HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen

- Anforderungen, Konzept und Umsetzungen für die Prozessindustrie -

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Sebastian Schröck, M.Sc.
aus Pforzheim

Hamburg 2016

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
	Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill
Vorsitzender:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Markus Bause
Tag der mündlichen Prüfung:	13.05.2016

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg von Mai 2012 bis Dezember 2015.

Ich möchte im Nachfolgenden all den Menschen meinen Dank aussprechen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, der diese Arbeit durch die zahlreichen Diskussionen, die Anregungen und nicht zuletzt auch durch das entgegengebrachte Vertrauen erst ermöglicht hat. Ohne die Tätigkeit am Institut und in den Forschungsprojekten wäre diese Dissertation nie entstanden.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill für das Interesse an der Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Markus Bause danke ich für den Vorsitz des Promotionsverfahrens.

Ich bedanke mich bei den ehemaligen Projektpartnern des Forschungsprojektes SPES_XT für die konstruktiven Diskussionen. Den Kollegen der Siemens AG sowie der Sick AG gilt mein Dank für die Möglichkeit, mein Konzept anhand industrieller Fallbeispiele evaluieren zu können.

Gerne blicke ich auch zurück auf die Zeit mit den ehemaligen Kollegen am Institut für Automatisierungstechnik, in der nicht nur diese Dissertation, sondern auch wichtige Freundschaften entstanden sind. Die Zusammenarbeit, der rege Austausch, aber auch das offene und freundliche Miteinander haben mir viel Freude bereitet. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Maik Riedel, Herrn Florian Zimmer sowie Herrn Dr. Frank Schumacher für die wertvollen Anregungen zu meinem Forschungsthema und die zahlreichen Gespräche bedanken. Auch allen Studenten, welche durch ihre studentischen Arbeiten zu dieser Dissertation beigetragen haben, sei an dieser Stelle gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie, die während meiner Forschungstätigkeit oft auf mich verzichten mussten. Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Schwester Elena und bei meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung und den Rückhalt bedanken. Tiefe Dankbarkeit gilt aber auch meiner Franziska, ohne deren liebevolle Unterstützung während aller Höhen und Tiefen, diese Arbeit nicht zu Stande gekommen wäre.

Leonberg, Juni 2016 Sebastian Schröck

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **VII**

GLOSSAR ..... **VIII**

KURZFASSUNG ..... **XII**

ABSTRACT ..... **XIII**

1. EINLEITUNG **1**

1.1. MOTIVATION 1
1.2. ZIELSETZUNG UND WISSENSCHAFTLICHER BEITRAG DER ARBEIT 3
1.3. STRUKTUR DER ARBEIT 4

2. ENGINEERING AUTOMATISIERTER ANLAGEN IN DER PROZESSINDUSTRIE **5**

2.1. ENGINEERING: BEGRIFFE UND DEFINITIONEN 5
2.2. VORGEHENSMODELLE FÜR DAS ENGINEERING AUTOMATISIERTER ANLAGEN 7
2.3. STRUKTURIERUNG VON ANLAGEN 9
2.4. ZWISCHENFAZIT 12

3. GRUNDLAGEN DER WIEDERVERWENDUNG IN DER ENTWICKLUNG TECHNISCHER SYSTEME **13**

3.1. STRUKTURIERUNG ALS VORAUSSETZUNG FÜR SYSTEMATISCHE WIEDERVERWENDUNG 13
3.1.1. BAUREIHEN 14
3.1.2. BAUKASTEN 14
3.1.3. MODULBAUWEISE 15
3.1.4. PLATTFORM 17
3.1.5. PRODUKTLINIEN 18
3.1.6. EINORDNUNG DER ANSÄTZE 20
3.2. GRUNDLEGENDE WIEDERVERWENDUNGSMECHANISMEN 21
3.2.1. COPY, PASTE & MODIFY 23
3.2.2. TYP-INSTANZ-KONZEPT 24
3.2.3. TEMPLATES 25
3.2.4. PATTERN 25
3.2.5. BIBLIOTHEKEN 26
3.3. VARIABILITÄT UND WIEDERVERWENDUNG 27
3.3.1. VARIABILITÄT: BEGRIFFE UND DEFINITIONEN 27
3.3.2. VARIABILITÄT IM KONTEXT DES SYSTEMS 32
3.3.3. MODELLIERUNG VON VARIABILITÄT 34
3.4. ZWISCHENFAZIT 36

4. WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE UND RESULTIERENDE ANFORDERUNGEN **37**

4.1. WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE FÜR DAS ENGINEERING AUTOMATISIERTER ANLAGEN 37
4.1.1. MULTIKRITERIELLE MODULARISIERUNG VERFAHRENSTECHNISCHER ANLAGEN NACH HADY ET AL. 37
4.1.2. WISSENSBASIERTER ANSATZ ZUR MODULBASIERTEN ERSTELLUNG VON R&I-FLIEßBILDERN NACH UZUNER ET AL. 39
4.1.3. MODULARISIERUNG IM PLANUNGSPROZESS VON ANLAGEN NACH BRAMSIEPE ET AL. 40
4.1.4. EFFIZIENTES ENGINEERING DURCH DIE MODULARISIERUNG IN PACKAGE UNITS NACH ROTTKE ET AL. 42
4.1.5. WISSENSBASIERTES ASSISTENZSYSTEM FÜR MODULARES ENGINEERING NACH OBST ET AL. 43
4.1.6. MODULARE OFFENE VERTEILTE FUNKTIONSBLOCKSYSTEME FÜR DIE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK 44

4.1.7. Adaptierbares Wiederverwendungskonzept nach Maga et al. 46
4.1.8. Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering nach Mahler 47
4.1.9. Interdisziplinärer Produktlinienansatz für Maschinen- und Anlagenbau nach Fuchs et al. . 49
4.1.10. Function Based Engineering nach Himmler et al. 50
4.2. Zusammenfassung der Wiederverwendungskonzepte 52
4.3. Anforderungsermittlung für ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept 54
4.3.1. Use-Cases für Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen 55
4.3.2. Anforderungen an interdisziplinäre systematische Wiederverwendung im Engineering 57
4.4. Überprüfung der Anforderungserfüllung bestehender Wiederverwendungskonzepte 60

5. Grundgedanken des Wiederverwendungskonzeptes 63

5.1. Trennung zwischen projektunabhängigen und projektabhängigen Tätigkeiten 63
5.2. Konsequente Funktionsorientierung über die Gewerkegrenzen 64
5.3. Explizite Modellierung von Variabilität 65
5.4. Schrittweise Integration in bestehende Prozesse 68
5.5. Zwischenfazit 68

6. Definition wiederverwendbarer Einheiten 69

6.1. Granularität der wiederverwendbaren Einheiten 69
6.2. Definition der Funktionalität wiederverwendbarer Einheiten 73
6.3. Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten 74
6.3.1. Variabilität wiederverwendbarer Einheiten im Problemraum 75
6.3.2. Variabilität wiederverwendbarer Einheiten im Lösungsraum 76
6.3.3. Relationen innerhalb wiederverwendbarer Einheiten 77
6.3.4. Konfiguration wiederverwendbarer Einheiten 79
6.4. Formales Modell und Bestandteile der wiederverwendbaren Einheiten 80

7. Projektunabhängiger Anteil des Wiederverwendungskonzeptes 82

7.1. Ermittlung der Anforderungen 83
7.2. Analyse und Bewertung der Eignung zur Wiederverwendung 86
7.3. Entwicklung der Funktionen und Funktionsstruktur 89
7.4. Entwicklung der technischen Lösung 92
7.4.1. Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten ohne bestehende Lösung 93
7.4.2. Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten basierend auf bestehenden Lösungen 95
7.5. Konsistenzprüfung wiederverwendbarer Einheiten 96
7.6. Erstellung der Dokumentation 97
7.7. Freigabe, Speicherung und Wartung der wiederverwendbaren Einheiten 99

