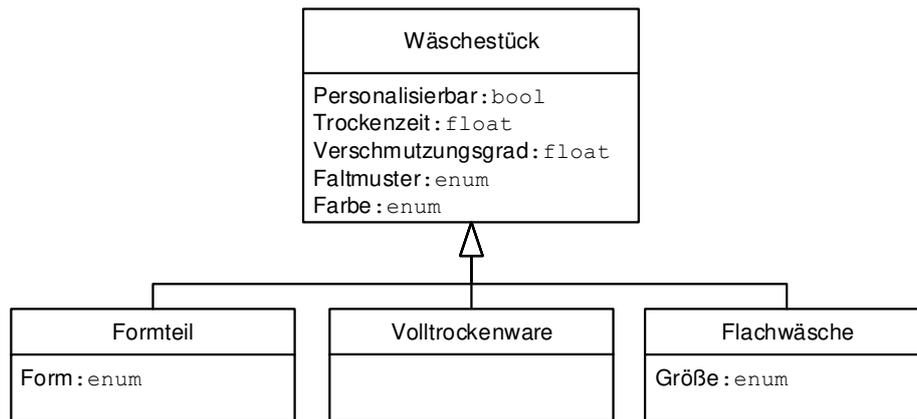
#### **Relevante Objekte identifizieren**

Zunächst gilt es, die relevanten Produktionsobjekte zu identifizieren. Dies ist in diesem Beispiel das Wäschestück, das durch den Waschprozess läuft. Konkret sind dabei drei Arten von Wäsche zu unterscheiden: Formteile, Volltrockenware und Flachwäsche. Bei Formteilen handelt es sich um Teile wie Hemden oder Hosen. Volltrockenware (auch: Frottierwäsche) ist Wäsche, die ohne einen Zwischenschritt für das Glätten auskommt und nach dem Reinigen direkt getrocknet werden kann. Flachwäsche sind Teile wie Tischdecken, Laken etc., die typischerweise nur aus einer oder zwei Lagen Stoff bestehen.

#### **Objektstruktur anlegen**

Aus der Analyse des Beispielsystems und des Produkts Wäsche geht hervor, dass drei Arten von Wäsche unterschieden werden können. Dementsprechend wird eine Hierarchie wie in Bild 5-3 angelegt.

Ein abstraktes Objekt Wäschestück führt die drei unterschiedlichen Wäschekategorien zusammen. Hierarchisch darunter angeordnet sind die drei Wäschetypen Formteil, Volltrockenware und Flachwäsche. Eine Eigenschaft, die alle Wäschearten innehaben, ist bspw. die Personalisierbarkeit. Sie ist als Wahrheitswert auf oberster Ebene eingetragen und ist demnach auch auf die spezifischen Wäschearten anwendbar. Andere Parameter wie bspw. die Größe sind dagegen nur im Falle von Flachwäsche relevant (für die im Prozess ggf. notwendige Auswahl der geeigneten Mangel) und werden dementsprechend an die spezifischen Teile annotiert.

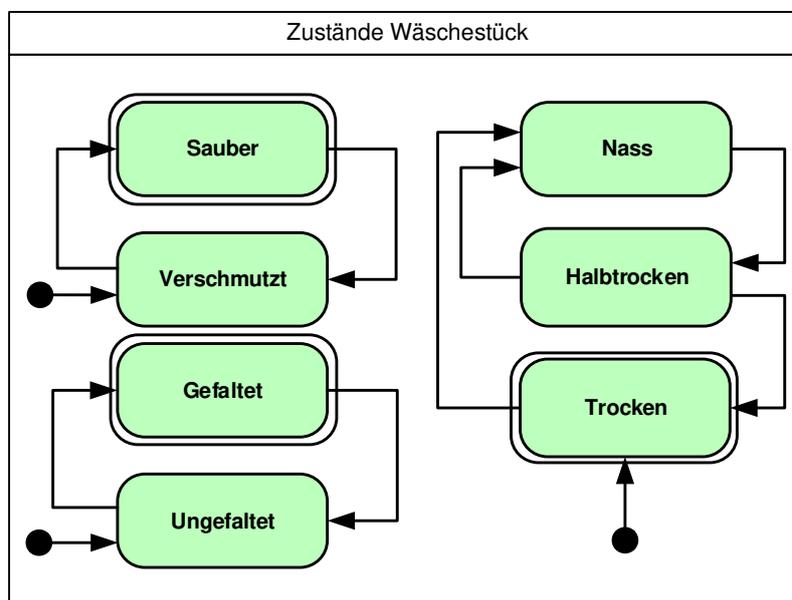
**Legende**

□ Objekt    ▾ Generalisierung

Bild 5-3: Objekthierarchie zum Produktionsobjekt Wäschestück

**Objektzustände definieren**

Anschließend werden die Zustände der Produktionsobjekte modelliert. Dabei wird die Objekthierarchie berücksichtigt. Zuerst werden die Zustände desjenigen Objekts betrachtet, das zuoberst in der Hierarchie steht. In diesem Fall werden also die Zustände beschrieben, die für alle Wäschestücke gelten. Das Modell ist in Bild 5-4 abgebildet. Zustände wurden bezüglich der Sauberkeit, des Feuchtigkeitsgehalts und der Faltung definiert.

**Legende**

○ Zustand    ○ Zielzustand    ● Anfangsknoten    → Zustandsübergang

Bild 5-4: Zustände des Produktionsobjekts Wäschestück

Ein anderer zu berücksichtigender Aspekt ist bspw. die Glättung. Da Volltrockenware aber nicht geglättet werden muss, werden diesbezügliche Zustände nur Formteilen und

Flachwäsche zugeordnet. Dies wird also in weiteren, extra zu modellierenden Zustandsdiagrammen erarbeitet, die den Typen Formteil und Flachwäsche zugeordnet werden.

### 5.1.3 Phase 2: Erarbeitung der Produktionsprozesse

Im zweiten Schritt des Vorgehens werden, ausgehend von der Analyse des Produktionsobjekts, die Produktionsprozesse erarbeitet. Dazu werden erst die Prozesse selbst identifiziert; anschließend erfolgt die Zuordnung zu einer Maschine.

#### Prozessfolge definieren

Aus der Analyse der Zustandsdiagramme können die benötigten Produktionsprozesse abgeleitet werden. Beispielhaft seien in Bild 5-5 einige wesentliche Prozesse abgebildet. Wird ein Wäschestück verschmutzt angeliefert, wird es durch einen Waschprozess gereinigt. Nach dem anschließenden Entwässern ist das Wäschestück halbtrocken. Nun muss die bereits beschriebene Unterscheidung zwischen Volltrockenware und anderen Wäschearten getroffen werden. In diesem Sinne kann eine erste Prozessbeschreibung entwickelt werden.

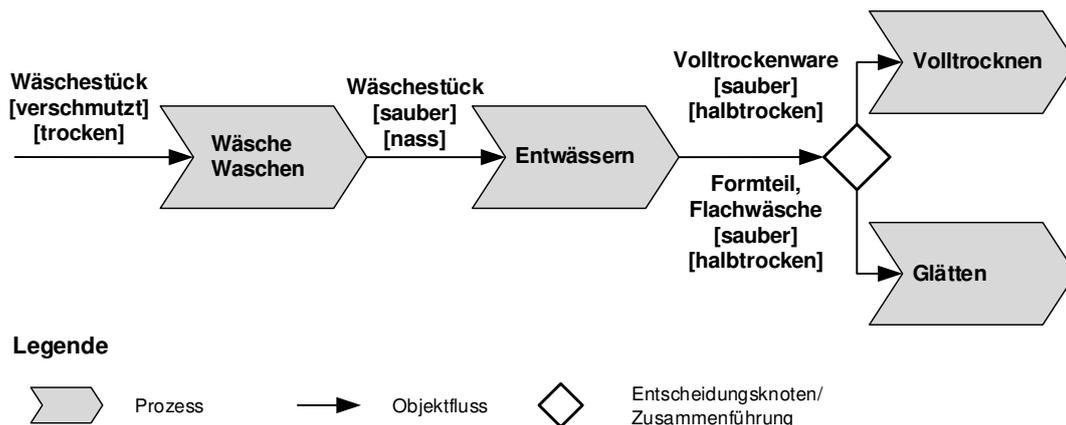


Bild 5-5: Prozessbeschreibung des Waschprozesses (Ausschnitt)

Jedoch beinhaltet die bisher modellierte Beschreibung noch keine Nebenprozesse, die bspw. aus möglichen Restriktionen der Produktionsressourcen entstammen können. Im Zuge der Allokation von Produktionsressourcen wird daher auch eine Präzisierung der Prozesse erfolgen.

#### Produktionsressourcen zuordnen

Im zweiten Schritt dieser Phase werden den definierten Produktionsprozessen die entsprechenden Ressourcen zugeordnet. Dies erfolgt abhängig von der Planungsaufgabe vor dem Hintergrund einer bestehenden Anlage, in die weitere Prozesse integriert werden, einer Erweiterung der Anlage oder einer Neuplanung. Für die Auswahl der geeigneten Produktionsressourcen kann bspw. mit einem morphologischen Kasten gearbeitet werden, um mögliche Alternativen zu ordnen (siehe bspw. [PBF+07]). Bei der Modellierung wird das Prozessdiagramm mit weiteren Inhalten, insb. der Allokation der

Produktionsressource, angereichert. Für die Wäscherei ist eine entsprechende Allokationssicht in Bild 5-6 abgebildet.

Bei der Modellierung ist darauf zu achten, dass jedem Knoten des Prozessdiagramms, also sowohl den Prozessen als auch den Entscheidungs- oder Synchronisationsknoten, eine Ressource zugeordnet wird, die diesen realisiert. Im Beispiel ist zu erkennen, dass nicht nur dem Waschprozess die entsprechende Ressource zugeordnet wurde. Auch die Entscheidung, um was für eine Wäschekategorie es sich handelt, ist für den nachfolgenden Prozess relevant und wird durch das Transportband getroffen.

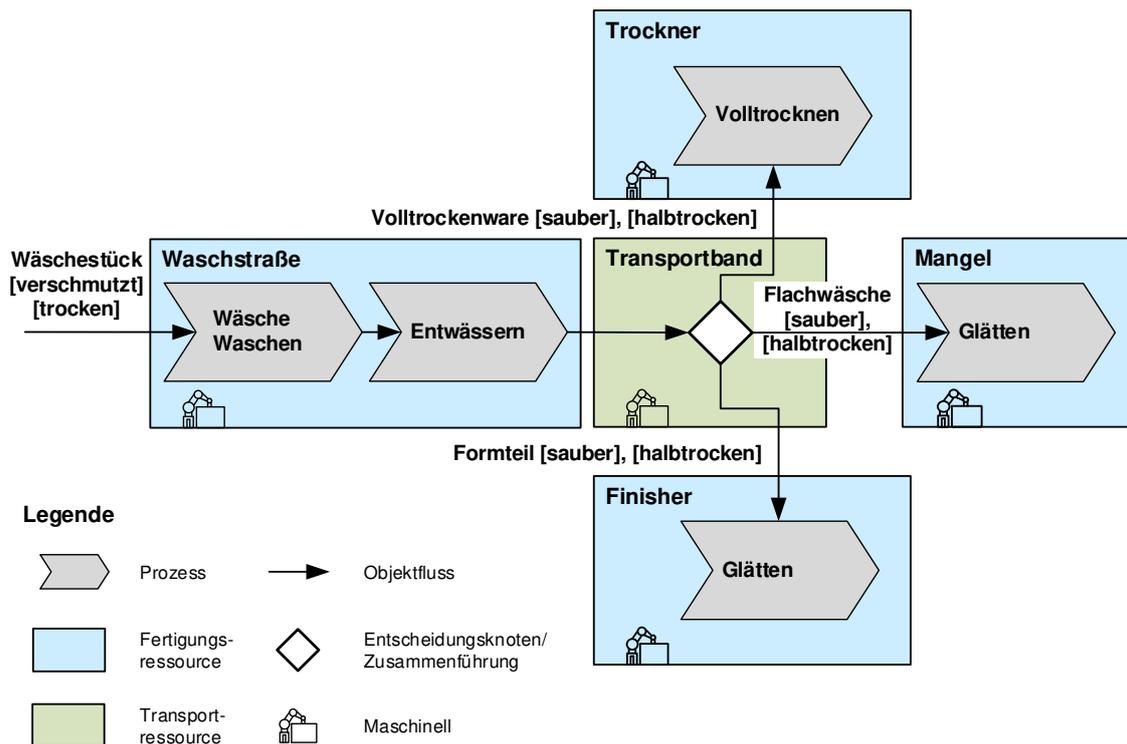


Bild 5-6: Allokationssicht auf die industrielle Wäscherei (Ausschnitt)

Zu erkennen ist außerdem, dass die Prozessbeschreibung konkretisiert bzw. verfeinert wurde. Aus der Betrachtung der möglichen Ressourcen ergab sich, dass für jeweils eine Wäscheart (Volltrockenware, Flachwäsche, Formteil) eine spezifische Maschine für das Glätten zu wählen ist. Der Entscheidungsknoten, der der Separierung der Wäschearten dient, musste daher um eine weitere Alternative erweitert werden (vgl. Bild 5-5 und Bild 5-6). In diesem Sinne wird also die Lösungsfindung vorangetrieben und Implikationen aus der Lösungsfindung auf den Prozess erarbeitet und abgebildet.

### 5.1.4 Phase 3: Architekturbeschreibung

In der dritten Phase des Vorgehens gilt es, die Struktur der Produktionsanlage bzw. der Industriellen Wäscherei zu erarbeiten. Auch in dieser Phase wird iterativ gearbeitet. Zunächst wird die Anlagenstruktur aus den bisherigen Diagrammen abgeleitet.

Anschließend werden die Teilsysteme konsolidiert, wobei hierbei Systemelemente zusammengefasst oder auch separiert werden können.

### Anlagenstruktur ableiten

Die Anlagenstruktur wird aus der zuvor erstellten Allokationssicht abgeleitet. Dazu werden die verzeichneten Ressourcen als Systemelemente der Anlage aufgefasst. Der Objektfluss zwischen den Prozessen erzeugt einen Materialfluss ebendieses Produkts zwischen den Systemelementen. Konsequenterweise ergibt sich aus der zuvor beschriebenen Allokationssicht die in Bild 5-7 verzeichnete Anlagenstruktur, in der die Systemelemente Waschstraße und Transportband wiederzufinden sind.

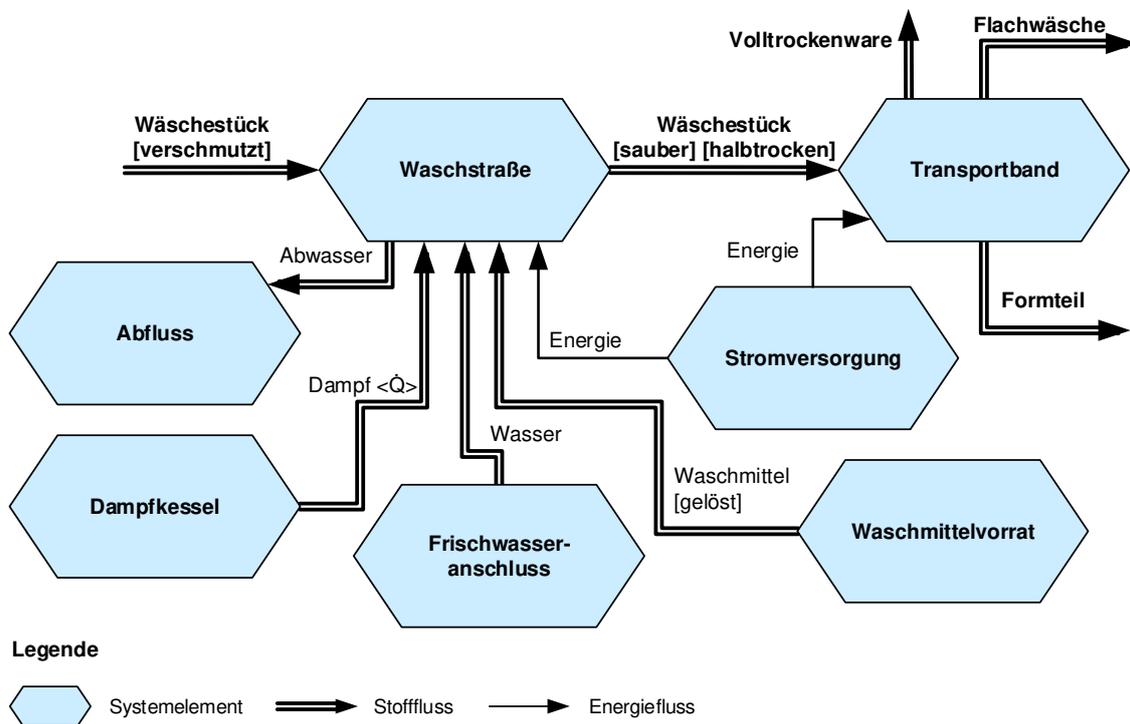


Bild 5-7: Wirkstruktur der Industriellen Wäscherei (Beispiel)

Im Zuge der Entwicklung der Wirkstruktur stellt sich im Folgenden die wesentliche Frage, wie die Systemelemente mit Material, Energie etc. versorgt werden. Die entsprechenden zusätzlichen Systemelemente müssen in die Wirkstruktur integriert werden. Im Beispiel ergibt sich so, dass für den Antrieb von Waschstraße und Transportband eine Stromversorgung notwendig ist. Die Wärmezufuhr für den Waschprozess soll über einen extra bereitzustellenden Dampfkessel erfolgen. Ferner bedarf es einer Wasser- und Waschmittelzufuhr. Auf diese Weise kann die Struktur der gesamten Anlage sukzessive erarbeitet werden. Dabei sind auch die grundsätzlichen bzw. konzeptionellen technischen Restriktionen oder Eigenschaften der Systeme zu erarbeiten und zu berücksichtigen.

## **Teilsysteme konsolidieren**

Dieser Schritt dient der Konsolidierung der abgeleiteten Wirkstruktur. Es ist anzunehmen, dass die bisher erarbeitete Struktur, die prozessgetrieben angelegt wurde, noch nicht alle technischen Restriktionen beinhaltet. Außerdem ist zu klären, inwieweit die in der Allokation definierten Ressourcen unmittelbar durch ein entsprechendes Subsystem realisiert werden. Auch eine make-or-buy Entscheidung kann in diesem Zusammenhang relevant sein und dazu führen, manche Systemelemente zunächst weiter aufzuteilen, bevor die detailliertere Spezifikation der einzelnen Systemelemente vorgenommen wird.

Als Beispiel kann im Zusammenhang mit der Industriellen Großwäscherei die Entwässerung, die direkt nach dem Waschprozess stattfindet, genannt werden. Hierzu gibt es zwei typische Lösungsansätze. Eine Presse, in der mittels eines Stempels die Wäsche zusammengepresst wird, und eine Zentrifuge, in der die Wäsche in einer Trommel geschleudert wird. Auf Grund hoher mechanischer Belastungen kann die Presse für einige Formteile nicht verwendet werden. Dementsprechend ist für die Auswahl einer entsprechenden Ressource zu klären, welche Wäschearten in welcher Menge verarbeitet werden und welche Alternativen bestehen. Möglich ist bspw. auch, zwei verschiedene Waschstraßen zu installieren, die jeweils mit unterschiedlichen Entwässerungsprinzipien arbeiten.

Ergebnis dieser Phase ist somit letztlich eine konsolidierte Anlagenstruktur, die sowohl die Produktionsressourcen als auch weitere, zur Versorgung dieser Ressourcen oder für den Materialtransport benötigte Systeme, enthält. Die Verknüpfungen zwischen diesen Elementen zeigen die notwendigen Schnittstellen auf. Mit dieser Basis kann die Spezifikation der einzelnen Systeme im Zuge einer Detaillierung erarbeitet werden.

### **5.1.5 Phase 4: Teilsystemdetaillieren**

In der vierten Phase des Vorgehens werden nun die einzelnen Teilsysteme der Anlagen detailliert. Dabei kann ein Teilsystem selbst auch als System angenommen werden. Bei einem solchen System kann es sich entweder selbst um ein Produktionssystem handeln; das Konzept dieser Arbeit ist entsprechend noch einmal anwendbar. Andernfalls handelt es sich um ein konventionelles mechatronisches System. Für solche Systeme sind bereits Ansätze des MBSE bekannt und etabliert. Dementsprechend wird an dieser Stelle die Spezifikationstechnik CONSENS zur Anwendung gebracht. Das Vorgehen greift zwei Aspekte insbesondere auf, die mit in das Modellierungskonzept integriert sind: Das Funktionsmodell und die Wirkstruktur.

#### **Funktionsmodell erstellen**

Ziel der Funktionsmodellierung ist das Herunterbrechen der Funktionen in Teilfunktionen, zu welchen Lösungselemente gefunden werden können. Hierzu wird eine Funktionshierarchie angelegt. Die Gesamtfunktion kann dabei ggf. bereits aus der Allokationssicht entnommen werden; sie entspricht dem zugeordneten Prozess. Im Falle der Waschstraße

ist dies der Prozess Wäsche waschen. Entsprechend wurde die Funktionshierarchie aufgebaut, die ausschnittsweise in Bild 5-8 abgebildet ist.

Die Gesamtfunktion Wäsche waschen wurde zunächst in Hauptfunktionen unterteilt. Hierzu zählen bspw. Wäsche aufnehmen oder Waschvorgang durchführen. Diese Funktionen können weiter untergliedert werden. Zur Realisierung des Waschvorgangs sind bspw. die vier Phasen (Vorwäsche, Klarwäsche, Spülen, Neutralisation) des Waschprozesses zu durchlaufen. Die Funktionen werden soweit unterteilt, bis zu jeder Funktion ein entsprechendes Lösungselement gefunden werden kann.

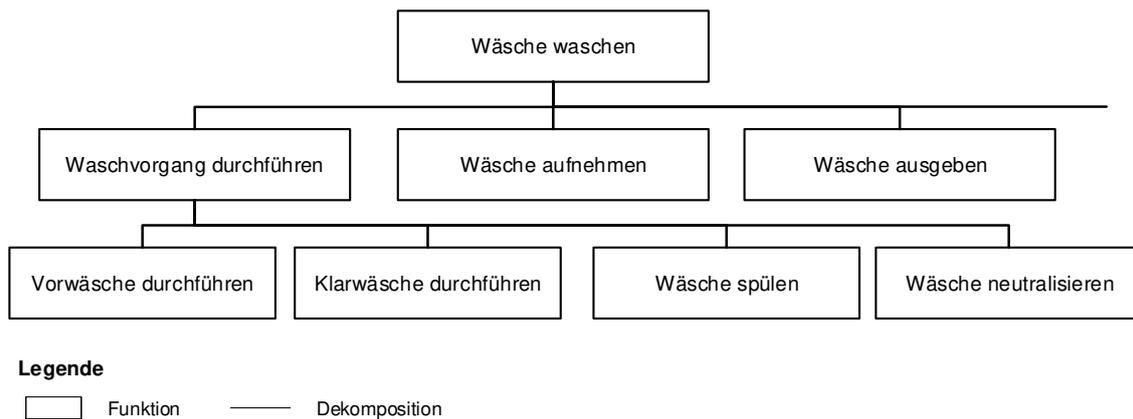


Bild 5-8: Funktionen einer Waschstraße (Beispiel)

### Wirkstruktur detaillieren

Die Wirkstruktur enthält die Systemelemente des betrachteten Systems und stellt ihre Beziehungen untereinander sowie zum Umfeld dar. Dabei können zwei Aspekte als Quelle zur Gestaltung der Wirkstruktur herangezogen werden: Die Wirkstruktur auf Anlagen-ebene beschreibt bereits das Umfeld des betrachteten Systems, die hierin verzeichneten Schnittstellen sind zu berücksichtigen bzw. zu realisieren. Außerdem muss das System die im vorangegangenen Arbeitsschritt definierten Funktionen erfüllen. Bild 5-9 zeigt beispielhaft eine Wirkstruktur der Waschstraße. Dabei sind die Umfeldelemente im Diagramm aufgegriffen, um die Schnittstellen zum Umfeld herauszuarbeiten.