8. Projektabhängige Konzeptbausteine des Wiederverwendungskonzeptes 102

8.1. Klärung und Aufbereitung der (Kunden-)Anforderungen 103
8.2. Funktionaler Entwurf und funktionale Konfiguration der Einheiten 104
8.3. Technischer Entwurf 106
8.4. Konsistenzprüfung konfigurierter wiederverwendbarer Einheiten 108
8.5. Unterstützung der Angebotserstellung 109

9. WERKZEUGTECHNISCHE UMSETZUNG DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES 110

9.1. VERWENDETE SOFTWARE-WERKZEUGE 110
9.2. UMSETZUNGSSZENARIO I UNTER VERWENDUNG EINES VARIANTENMANAGEMENT-WERKZEUGES 113
9.3. UMSETZUNGSSZENARIO II OHNE VERWENDUNG EINES VARIANTENMANAGEMENT-WERKZEUGES 115
9.4. ZWISCHENFAZIT 116

10. EVALUATION UND ÜBERPRÜFUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG 118

10.1. ANWENDUNG DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES 118
10.1.1. FALLBEISPIEL „MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ 118
10.1.2. FALLSTUDIE „MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ 120
10.1.3. FALLBEISPIEL „EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ 122
10.1.4. FALLSTUDIE „EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ 123
10.2. ÜBERPRÜFUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG 126

11. ZUSAMMENFASSUNG, KRITISCHE REFLEXION UND AUSBLICK 129

11.1. ZUSAMMENFASSUNG 129
11.2. KRITISCHE REFLEXION 131
11.3. AUSBLICK 133

ANHANG A: USE-CASES ZUR GEWINNUNG DER ANFORDERUNGEN 135

ANHANG B: ANFORDERUNGEN AN EIN INTERDISZIPLINÄRES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPT ... 142

ANHANG C: MERKMAL- UND ENTSCHEIDUNGSBASIERTE VARIABILITÄTSMODELLIERUNG 151

ANHANG D: ERGEBNISSE UND MODELLE DER FALLSTUDIE „MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ 153

ANHANG E: ERGEBNISSE UND MODELLE DER FALLSTUDIE „EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ 160

LITERATURVERZEICHNIS 167

LITERATUR 167
NORMEN, RICHTLINIEN UND EMPFEHLUNGEN 182
VERÖFFENTLICHUNGEN DES AUTORS 184
STUDENTISCHE ARBEITEN 185
REFERENZIERTE INTERNETQUELLEN 186
REFERENZIERTE SOFTWARE 187

LEBENSLAUF 188

Abkürzungsverzeichnis

HMI	Human Machine Interface (dt. Mensch-Maschine-Schnittstelle)
PLS	Prozessleitsystem
PCE	Process Control Engineering (dt. Prozessleittechnik)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
R&I-Fließschema	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema

Glossar

Anlage	Eine Anlage oder auch verfahrenstechnische Anlage umfasst die „für die Durchführung eines Verfahrens notwendigen Einrichtungen und Bauten“ [DIN EN ISO 10628, S. 5] und schließt Apparate und Maschinen ebenso ein, wie auch Automatisierungshardware und -software.
Anlageteil	Ausrüstungsteil einer verfahrenstechnischen Anlage, der aus technischen Einrichtungen zusammengestellt ist [DIN EN ISO 10628].
Artefakt / Engineering-Artefakt	Unter einem Artefakt werden im Rahmen dieser Arbeit „alle materiellen und immateriellen Projektergebnisse“ [VDI/VDE 3695-1, S. 3] verstanden. Hierbei kann es sich auch um Projektergebnisse vorheriger Projekte handeln, die in nachfolgenden Projekten analysiert, kopiert oder bearbeitet werden.
Baukasten	Sammlung vorgefertigter materieller oder immaterieller Bausteine, die in einem begrenzten Anwendungsbereich genutzt werden können, um technische Systeme zu realisieren [BOR61; BAU05; EKL+13].
Baureihe	Eine Baureihe besteht aus technischen Gebilden, die mindestens hinsichtlich eines Merkmales oder einer Funktion identische Ausprägungen aufweisen und mindestens bezüglich eines alternativen Merkmals systematisch abgestuft sind [KOL98; SCH05; EKL+13].
Baustein	Materieller oder immaterieller Bestandteil eines Baukastens, der nicht zwingend eine Funktion realisieren muss, aber mindestens über eine spezifizierte Schnittstelle verfügt und der Erstellung technischer Systeme dient [BOR61; BAU05; EKL+13].
Domäne	Definierter Anwendungsbereich eines technischen Systems, der sich primär durch ähnliche Stakeholder auszeichnet [CZEI05; MAG12].
Echtgerät	Technisches Produkt eines Herstellers, in der Regel mit eindeutiger Bestellnummer, das die spezifizierten Anforderungen erfüllt bzw. Funktionen realisiert, jedoch immer auch Restriktionen hinsichtlich der technischen Implementierung aufweist [SIE15B@].
Engineering-Objekt	Engineering-Objekte stellen die digitale Repräsentation aller physischen wie auch nichtphysischen Elemente dar [DIN 81346-1, S. 11], die im Rahmen des Engineering benötigt oder bearbeitet werden [SZF+15*]. Die Engineering-Objekte werden von objektorientierten Engineering-Werkzeugen verwaltet und verwendet.
Engineering-Organisation	Ingenieurbüro, Engineering-Organisationseinheit oder auch temporär zum Zwecke des Engineerings zusammenarbeitende Teams realer Personen oder Unternehmen [VDI/VDE 3695-1].
Engineering-Werkzeug	Software-Werkzeug, welches der Planung automatisierter Anlagen dient. Hierbei ist unerheblich, ob eine gewerkspezifische oder gewerke-übergreifende Nutzung erfolgt.
Entwicklungsgegenstand	Der Entwicklungsgegenstand, auch System under Development (SuD), bezeichnet das (Teil-)System, das entwickelt wird und folglich, im Gegensatz zu dessen Kontext, beeinflussbar ist [PHA+12, S. 259].

Funktion	Zweckbetonte Wirkung oder Aktivität von Objekten [AKI94, S. 25F.; DIN 81346-1, S. 12].
Funktionsstruktur	Zeigt den ggf. hierarchischen Zusammenhang zwischen den verschiedenen (Teil-)Funktionen eines Produktes [ULR95, S. 421; GÖP98, S. 75].
Grundoperation	Nach der Lehre der Verfahrenstechnik stellen die Grundoperationen die einfachsten Vorgänge bei der Durchführung eines Verfahrens [DIN EN ISO 10628] dar.
Kontext	„Der Teil der Umgebung eines Systems, der für die Definition und das Verständnis der Anforderungen des betrachteten Systems relevant ist“ [PORU11, S. 21], auch als Systemkontext bezeichnet.
Lösungsraum	Repräsentiert die implementierungsorientierte Sicht auf ein technisches System und beinhaltet alle möglichen Komponenten der Lösung sowie deren zulässige Kombinationen [CZEI99, S. 4; SRC+12, S. 478].
Merkmal	Ausgewählte Eigenschaft zur Beschreibung eines (technischen) Systems mittels Werten [MER12].
Modul	Einheit von Objekten, die eine Funktion realisiert, definierte Schnittstellen aufweist und der Optimierung von Planung, Entwicklung, Beschaffung, Fertigung, Montage und Service dienen kann [KOL98, S. 308; MIEL98; EKL+13, S. 359].
Modulare Anlage	Anlage, die aus flexibel rekonfigurierbaren Modulen besteht, welche über eine gemeinsame Infrastruktur miteinander verbunden sind [NE 148].
Plattform	An der Produktstruktur orientierte Produktarchitektur, die auf den größten gemeinsamen Nenner einer Produktfamilie ausgerichtet ist [BAU05, S. 42; EKL+13, S. 360].
Problemraum	Repräsentiert die anwendungsorientierte Sicht auf ein technisches System und beinhaltet Funktionen sowie Merkmale, mit Hilfe derer Kunden und Entwickler deren Anforderungen ausdrücken [CZEI99, S. 5; SRC+12, S. 478].
Produktarchitektur	Beschreibt den Aufbau eines Produktes durch das Zusammenwirken aus Funktionsstruktur und Produktstruktur [ULR95, S. 421; GÖP98, S. 75].
Produktfamilie	Eine Produktfamilie stellt eine lose Gruppe ähnlicher Produkte dar, ohne zwingend eine Aussage über deren Zusammenhang zu treffen. Aufgrund der häufig fälschlicherweise synonymen Verwendung zur Terminologie „Produktlinie“ (s.u.) wird der Begriff der Produktfamilie im Rahmen dieser Arbeit konzeptionell nicht aufgegriffen.