Die Waschstraße verfügt über verschiedene, miteinander verbundene Trommeln. Jeder Trommelverbund realisiert einen bestimmten Waschprozess. Die Wäsche wird taktweise durch die Trommeln geschleust und durchläuft auf diese Weise den Waschprozess. Durch entsprechende Ein- und Ausgabetrichter wird die Wäsche an den Systemgrenzen übergeben. Das System muss darüber hinaus entsprechende Schnittstellen für Wasser, Dampf etc. bereitstellen. Die Modellierung erfolgt nach dem Prinzip der Wirkstrukturmodellierung in CONSENS. Darin werden System- und Umfeldelemente unterschieden sowie Stoff-, Informations- und Energieflüsse.

Mit den in dieser Phase modellierten Partialmodellen Funktionen und Wirkstruktur sind die Grundlagen für die weitere modellbasierte Spezifikation und Ausarbeitung gelegt. Zur

weiteren Arbeit wird auf entsprechende Methoden zurückgegriffen wie sie bspw. CONSENS beschreibt.

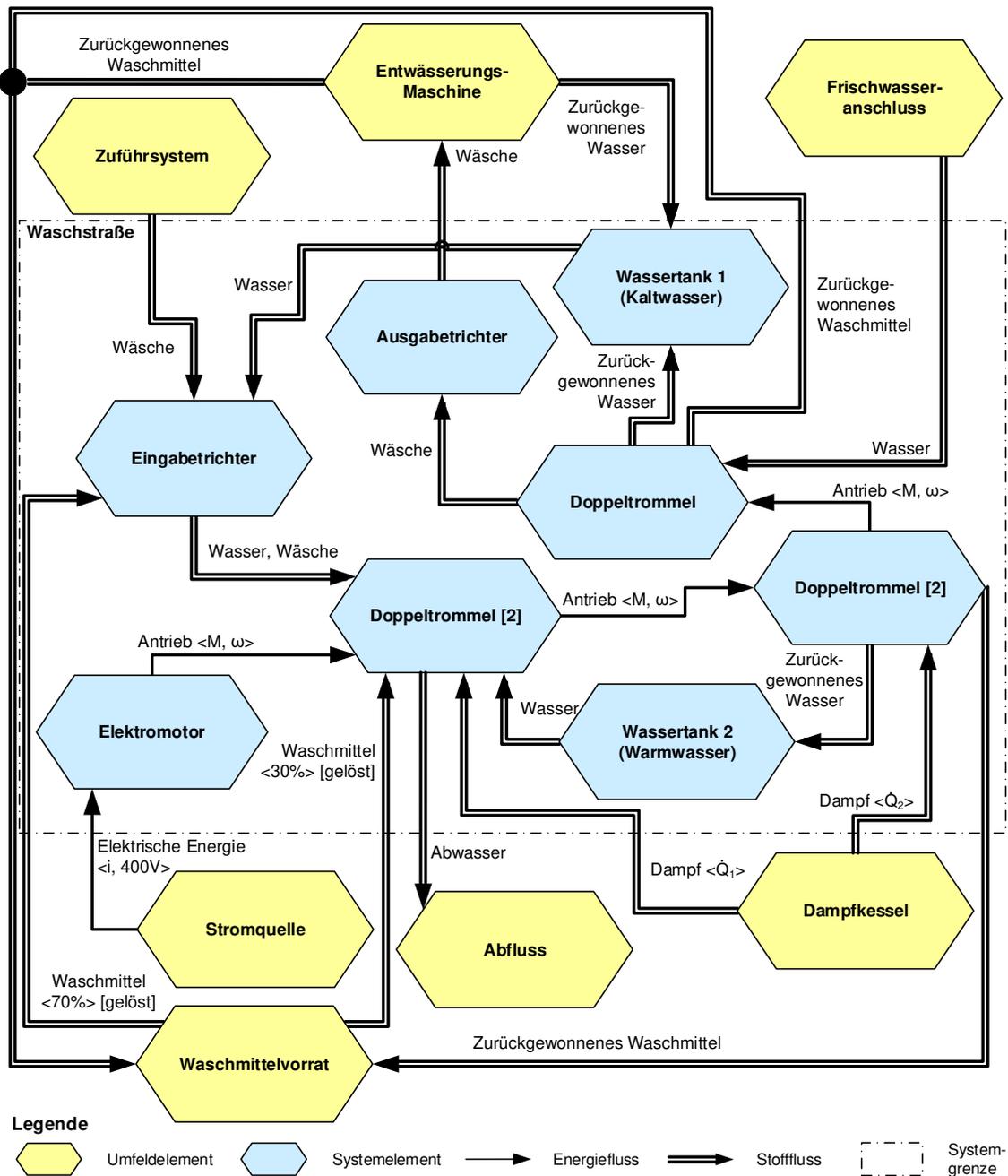


Bild 5-9: Wirkstruktur Waschstraße (Ausschnitt)

### 5.1.6 Beispielhafte Erläuterungen zur weiteren Anwendung der Werkzeugunterstützung

Wie bereits beschrieben, wurde die Visualisierung der Beispielmotellierung in Microsoft Visio vorgenommen, um Zusammenhänge besser darstellen und hervorheben zu können sowie die Lesbarkeit zu erleichtern. Die Modellierung ist aber ebenso in der entwickelten

Werkzeugunterstützung möglich. Hierdurch ergeben sich verschiedene Vorteile gegenüber der Visualisierung in einem Zeichenprogramm.

Die Modellierung basiert auf der SysML. Somit können auch andere auf der SysML basierende Methoden angewendet werden. Insbesondere solche zur Modelltransformation und Modellaustausch. Auch in der konkreten Anwendung in der Planung von Produktionssystemen ergeben sich Vorteile, die vor allem auf den gesetzten Querbeziehungen basieren. Diese Vorteile sollen anhand von zwei Szenarien im Folgenden verdeutlicht werden.

### **Integration eines neuen Produkts in den bestehenden Produktionsablauf**

Wenn ein neues Produkt in den bestehenden Produktionsablauf integriert werden soll, wird zunächst analysiert, an welcher Stelle sich das Produktionsobjekt in die bereits im Modell befindlichen Produktionsobjekte eingliedert. Dies erfolgt maßgeblich durch die Analyse der Zustandsbeschreibungen. Danach werden die benötigten Prozesse beschrieben. Sie werden sich zu einem Großteil aus den anderen Produktionsobjekten ergeben und können wiederverwendet werden. Diese wiederverwendeten Prozesse sind bereits zu Produktionsressourcen allokiert. Es muss nun bewertet werden, ob die dort beschriebenen Schnittstellen auch für das neue Produktionsobjekt geeignet sind. Das Resultat dieser Analyse ist ein Überblick darüber, ob für das neue Produktionsobjekt neue Produktionsressourcen benötigt werden und welche Produktionsressourcen auch für das neue Produkt verwendet werden können.

Die Werkzeugunterstützung bietet dem Anwender die Möglichkeit, gezielt nach den benötigten Informationen zu suchen und Querbeziehungen nachzuvollziehen. Damit wird der Anwendungsfall unterstützt und ein effizientes Arbeiten ermöglicht.

### **Abschätzung des Aufwands bei Änderung eines Subsystems**

Sollen Änderungen an einem Subsystem gemacht werden, gilt es im Vorfeld, den Änderungsaufwand abzuschätzen. Dazu ist es erforderlich, nachzuvollziehen, in welchen Systemen eine zu ändernde Komponente verbaut ist und welche Aufgaben und Funktionen diese Komponenten hat. Auch von der Änderung betroffene Schnittstellen oder angrenzende Systemelemente, Funktionen und Prozesse müssen identifiziert und bewertet werden.

Die Werkzeugunterstützung bietet die Möglichkeit, auf Grundlage der gesetzten Querbeziehungen die beschriebenen Zusammenhänge zu identifizieren. Bild 5-10 zeigt einen Screenshot, der die entsprechenden Querbeziehungen für das Beispiel der Doppeltrommel zeigt. Diese ist Bestandteil der Waschstraße und erfüllt die Funktion Klarwäsche durchführen.

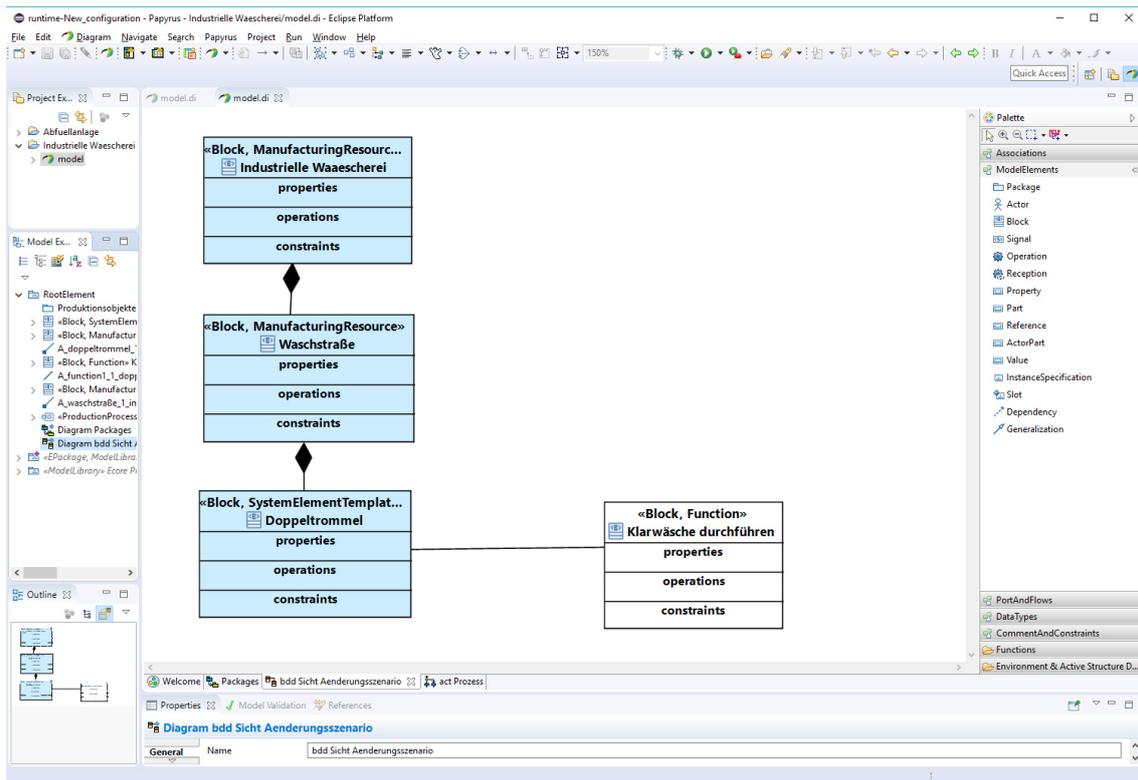


Bild 5-10: Screenshot: Querbeziehungen zwischen Modellelementen der Industriellen Wäscherei

## 5.2 Bewertung der Arbeit

Die abschließende Bewertung der Arbeit erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden in Abschnitt 5.2.1 einige Erläuterung zu den Einsatzpotentialen gemacht. Ziel ist es, mögliche Einsatzpotentiale zu diskutieren. In Abschnitt 5.2.2 wird die Arbeit dann anhand der in Kapitel 2 hergeleiteten Anforderungen bewertet.

### 5.2.1 Erläuterungen zu den Einsatzpotentialen

Der vorgestellte Ansatz zur Modellierung von Produktionsanlagen ist als Erweiterung des MBSE zu verstehen. Er ermöglicht den Übergang von dokument- hin zur modelbasierten Produktionssystemplanung. Um die Nutzenpotentiale des Ansatzes zu verdeutlichen, sollen an dieser Stelle die möglichen Einsatzpotentiale des vorgestellten Konzepts umrissen werden.

#### Nutzung in der Arbeitsvorbereitung

Die Arbeitsvorbereitung hat die Aufgabe der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung. Dazu müssen die zu produzierenden Produkte analysiert, die Prozesse definiert und die Anlagen bzw. Ressourcen zugeordnet werden. Ferner muss die Kommunikation mit weiteren Stakeholdern gesucht werden. Dazu zählen zum Beispiel die ggf. externe Anlagenplanung und der Anlagenbau. Für zukünftige Industrie 4.0 Anlagen ist mit einer Zunahme der

Systemkomplexität zu rechnen. Die Modellierung von Produktionsanlagen mit MBSE unterstützt die Handhabung der Komplexitäten, fördert die Lösungsfindung und ist ein Mittel zur Kooperation und Kommunikation.

### **Anpassung oder Erweiterung einer Produktionsanlage**

Sollen Änderung oder Erweiterungen an einer Produktionsanlage geplant werden, gilt es, die bestehende Anlage aufzunehmen. Hierzu müssen die vorhandenen Systeme mit deren Schnittstellen und Abhängigkeiten ebenso verstanden werden, wie die existierenden Produktvarianten und Prozesse. Das vorgestellte Modellierungskonzept bietet hierfür eine geeignete Modellierungsgrundlage. Das Vorgehensmodell leitet zu einem systematischen Modellaufbau an und hilft so, alle relevanten Informationen zu identifizieren. Sind entsprechende Modelle bereits bei initialer Anlagenplanung erstellt worden, können sie auf Basis persistenter Datenhaltung und Modellpflege wiederverwendet werden.

### **Implementierung des intelligenten Produkts**

Die Industrie 4.0 zeichnet die Vision eines intelligenten Produkts. Dieses ist in der Lage, selbstständig durch die Produktionsanlage zu navigieren und dabei die für die Bearbeitung notwendigen Ressourcen aufzusuchen. Es wägt konkurrierende Ziele wie Zeit, Kosten und Qualität gemäß der von Entwickler oder Kunden gemachten Vorgaben ab. Voraussetzung für all dies ist, dass das Produkt seinen momentanen Zustand sowie den Zielzustand kennt. Außerdem muss es die zur Verfügung stehenden Ressourcen mit ihren Schnittstellen kennen. Diese Informationen sind im Systemmodell enthalten. Die Definition der Produktklassen, der möglichen Zustände sowie der Beschreibung der Ressourcen, welche einen Zustandsübergang bei einem Produkt auslösen, liegen vor. Somit bildet das Modellierungskonzept einen Ansatz zur Spezifikation und Implementierung des intelligenten Produkts im Sinne der Industrie 4.0

### **Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau**

Der Maschinen- und Anlagenbau ist als Anbieter von Industrie 4.0 Systemen zu sehen. Zwar standen in dieser Arbeit Anlagenplaner und -betreiber im Fokus der Betrachtung. Der Modellierungsansatz vermag jedoch auch für die Anbieter solcher Systeme Nutzen zu stiften. Essentiell ist für sie auch das Verständnis der Prozesse und Abhängigkeiten auf Anlagenebene, in die die Produkte integriert werden. Der Kommunikation und Kooperation in der Entwicklung wird auf Grund steigender Systemkomplexität und vielfältiger beteiligter Disziplinen eine höhere Bedeutung zukommen. Zukünftig werden Entwicklungen nicht mehr in separierten Entwicklungsabteilungen vorgenommen, sondern in einem Netzwerk zwischen Kunden, Entwicklungspartnern und Zulieferern. Das entwickelte Modellierungskonzept kann im Sinne des MBSE als Grundlage zur gemeinsamen Arbeit dienen.

## 5.2.2 Bewertung anhand der Anforderungen

In diesem Abschnitt wird die Bewertung der erarbeiteten Systematik anhand der Anforderungen aus Kapitel 2.7 vorgenommen. Dazu wird je Anforderung erläutert, inwiefern diese durch Bestandteile des Konzepts erfüllt wird. Bild 5-11 zeigt einen Überblick über die Anforderungen und ihre Verortung zu den Bestandteilen des Konzepts.

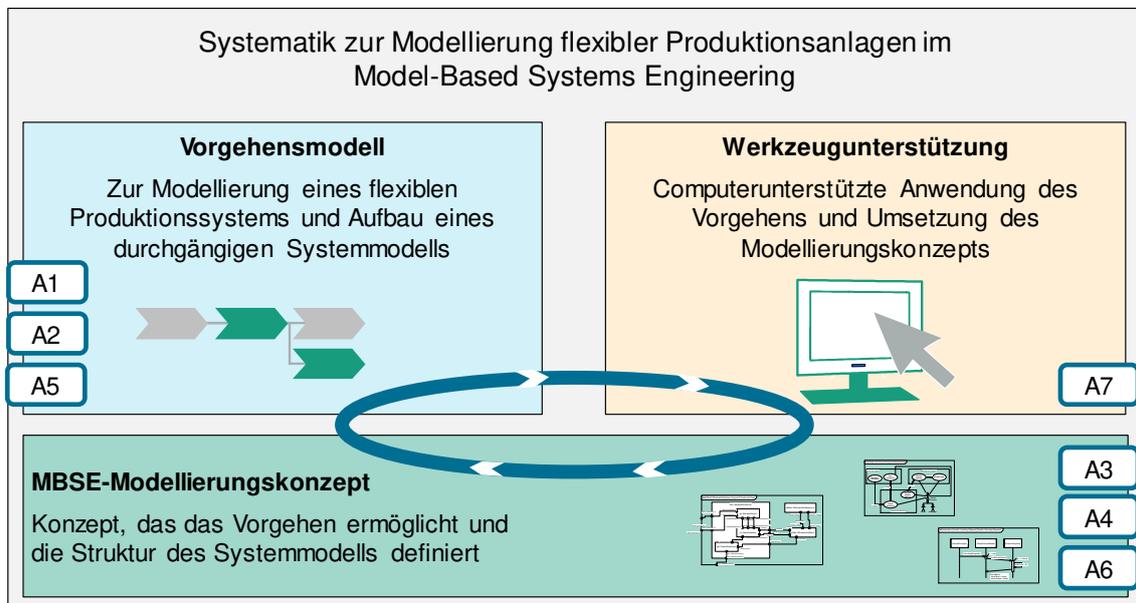


Bild 5-11: Erfüllung der Anforderungen durch den Modellierungsansatz

**A1) Unterstützung der Planung flexibler Produktionsanlagen:** Das entwickelte Vorgehensmodell (Kap. 4.2.2) unterstützt die Planung flexibler Produktionsanlagen. Es leitet den Anwender an, die zu berücksichtigenden Produkte zu analysieren, entsprechende Prozesse abzuleiten und die Verortung auf die Ressourcen vorzunehmen. Auf Basis einer einheitlichen und umfassenden Schnittstellendefinition der Systeme kann eine Flexibilität auch auf technischer Ebene berücksichtigt werden. Die Schnittstellendefinition auf Anlagenebene erfolgt auf Basis der Spezifikation des zu produzierenden Produkts. So können flexibel verschiedene Wege durch die Produktion mit dem Produkt als Ausgangsbasis gesucht werden.

**A2) Einbeziehung der installierten Basis:** Das Vorgehensmodell berücksichtigt die Modellierung der installierten Basis. Durch Modellierung der bestehenden Ressourcen bzw. der vorhandenen Anlagenstruktur kann sichergestellt werden, dass die notwendigen Informationen erfasst sind, die für die Planung von Erweiterungen benötigt werden. Die Verwendung von Modellen an Stelle von Dokumenten ermöglicht es außerdem, implizites Wissen explizit zu machen, und schafft damit das nötige Verständnis der installierten Basis für alle Beteiligten.

**A3) Aufbau eines Systemmodells:** Das MBSE-Modellierungskonzept berücksichtigt den Aufbau eines durchgängigen Systemmodells im Sinne des MBSE. Es definiert, welche Modellierungselemente zur Verfügung stehen, wie diese in Beziehung stehen und

welche Aspekte damit adressiert werden können. Das Vorgehensmodell zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen greift auf das Modellierungskonzept zurück und zielt auf ein durchgängiges Systemmodell in diesem Sinne.

**A4) Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressource:** Das Modellierungskonzept sieht die Modellierung der Aspekte Produkt, Prozess und Ressource vor. Für diese Aspekte werden jeweils geeignete Modellierungselemente bereitgestellt. Das Modellierungskonzept zeigt ebenso auf, wie diese zu verknüpfen sind. Dies geschieht über drei Abstraktionsebenen hinweg, die von der Beschreibung der zu produzierenden Produkte bis zur Modellierung der Ressourcen reichen.

**A5) Frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten:** Das entwickelte Vorgehensmodell gliedert sich in die Tätigkeiten der Arbeitsvorbereitung ein. Es ist im Zuge der frühzeitigen Planung von Produktionsanlagen bzw. deren Erweiterung anzuwenden. In diesem Sinne unterstützt es die frühzeitige Berücksichtigung von Produktvarianten, da es ihre Modellierung explizit vorsieht. Dazu werden die zu produzierenden Produkte strukturiert und mit ihren Eigenschaften beschrieben. Die Modellierung der Produktzustände erlaubt die detailliertere Beschreibung des Produkts mit Blick auf die benötigten Prozesse.

**A6) Grundlage für Kommunikation/ Kooperation:** Das erzielte Systemmodell ist Grundlage für die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Stakeholdern. Es beinhaltet relevante Informationen, um mit Anlagenplaner und -betreiber, Maschinenbauern sowie anderen Stakeholdern auf Planungs- bzw. Konzeptebene zu kommunizieren. Die Modelle im Sinne des MBSE erlauben ein einheitliches Systemverständnis und unterstützen die Entwicklungsarbeit. Daneben haben die verwendeten Modellelemente eine eindeutige visuelle Syntax und ermöglichen Dritten so ein einfaches Verständnis.

**A7) Werkzeugunterstützung:** Zur effektiven Anwendung von Vorgehen und Modellierungskonzept ist eine entsprechende Werkzeugunterstützung erforderlich. Diese wurde auf Basis der etablierten MBSE Modellierungssprache SysML entwickelt. Sie wurde außerdem in einem Werkzeug (Eclipse – Papyrus) umgesetzt. Mit der Werkzeugunterstützung wird es möglich, das Systemmodell anzulegen und es zu warten.

Die vorgestellte *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering* erfüllt somit alle Anforderungen in vollem Umfang. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht es, Produktionsanlagen mit Mitteln des MBSE zu beschreiben und so der zukünftigen Komplexitätssteigerung der Anlagen zu begegnen. Der Ansatz wurde erfolgreich am Beispiel einer industriellen Großwäscherei validiert.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Moderne technische Erzeugnisse sind geprägt durch die tiefgreifende Integration von Mechanik, Elektrotechnik und Informationsverarbeitung. Die **Digitalisierung** treibt die Entwicklung technischer Systeme weiter voran und ermöglicht neue Funktionen und Prozesse der Wertschöpfung. Im Bereich der Produktion bringt der Begriff der **Industrie 4.0** die Potentiale zum Ausdruck, die sich durch den Einzug der Digitalisierung in die industrielle Wertschöpfung ergeben. Die Vision ist eine intelligente und vernetzte Wertschöpfungskette, die auf Störungen reagiert, erweiterbar ist und höchste Effizienz aufweist. Damit wird es für produzierende Unternehmen zukünftig möglich, hochgradig **flexible Produktionsanlagen** zu betreiben.

Mit den Funktionen und Fähigkeiten zukünftiger Produktionsanlagen steigt jedoch auch die **Komplexität** dieser Systeme und die der gesamten Anlage. Die Systeme weisen eine Vielzahl von Abhängigkeiten (sowohl innerhalb des Systems als auch nach außen) auf und können sich während der Laufzeit bspw. auf Grund von Lernprozessen oder Updates verändern. Zukünftig müssen Planer und Betreiber von flexiblen Produktionsanlagen genauso wie der Entwickler solcher Systeme diese Komplexität beherrschen. Die disziplinübergreifende Komplexität technischer Systeme treibt auch die Komplexität in der Entwicklung solcher Systeme. Notwendig sind daher Methoden des Systems Engineering. Diese werden umgesetzt durch den Einsatz von **Model-Based Systems Engineering**. MBSE propagiert ein Systemmodell, das Informationen und Entwicklungsartefakte eines zu entwickelnden Systems zusammenführt. Das Systemmodell erlaubt es, Komplexitäten zu verstehen, Probleme zu lösen und mit anderen zu kommunizieren.

Für den Anwender des MBSE-Ansatzes im Kontext von Produktionsanlagen stellt sich jedoch die Frage, wie dieser konkret eingesetzt wird. Im Rahmen der Arbeit wurden daher Ansätze der durchgängigen Anlagen- und Produktionssystemplanung untersucht. Ebenfalls wurden angrenzende Gebiete der MBSE-Methoden und der Ansätze zur Prozessbeschreibung analysiert. GAUSEMEIER et al. entwickelten mit CONSENS und der integrierten Produktions- und Produktionssystemkonzeption einen vielversprechenden Modellierungsansatz. Mit CONSENS liegt ein Modellierungsansatz vor, der für die funktionsgetriebene Entwicklung mechatronischer Systeme geeignet ist. VOGEL-HEUSER et al. setzen mit ihren Arbeiten auf der SysML auf, sie erschließen damit die Integration in andere MBSE-Ansätze und die Umsetzung in geeigneten Werkzeugen. SCHAEFER et al. beschreiben Ebenen der Modellierung und liefern so einen Ansatz zur Strukturierung des Systemmodells. Keiner der untersuchten Ansätze ist jedoch direkt für den geforderten Einsatz geeignet. Es bestand daher **Handlungsbedarf** für eine *Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering*.