Produktlinie	Repräsentiert einen variablen Entwicklungsgegenstand, dessen Ausprägungen eine gemeinsame Menge an Eigenschaften aufweisen, mittels gezielter Variation an spezifische Anforderungen angepasst werden können, aber dennoch basierend auf eine gemeinsamen Menge an Artefakten (Modellen, Dokumenten etc.) entwickelt werden können [CLNO12, S. 14].
Produktstruktur	Repräsentiert den Aufbau eines Produktes aus dessen Komponenten sowie mögliche Relationen zwischen diesen Komponenten [ULR95, S. 421; GÖP98, S. 75].
Technische Einrichtung	Einheit technischer Apparate und Maschinen, die in der Regel der Realisierung einer Funktion geringen Umfangs dient [DIN EN 61512-1, S. 4].
Teilanlage	Teil einer verfahrenstechnischen Anlage, der zumindest zeitweise selbständig betrieben werden kann und aus Anlageteilen sowie Technischen Einrichtungen besteht [DIN EN 61512-1, S. 6; DIN EN ISO 10628].
Template / Typical	Projekt- und/oder anlagenspezifischer Standard für Funktionseinheiten. Typicals können sowohl durch Software als auch durch Hardware realisiert werden [NA 35, S. 30].
Variabilität	Flexibilität, die in einem System vorgesehen wird, um dieses während der Entwicklung oder aber auch während der Laufzeit anzupassen. Im Fokus dieser Arbeit liegt die Variabilität während der Entwicklung [PBL05].
Variabilitätsobjekt	Konkrete Variation eines Variabilitätssubjektes [PBL05, S. 60].
Variabilitätssubjekt	Variables Element in der realen Welt oder aber eine variable Eigenschaft dessen [PBL05, S. 60].
Variante	Repräsentation eines Variabilitätsobjektes bzw. die Ausprägung einer Produktlinie, die wesentliche Merkmale technischer, funktionaler oder struktureller Art der Produktlinie übernimmt, sich jedoch in mindestens einer Eigenschaft und/oder Merkmalsausprägung von den anderen Ausprägungen der Produktlinie unterscheidet. Dabei ist unerlässlich, ob es sich um ein physisches oder nichtphysisches Produkt, einen Teil dessen oder um Planungsartefakte handelt [PBL05, S. 62; DEL06, S. 47].
Variantenmanagement	Alle planenden und steuernden Tätigkeiten, welche die Variabilität eines Systems während der Entwicklung oder der Laufzeit, beeinflussen [BFG+02].
Variationspunkt	Repräsentation eines Variabilitätssubjektes in Modellen sowie für die Variabilität relevante Kontextinformationen [PBL05, S. 62].
Verfahren	Ablauf von chemischen, physikalischen oder biologischen Vorgängen zur Gewinnung, Transport oder Lagerung von Stoffen oder Energie [DIN EN ISO 10628].
Verfahrensabschnitt	Teil eines Verfahrens, der in sich überwiegend geschlossen ist. Er umfasst eine oder mehrere Grundoperationen [DIN EN ISO 10628].