Die entwickelte Systematik basiert auf CONSENS. Diese Spezifikationstechnik ist für die Modellierung mechatronischer Systeme geeignet. Ergänzt werden Ansätze der Prozessbeschreibung. Zur formalen Definition des Konzepts wird die SysML herangezogen.

Damit kann die Integration in andere MBSE-Ansätze sichergestellt und eine Werkzeugunterstützung implementiert werden. Die entwickelte Systematik besteht aus drei Teilen:

- Ein **MBSE-Modellierungskonzept** bildet die Grundlage des Ansatzes. Es beschreibt die Sichten des Systemmodells, die durch Diagramme und die enthaltenen Modellelemente realisiert werden. Zwischen den Modellelementen bestehen Beziehungen, die die einzelnen sich ergänzenden Aspekte letztlich zu einem Systemmodell integrieren. Das Modellierungskonzept hat den Anspruch, die Modellierung einer flexiblen Produktionsanlage im Sinne des MBSE zu ermöglichen und damit die Planung solcher Systeme zu unterstützen.
- Das **Vorgehensmodell** leitet dazu an, ein Systemmodell unter Berücksichtigung des Modellierungskonzepts aufzubauen. Es beschreibt, wie der Anwender die einzelnen Aspekte erarbeitet und modellieren kann. Dabei ist das Vorgehensmodell so aufgebaut, dass die einzelnen Schritte inhaltlich und modelltechnisch aufeinander aufbauen. Das Vorgehensmodell unterstützt die Planung und die Erweiterung einer flexiblen Produktionsanlage. Es liefert als Resultat eine entsprechende Anlagenstruktur, die mit den Mitteln des MBSE beschrieben ist.
- Um das Modellierungskonzept zur Anwendung zu bringen, ist eine entsprechende **Werkzeugunterstützung** nötig. Sie ermöglicht die rechnerinterne Repräsentation des Systemmodells und ist insb. für die Wartung und Weiterverwendung des Modells unerlässlich. Die Umsetzung des Modellierungskonzepts funktioniert auf Basis eines SysML-Profiles. Es setzt das Modellierungskonzept um, indem es die Modellierungssprache formal definiert. Dabei erweitert es die SysML um entsprechende modellierungssprachliche Elemente bzw. Stereotypen. Durch die Referenzierung des Quasi-Standards SysML wird erreicht, dass der Ansatz auf Basis des Profils praktisch mit allen SysML-Werkzeugen zur Anwendung gebracht werden kann.

Die Validierung des Ansatzes erfolgte anhand des Beispiels einer industriellen Großwäscherei. Der Abgleich mit den aus der Problemanalyse abgeleiteten Anforderungen zeigt, dass der Ansatz geeignet ist für die Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering.

Mit Blick auf Planung und Betrieb flexibler Produktionsanlagen und den Perspektiven der Industrie 4.0 besteht weiterer **Forschungsbedarf**. Im Zentrum steht das Vorantreiben des **durchgängigen Engineerings**, für das der vorliegende Ansatz einen Beitrag leistet. Gleichwohl gilt es, dieses Engineering-Paradigma auf unterschiedlichen Ebenen zu konkretisieren. Die zahlreichen beteiligten Stakeholder müssen zusammengebracht werden. Hierfür bedarf es entsprechender Kollaborationsmodelle und geeigneter Prozesse. Damit die Unternehmen Daten austauschen können, besteht auch Bedarf an der Definition von Austauschformaten, die bspw. auf der SysML aufbauen können. Nur wenn diese auch durch ein Spektrum an Softwarewerkzeugen umgesetzt werden, können sie angewandt werden. Die Durchgängigkeit bezieht sich jedoch auf den gesamten Verlauf der Entwicklungsarbeiten und der Laufzeit von Produkten. Mit dem Ziel eines digitalen Zwillings

müssen Konzepte erarbeitet werden, wie Daten verknüpft und wie solche komplexen Modelle gepflegt und bearbeitet werden. Auch in diesem Sinne stellt die Modellierung im Sinne des MBSE einen Ansatz dar.



## Abkürzungsverzeichnis

ARIS	Architektur integrierter Informations-Systeme
bdd	Block Definition Diagram
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CPS	Cyber-Physical System
CONSENS	Conceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
CPPS	Cyber-Physical Production System
CTS	Cybertronisches System
einschl.	einschließlich
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
etc.	et cetera
et al.	et alii
FAS	Funktionale Architekturen für Systeme
F&E	Forschung und Entwicklung
ggf.	gegebenenfalls
Hrsg.	Herausgeber
ibd	Internal Block Diagram
i.d.R.	in der Regel
inkl.	Inklusive
insb.	insbesondere
ITS	Intelligentes Technisches System
Kap.	Kapitel
L	Liter
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MES	Manufacturing Execution System

---

OMEGA	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -Analyse
OOSEM	Object-Oriented Systems Engineering Method
OPC	Open Platform Communications
par	Parametric Diagram
PDM	Produktdaten-management
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPR	Produkt, Prozess und Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
S.	Seite
SE	Systems Engineering
sd	Sequence Diagram
sog.	Sogenannt
SOP	Start-Of-Production
SysML	Systems Modeling Language
SysMOD	System Modeling Process
u.a.	unter anderem
u.ä.	und ähnliche
UML	Unified Modeling Language
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
xml	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

## Literaturverzeichnis

- [Aca11] ACATECH – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Acatech Position, 2011
- [AH16] ABRAMOVICI, M.; HERZOG, O. (Hrsg.): Engineering im Umfeld von Industrie 4.0 – Einschätzungen und Handlungsbedarf. Acatech Studie, Herbert Utz Verlag, München, 2016
- [AR68] AWF – AUSSCHUSS FÜR WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG E.V.; REFA – VERBAND FÜR ARBEITSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V.: Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil I – Arbeitsplanung. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, 1968
- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [ASM+15] AURICH, J.C.; STEIMER, C.; MEISSNER, H.; SCHINDLER, C.; CADET, M.; FISCHER, J.: Entwicklungsprozess für cybertronische Produktionssysteme – Modularer Prozess zur integrierten Entwicklung cybertronischer Produkte und Produktionssysteme. In: ZWF, Jahrg 110, Carl Hanser Verlag, München, 2015, S. 466 - 469
- [Ate13-ol] ATEGO: Artisan Studio. 8. Februar 2013, unter: <http://www.atego.com/products/artisan-studio/>
- [Alb94] ALBERS, A.: Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In: VDI-Berichte Nr. 1120: Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 73-105
- [Alt12] ALT, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Bau96] BAUMGARTEN, B.: Petri-Netze – Grundlagen und Anwendungen. Spektrum Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 1996
- [BB92] BREUTMANN, B.; BURKHARDT, R.: Objektorientierte Systeme – Grundlagen - Werkzeuge - Einsatz. Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [Ber51] BERTALANFFY, L. VON: General system theory: A new approach to unity of science. John Hopkins Press, 1951
- [BHP94] BÖHM, R.; FUCHS, E.; PACHER, G.: System-Entwicklung in der Wirtschafts-Informatik. Vdf Verlag, Zürich, 1994
- [Bon08] BONNEMA, G.M.: FunKey architecting – an integrated approach to system architecting using functions, key drivers and system budgets. Dissertation, University of Twente, Department of Engineering Technology, 2008
- [Bon12] BONNEMA, G.M.: Thinking Tracks for integrated Systems Design. In: Proceedings of 1<sup>st</sup> joined International Symposium on System-Integrated Intelligence, Hannover, 2012
- [Bra14] BRANDIS, J.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 325, Paderborn, 2014
- [Bro10] BROY, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch Software-Intensive Eingebettete Systeme. Springer Verlag, Berlin, 2010
- [BS88] BARAD, M.; SIPPER, D.: Flexibility in manufacturing systems – Definitions and Petri net modeling. In: International Journal of Production Research. Taylor and Francis Group, Volume 26, Issue 2, 1988

- [BSB+11] BASSI, L.; SECCHI, C.; BONFE, M.; FANTUZZI, C.: A SysML based methodology for manufacturing machinery modeling and design. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 16, no. 6, pp. 1049 - 1062, 2011
- [BSD+83] BROWNE, J.; STECKE, K.; DUBOIS, D.; SETHI, S.P.; RATHMILL, K.: Classification of the flexible manufacturing systems – Evolution towards the automated factory. University of Michigan, 1983
- [BWF12-ol] BCHENNATI, D.; WIOR, I.; FAY, A.: Teilflexibilitäten von Produktionsanlagen. 2. April 2017, unter: [https://www.hsu-hh.de/download-1.5.1.php?brick\\_id=UIX9xM7SD7fEZosz](https://www.hsu-hh.de/download-1.5.1.php?brick_id=UIX9xM7SD7fEZosz)
- [BVZ15] BITKOM, VDMA, ZVEI (Hrsg.): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Kehrberg Druck, April 2015
- [CBB15] CLOUTIER, R.; BALDWIN, C.; BONE, M.A.: Systems Engineering simplified. CRC Press, Boca Raton, USA, 2015
- [CMH+15] CADET, M.; MEISSNER, H.; HORNBERG, O.; SCHULTE, T.; STEPHAN, N.; SCHINDLER, C.; AURICH, J.C.: Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme – Grundlagen, erste Ansätze und weiteres Vorgehen. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), Stuttgart, 2015
- [Dan03] DANGELMEIER, W.: Produktion und Information – System und Modell. Springer Verlag, Berlin, 2003
- [Das17-ol] DASSAULT SYSTEMES: Internetpräsenz für die 3D Experience Plattform. Unter: <http://www.3ds.com/>, 2017
- [DBK+15] DUMITRESCU, R.; BREMER, C.; KÜHN, A.; TRÄCHTLER, A.; FRIEBEN, T.: Model-based development of products, processes and production resources - A state oriented approach for an integrated system model of objects, processes and systems. In: at Automatisierungstechnik 2015; 63(10), DE GRUYTER, Oldenbourg, 2015, pp. 844-857
- [DGK+15] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; KÜHN, A.; LUCKEY, M.; PLASS, C.; SCHNEIDER, M.; WESTERMANN, T.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Erfolgsfaktor Referenzarchitektur, 2015
- [DH02] DAENZER, W. F.; HUBER, F. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002
- [DJG12] DUMITRESCU, R.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe. In: Proceedings of 1st Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, Hannover, 2012
- [Dom07] DOMINKA, S.: Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen – von der virtuellen zur realen Inbetriebnahme. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, 2007
- [Dor12] DOROCIAC, R.: Mechatronic Modeller – Anwenderhandbuch zum Release 1.0. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2012
- [Dum10] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 286, Paderborn, 2010
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 3. aktualisierte Auflage, 2007
- [EKM17] EIGNER, M.; KOCH, W.; MUGGIO, C.: Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme – Ein PLM-unterstützter Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2017
- [Erl10] ERLACH, K.: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 2010

- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 3 – Arbeitsvorbereitung. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1997
- [Föl94] FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik - Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 1994
- [FVF+15] FAY, A., VOGEL-HEUSER, B.; FRANK, T.; ECKERT, K.; HADLICH, T.; DIEDRICH, C.: Enhancing a model-based engineering approach for distributed manufacturing automation systems with characteristics and design patterns. Journal of Systems and Software, No. 101, Elsevier, 2015, P. 221 – 235
- [FMS11] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A Practical Guide to SysML – The Systems Modeling Language. Morgan Kaufman, Waltham, 2. Auflage, 2011
- [Gab16-ol] GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Produktion. 3. Januar 2016, unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13462/produktion-v8.html>
- [Gad12] GADATSCH, A.: Grundkurs Geschäftsprozess-Management – Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 7. Auflage, 2012
- [GEA16] GAUSEIMER, J.; ECHTERFELD, J.; AMSHOFF, B.: Strategische Produkt- und Prozessplanung. In: Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. Hanser Verlag, München, 2016
- [GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): AgendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Acatech Studie, Springer-Verlag, Heidelberg, 2012
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Proceedings of the Design 2010 – 11th International Design Conference. May 17-20 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [GBS+17-ol] GRONAU, N.; BECKER, J.; SINZ, W.J. SUHL, L. LEIMEISTER, J.M. (Hrsg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online-Lexikon. Unter: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, 2017
- [GCW+13] GAUSEMEIER, J.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; DUMITRESCU, R.; TSCHIRNER, C.; STEFFEN, D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. In: 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 310, Paderborn, 2013
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Studie, Paderborn, 2013
- [GFD+08] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil2). Konstruktion, 9-2008, Fachaufsatz Mechatronik, VDI-Verlag, Berlin, 2008
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozess und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2014
- [Gri14] GRIEVES, M.: Digital Twin – Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Whitepaper, 2014
- [GS12] GLEASSGEN, E.H.; STARGEL, D.S.: The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles. In: Proceedings of 53<sup>rd</sup> Structures, Structural Dynamics and Material Conference, Honolulu, USA, 2012

- [GT12] GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H.: Produktion und Logistik. 9. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2012
- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.: Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme – Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertungsketten. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Hac89] HACKSTEIN, R.: Produktionsplanung und -steuerung – Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [Her12] HERLYN, W.: PPS im Automobilbau – Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; DE WECK, O.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S. (Hrsg.): Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell füssli Verlag, Zürich, 12. Auflage, 2012
- [IBM17-ol] INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES (IBM): Systems Engineering – Architektur und Design für die Onlinezusammenarbeit, 2016, unter: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ra/tirhaparchforsystengi>
- [IKD+13] IWANEK, P.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; NYBEN, A.: Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS. Proceedings des Tag des Systems Engineering (TdSE) 2013, Stuttgart, 2013
- [Inc15] INCOSE: Systems Engineering Handbook – A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. John Wiley and Sons, 4. Auflage, 2015
- [KA15] KADAM, S.; APTE, D.: A survey on short life cycle time series forecasting. International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEM), Volume 4, Issue 5, 2015, P. 445 - 449
- [Kag12] KAGERMANN, H.: Produkt-Service Pakete und individuelle Fertigung – Die virtuelle Welt verschmilzt mit der realen Produktion. IM – Die Fachzeitschrift für Information Management und Consulting, 4/2012, imc Verlag, Saarbrücken, 2012
- [Kai14] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 327, Paderborn, 2014
- [Kan13-ol] KANNEGIESSER: Produkte. 31. Januar 2013, unter: <http://www.kannegiesser.de/de/produkte.html>
- [Käm06] KÄMPER, S.: Grundkurs Programmieren mit Visual Basic. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2006
- [KDD+96] KLÖPPEL, B.; DAPPER, T.; DIETRICH, C.; SEEBER, R.: Objektorientierte Modellierung und Programmierung mit C++. Oldenbourg Verlag, Band 1, München, 1996
- [KDD+97] KLÖPPEL, B.; DAPPER, T.; DIETRICH, C.; SEEBER, R.: Objektorientierte Modellierung und Programmierung mit C++. Oldenbourg Verlag, Band 2, München, 1997
- [Kin05] KINKEL, S.: Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen – Wie verändern sich Variantenzahlen, Losgrößen, Materialeinsatz, Genauigkeitsanforderungen und Produktlebenszyklen tatsächlich. Mitteilungen aus der Produktinnovationserhebung, Nummer 27, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2005
- [KK13] KLEINER, S., KRAMER, C.: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. Proceedings of CIRP Design, Bochum, 2013
- [Kle07] KLEVERS, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design – Verwendung erkennen – Wertschöpfung steigern. Mi Verlag, München, 2007
- [KLL+14] KOWAL, M.; LEGAT, C.; LOREFICE, D.; PREHOFER, C.; SCHAEFER, I.; VOGEL-HEUSER, B.: Delta-Modeling for Variant-rich and evolving manufacturing Systems. Proceedings of

- MoSEMInA, 1<sup>st</sup> International Workshop on Modern Software Engineering Methods for Industrial Automation, pp. 32 – 41, India, 2014
- [KLW11a] KAGERMANN, H.; LUKAS, W.D.; WAHLSTER, W.: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution. VDI Nachrichten, Nr. 13, 1. April 2011
- [KLW11b] KORFF, A.; LAMM, J.G.; WEILLKIENS, T.: Werkzeuge für den Schmied funktionaler Architekturen. Tag des Systems Engineering, 2011
- [KNT09] KAISER, L.; NORDSIEK, D.; TERFLOTH, A.: Softwaregestützte Konzipierung komplexer mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme. In: ATZ Elektronik, GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2009
- [KPS+14] KOWAL, M.; PREHOFER, C.; SCHAEFER, I.; TRIBASTONE, M.: Model-based Development and Performance Analysis for Evolving Manufacturing Systems. At – Automatisierungstechnik, No. 61(11), De Gruyter, Oldenbourg, 2014
- [KV13] KERNSCHMIDT, K.; VOGEL-HEUSER, B.: An interdisciplinary SysML based modeling approach for analyzing change influences in production plants to support the engineering. 9<sup>th</sup> IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE), Madison, USA, 2013
- [KWH12] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. (Hrsg.): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Forschungunion Wirtschaft und Wissenschaft, Berlin, 2012
- [KWH13] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. (Hrsg.): Deutschland als Produktionsstandort sichern, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, April 2013
- [LE98] LUCZAK, H.; EVERSHEIM, W. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [LH03-ol] LI, X.; HU, H.: Objektorientierte Softwareentwicklung. 2003, unter: <http://slideplayer.org/slide/790616/>
- [LW10] LAMM, J.G.; WEILKIENS, T.: Funktionale Architekturen in SysML. Tag des Systems Engineerings (TdSE), Hamburg, 2010
- [MF10] MATTERN, F.; FLÖRKEMEIER, C.: Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. Informatik-Spektrum, 33/2/2010, Springer Verlag, Berlin, 2010, S. 107-121
- [Möh12] MÖHRINGER, S.: Systems Engineering im Mittelstand – ein flexibles Modell zur Rollenverteilung – Praxiserfahrungen aus Entwicklungsprojekten. Proceedings Tag des Systems Engineerings (TdSE), Paderborn, 2012
- [Mun16] MUNKER, F.: Ein Ansatz zur anwenderorientierten Systemmodellierung für die interdisziplinäre Produktentwicklung. Dissertation, Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [Nah09] NAHRSTEDT, H.: C++ für Ingenieure - Effizient programmieren erlernen. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [NoM17-ol] NO MAGIC: Cameo Systems Modeler. 2017, unter: <https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler.html>
- [Oes97] OESTEREICH, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung mit der Unified Modeling Language. R. Oldenbourg Verlag, München, 3. Auflage, 1997
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 304, Paderborn, 2012
- [OMG11] OMG – OBJECT MANAGEMENT GROUP: OMG Unified Modeling Language (OMG UML). Version 2.4.1, August, 2011

- [OMG16] OMG – OBJECT MANAGEMENT GROUP: OMG Meta Object Facility (OMG MOF) Core Specification. Version 2.5.1, November, 2016
- [OMG17] OMG – OBJECT MANAGEMENT GROUP: OMG Systems Modeling Language (OMG SysML). Version 1.5, Mai, 2017
- [Pap17-ol] PAPHYRUS: Papyrus Modeling Environment. 2017, Unter: <https://eclipse.org/papyrus/>
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.: Konstruktionslehre. Springer Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [PLH11] PIÉTRAC, L.; LELEVÉ, A.; HENRY, S.: On the use of SysML for Manufacturing Execution System design. Proceedings of IEEE 16th Conference on Emerging Technologie & Factory Automation (ETFA), 2011
- [Ref90] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 1990
- [Rei10] REISIG, W.: Petrinetze – Modellierungstechnik, Analyseverfahren, Fallstudien. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [Rei91] REISIG, W.: Petrinetze – Eine Einführung. Springer Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 1991
- [Pet88] PETER, G. (Hrsg.): Arbeitsschutz, Gesundheit und neue Technologien. Westdeutscher Verlag, Opladen, 1988
- [Pol18-ol] POLARSYS: PolarSys – Factsheet. 9. Januar 2018, unter: <https://www.polarsys.org/>
- [Rop09] ROPOHL, G.: Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. Universitätsverlag Karlsruhe, 3. Auflage, Karlsruhe, 2009
- [RQZ07] RUPP, R.; QUEINS, S.; ZENGLER, B.: UML 2 glasklar. Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2007
- [RSR+17] ROBMANN, J.; SCHLUSE, M.; RAST, M.; HOPPEN, M.; ATORF, L.; DUMITRESCU, R.; BREMER, C.; HILLEBRAND, M.; STERN, O.; SCHMITTER, P.: Integrierte modellbasierte Systemspezifikation und -simulation – Eine Fallstudie zur Sensorauslegung in der Raumfahrt. Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WinTeSys), Paderborn, 2017
- [Sch97] SCHALLER, R.R.: Moore’s Law – past, present and future. In: IEEE Spectrum, June 1997, pp. 53 – 59, 1997
- [Sch06] SCHÄFER, T.: Marktorientierte Produktentwicklung und optimierte Time-to-Market durch den Einsatz eines Produkt Information Management Systems (PIM) im Gerätebau. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Fachbereich Maschinenwesen, 2006
- [Sei06] SEIDLMEIER, H.: Prozessmodellierung mit ARIS – Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2006
- [SFA17] STEIMER, C.; FISCHER, J.; AURICH, J.C.: Model-based design process for the early phases of manufacturing system planning using SysML. Proceedings of 27<sup>th</sup> CIRP Design 2017, Cranfield, UK, 2017
- [She96] SHEARD, S.A.: Twelve Systems Engineering Roles. In: Proceedings of the INCOSE Sixth Annual International Symposium, Boston, USA, 1996
- [Sie17-ol] SIEMENS SOFTWARE: Systems Engineering. 2016, unter: [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/teamcenter/systems-engineering-software/](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/teamcenter/systems-engineering-software/)
- [SKH+06] SCHOLZ-REITER, B.; KOLDITZ, J.; HILDEBRANDT, T.; HÖHNS, H.: Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse in der Produktion. In: KARAGIANNIS, D.; RIEGER, B. (Hrsg.): Herausforderungen in der Wirtschaftsinformatik. Springer-Verlag, Berlin, 2006, S. 221 - 236

- [SMM+12] STIEGLER, A.; MALETZ, M.; MROTZEK, M.; WECK, T.: Generierung eines multiperspektiven Systemmodells in der automobilen Antriebsstrangentwicklung – Herausforderungen und Erfahrungen. Proceedings Tag des Systems Engineerings (TdSE), Paderborn, 2012
- [Sow99] SOWA, J.: Knowledge representation – Logical, physical, and computational Foundations. Brooks Cole Verlag, 1999
- [Spa17-ol] SPARX SYSTEMS: Enterprise Architect. 2016, unter: <http://www.sparxsystems.de/uml/neweditions/>
- [Spu79] SPUR, G.: Produktionstechnik im Wandel. Carl Hanser Verlag, München 1979
- [SS90] SETHI, A.K.; SETHI, S.P.: Flexibility in manufacturing – A survey. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1990
- [SS12a] SCHUH, G.; STICH, v.: Produktionsplanung und -steuerung 1 – Grundlagen der PPS. Springer-Verlag, Berlin, 4. Auflage, 2012
- [SS12b] SCHUH, G.; STICH, v.: Produktionsplanung und -steuerung 2 – Evolution der PPS. Springer-Verlag, Berlin, 4. Auflage, 2012
- [Sta73] STACHOWIAK, H.: Allgemeine Modelltheorie. Springer-Verlag, Wien, 1973
- [TAB+18] TRÄCHTLER, A.; ALBERS, A.A.; BREMER, C.; DUMITRESCU, R.; GRÄLER, M.; JUST, V. TSCHIRNER, C.; WANG, S.: Modellbasierter Entwurf intelligenter Systeme. In: TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Ressourceneffiziente selbstoptimierende Wäscherei – Ergebnisse des ReSerW-Projekts. Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2018
- [TK93] TEMPELMEIER, H.; KUHN, H.: Flexible Produktionssysteme – Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Springer-Verlag, Berlin, 1993
- [TRD07] TÖNSHOFF, H.K.; REINSCH, S.; DREYER, J.: Soft-Computing Algorithms as a Tool for the Planning of cyclically interlinked production lines. Production Engineering – Research and Development. Volume 1, Issue 4, WGP, Springer-Verlag, 2007, pp. 389-394
- [UP95] ULRICH, H.; PROBST, G.J.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln – Ein Brevier für Führungskräfte. Paul Haupt Verlag, Bern, 4. Auflage, 1995
- [VBT17] VOGEL-HEUSER, B.; BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 – Allgemeine Grundlagen. Band 4, 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2017
- [VDF+14] VOGEL-HEUSER, B.; DIEDRICH, C.; FAY, A.; JESCHKE, S.; KOWALEWSKI, S.; WOLLSCHLAGER, M.; GÖHNER, P.: Challenges for software engineering in automation. Journal of Software Engineering and Applications, Scientific Research, No. 7, 2014, pp. 440 - 451
- [VGW17] VAN NOTEN, J.; GADEYNE, K.; WITTERS, M.: Model-based Systems Engineering of discrete production lines using SysML: an experience report. Proceedings of CIRP Design 2017, Elsevier, 2017, pp. 157 – 162
- [Vog17-ol] VOGEL-HEUSER, B.: SysML4Mechatronics – Modellbasierte interdisziplinäre Entwicklung mechatronischer Systeme. 2017, unter: <https://www.ais.mw.tum.de/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/sfb-768/sysml4mechatronics>
- [W3C08-ol] W3C – WORLD WIDE WEB CONSORTIUM: Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition). Spezifikation, November 2008, unter: <https://www.w3.org/TR/REC-xml/>
- [War93] WARNECKE, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung. Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1993
- [Wie10] WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser-Verlag, München, 6. Auflage, 2010

- [Wie48] WIENER, N.: Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1948
- [Win16] WINTERHAGEN, J.: Wird das Fließband abgeschafft? – Die sequentielle Produktion hat das Auto bezahlbar gemacht. In der Fabrik der Zukunft, ausgestattet mit künstlicher Intelligenz, könnte es wild durcheinandergehen. F.A.S, 7. Dezember 2016, unter: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/neue-produktionsmethoden-wird-das-fließband-abgeschafft-14557403.html>
- [Wei06] WEILKIENS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML - Modellierung, Analyse, Design. dpunkt Verlag, Heidelberg, 2006
- [Wei13-ol] WEILKIENS, T.: Roles. 30. Januar 2013, unter: <http://www.sysmod.de>
- [Wes17] WESTERMANN, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 375, Paderborn, 2017
- [WFK17-ol] WFK – FORSCHUNGSINSTITUT FÜR REINIGUNGSTECHNOLOGIE: Ausbildungsmodule für Nachhaltigkeit in der Wäscherei – E-learning für Auszubildende und Mitarbeiter in Wäschereien. 19. Februar 2017, unter: <http://www.laundry-sustainability.eu/de/index.html>,
- [WWB+14] WEYRICH, M.; WIOR, I.; BCHENNATI, D.; FAY, A.: Flexibilisierung von Automatisierungssystemen - Systematisierung der Flexibilitätsanforderungen von Industrie 4.0. wt-online, 3-2014, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2014, S. 106-111
- [Zin03-ol] ZINGEL, H.: Produktlebenszyklus und strategisches Marketing - Phasenbezogene Konzepte und Methoden des Produktmanagement. unter: <http://www.eduhi.at/dl/lebenszyklus.pdf>
- [Zwi71] ZWICKY, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen – im Morphologischen Weltbild. Droemer Knaur, München, 1971

## Standards und Normen

- [DIN8580] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. DIN 8580, Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN25424] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen. DIN 25424, Beuth Verlag, Berlin, 1981
- [DIN60050] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Internationales Elektronisches Wörterbuch – Leittechnik. DIN IEC 60050, Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [ISO15288] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): System- und Software-Engineering – System-Lebenszyklus-Prozesse (Systems and software engineering — System life cycle Processes). ISO 15288, Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [ISO26262] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): Road vehicles – Functional safety. ISO 26262, British Standards Institution, London, 2016
- [ISO42010] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): System- und Software-Engineering - Architekturbeschreibung. ISO 42010, Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2803] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Funktionenanalyse – Grundlagen und Methode. VDI-Richtlinie 2803, Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 1996

- [VDI4465] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Modellierung und Simulation – Modellbildungsprozess. VDI-Richtlinie 4465, Beuth-Verlag, München, 2016



## **Anhang**

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
A1 Modelle der Industriellen Wäscherei.....	A-1
A2 Profil SysML4CONSENS.....	A-5



# A1 Modelle der Industriellen Wäscherei

## A1.1 Beschreibung der Produktionsobjekte

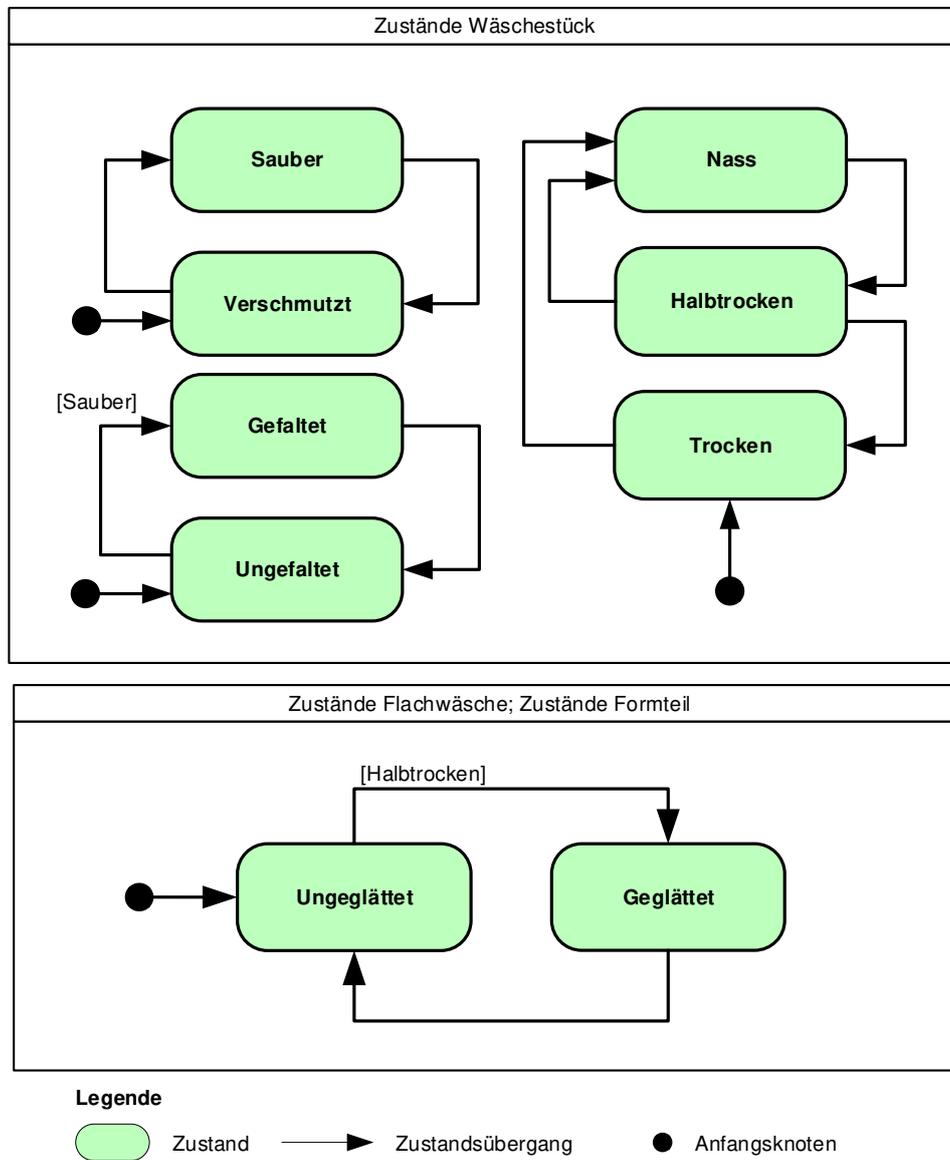


Bild A-1: Zustände der Produktionsobjekte der industriellen Wäscherei

## A1.2 Beschreibung der Prozesse

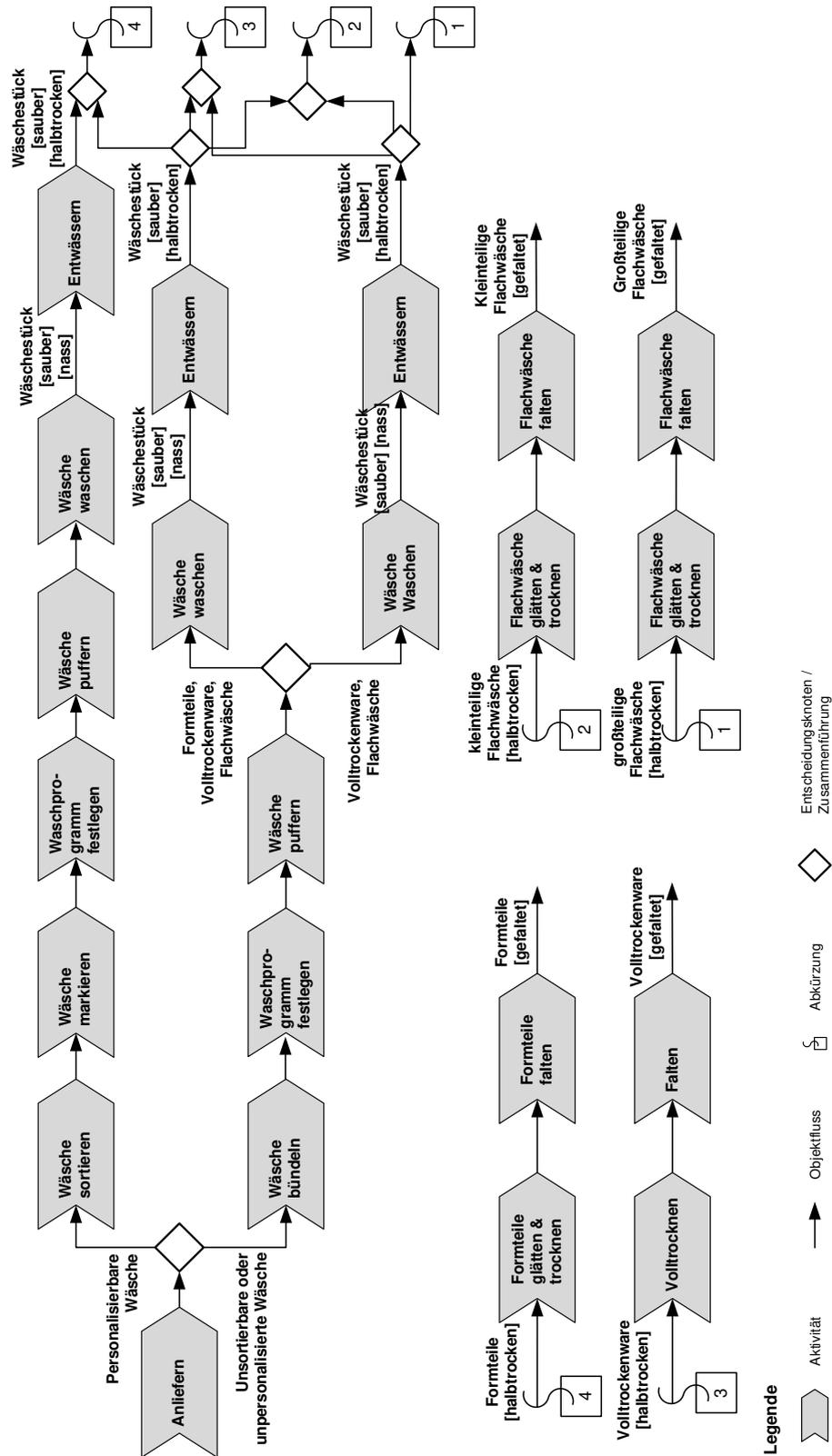


Bild A-2: Prozessmodell der Industriellen Wäscherei



### A1.4 Wirkstruktur einer Waschstraße

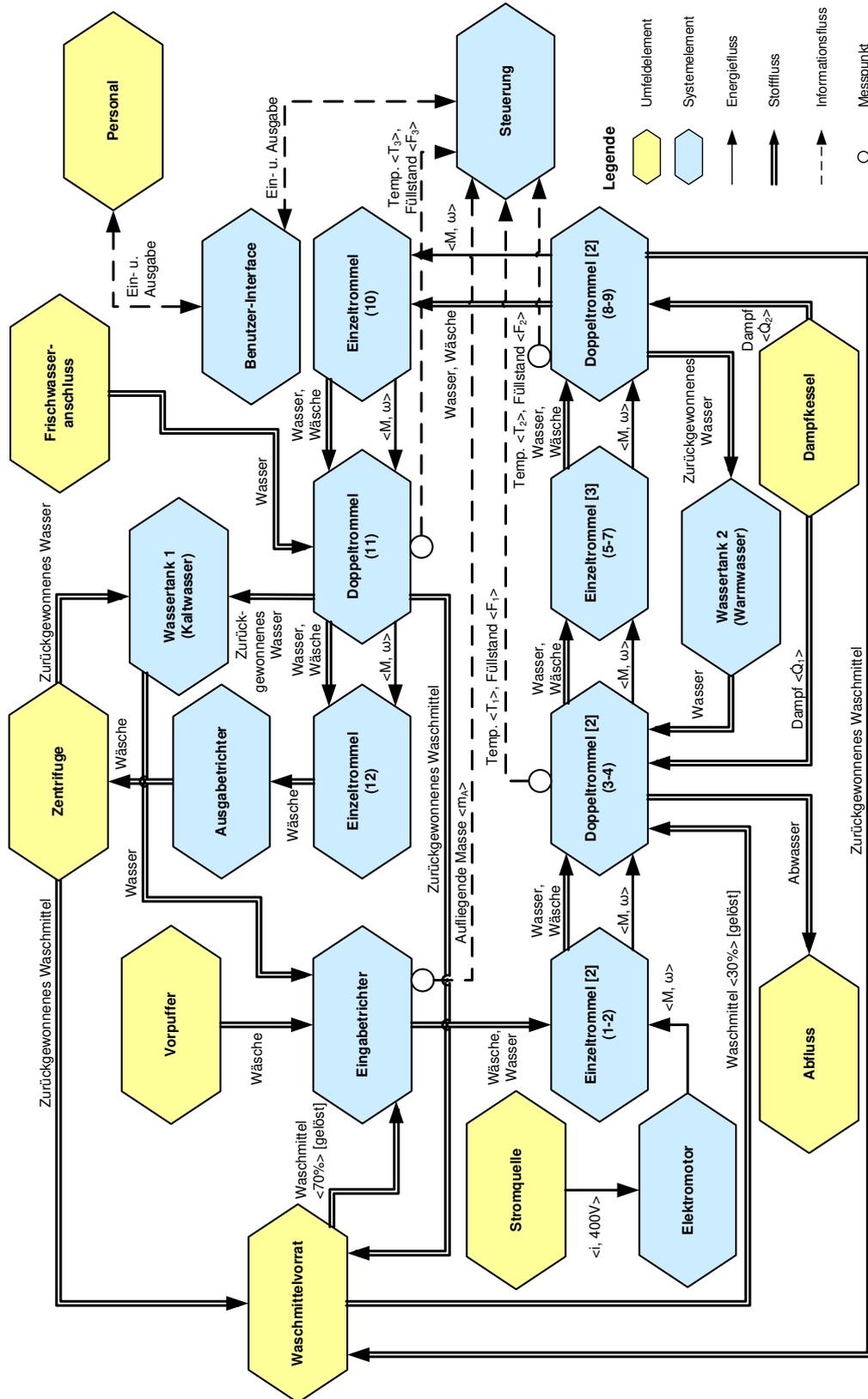
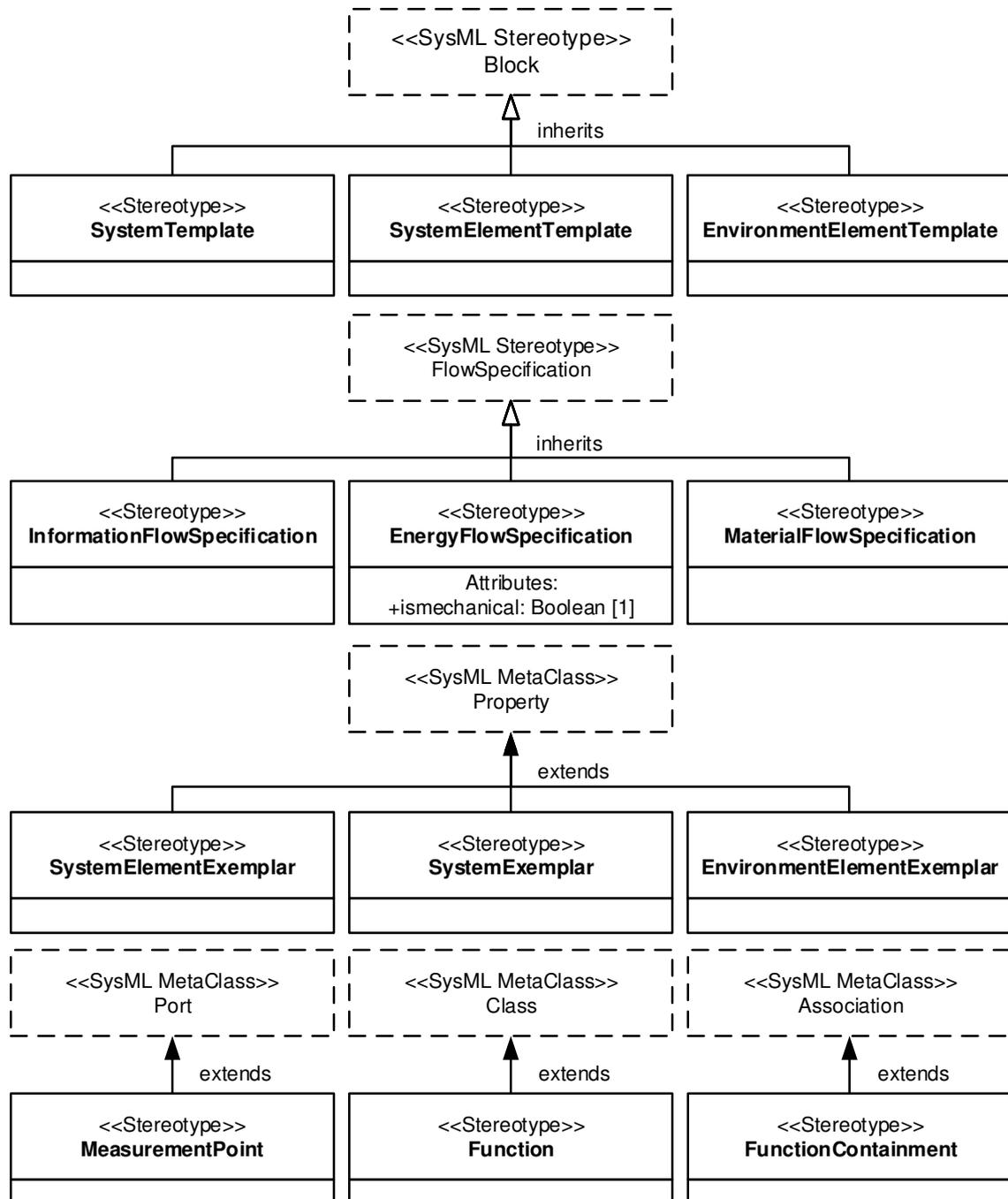


Bild A-4: Wirkstruktur einer Waschstraße

## A2 Profil SysML4CONSENS



### Legende

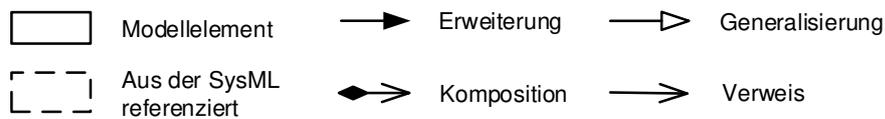
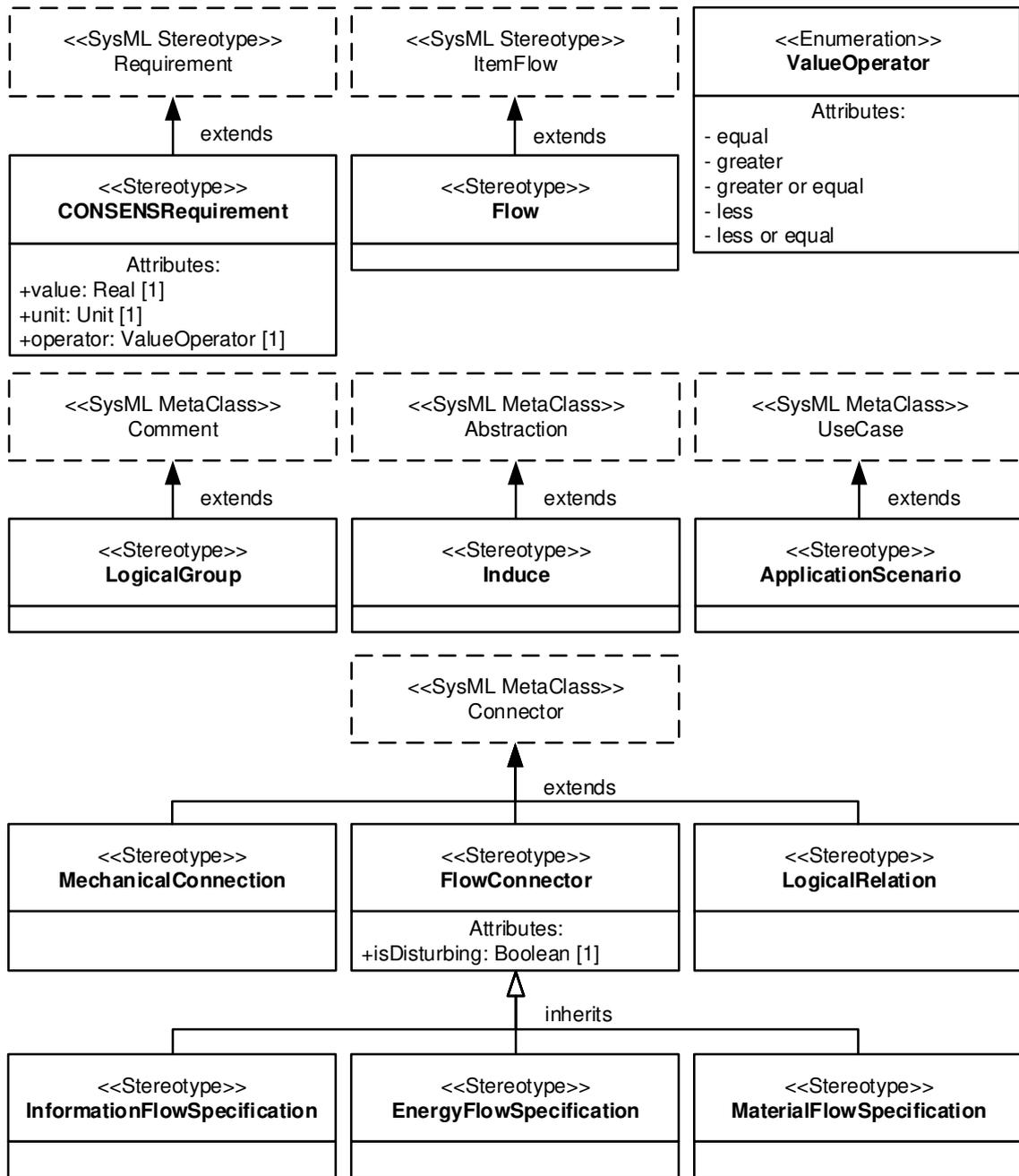


Bild A-5: SysML-Profil SysML4CONSENS (1/2)



**Legende**

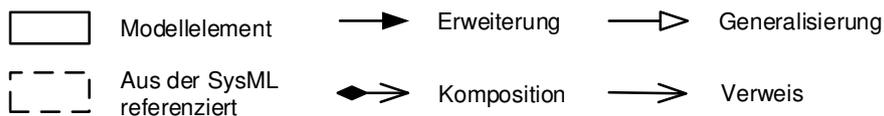


Bild A-6: SysML-Profil SysML4CONSENS (2/2)