Version	Alternative Ausprägung eines Produktes bzw. einer Produktfamilie, die im Gegensatz zu einer Variante dadurch gekennzeichnet ist, dass sie im gleichen Zustand (z.B. „zur Fertigung freigegeben“) nicht zum selben Zeitpunkt existieren kann [PBL05, S. 65].
Wiederverwendbare Einheit	Systematisch entwickelte und für die Wiederverwendung aufbereitete Einheit, die aus wiederverwendbaren Artefakten besteht, Variabilität beinhalten kann und disziplinenübergreifende ebenso wie disziplinspezifische Inhalte enthalten kann.

Ergänzungen des Autors in wörtlichen Zitaten sind durch eckige Klammern [<Ergänzung>] gekennzeichnet.

Objekte der Formalisierten Prozessbeschreibung nach [VDI/VDE 3682-1] werden *kursiv* dargestellt.

Kurzfassung

Das Engineering automatisierter Anlagen ist geprägt von der Zusammenarbeit verschiedener Gewerke, die fertigungstechnische oder prozesstechnische Anlagen kollaborativ planen, errichten und in Betrieb nehmen. Aufgrund der hohen Anforderungen hinsichtlich Zeit, Qualität und Kosten wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Ansätzen entwickelt, die thematisieren, wie mittels Wiederverwendung der Aufwand des Engineerings reduziert werden kann. Während im Bereich der Produktentwicklung oder des Software-Engineerings systematische und teils auch interdisziplinäre Ansätze durchaus verbreitet sind, ist dies im Engineering automatisierter Anlagen bisher nicht der Fall. Hier ist Wiederverwendung entweder durch die feingranulare Wiederverwendung einzelner Lösungsbestandteile oder das unsystematische Kopieren ganzer Lösungen oder Lösungsbestandteile geprägt. Aufgrund dieser defizitären Situation verfolgt die vorliegende Arbeit den Ansatz, bestehende Wiederverwendungskonzepte verschiedener Gewerke aufzugreifen, um in einem übergreifenden Konzept systematische interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen zu ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt nach einer Einführung in die Herausforderungen des Engineerings im Allgemeinen die Grundlagen der Wiederverwendung. Diese Grundlagen umfassen Ansätze der Strukturierung von Systemen als zwingende Voraussetzung der systematischen Wiederverwendung ebenso wie die grundlegenden Mechanismen der Wiederverwendung und Variabilität. Die Wiederverwendungskonzepte für das Engineering automatisierter Anlagen im Speziellen werden unter Bezugnahme auf die Grundlagen beschrieben und analysiert. Dabei werden sowohl Konzepte welche auf spezifische Gewerke fokussiert sind als auch übergreifende Konzepte angeführt. Anhand dieser Analyse, ergänzender aktueller Literatur, wie auch der Normung werden systematisch Anforderungen für ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept abgeleitet. Die Anforderungen betreffen das methodische Vorgehen, die wiederzuverwendenden Artefakte, die Organisation wie auch die Engineering-Werkzeuge und dienen folglich als Basis für die Erarbeitung des Wiederverwendungskonzeptes. Dieses Konzept differenziert zwischen der systematischen, projektunabhängigen Entwicklung der variablen wiederverwendbaren Artefakte und deren Anwendung im Engineering automatisierter Anlagen. Die funktionsorientierte Entwicklung der wiederverwendbaren Artefakte wird unterstützt von Ansätzen zur qualitativen Bewertung der Wiederverwendbarkeit, zur expliziten Modellierung der Variabilität oder auch zur Konsistenzprüfung der Einheiten. Der projektabhängige Anteil besteht aus weitestgehend unabhängigen Konzeptbausteinen, um die Anwendbarkeit in verschiedenen, spezifischen Vorgehen des Engineerings zu gewährleisten.

Die Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes wird anhand zweier verschiedener Engineering-Werkzeuge erprobt, die darüber hinaus mit einem Variantenmanagement-Werkzeug kombiniert werden. Das Konzept wird anhand einer Meerwasserentsalzungsanlage sowie eines extraktiven Gasanalysators evaluiert und somit die Anwendbarkeit des Konzeptes nachgewiesen. Die gewonnenen Anforderungen werden genutzt, um die Vorteilhaftigkeit des Wiederverwendungskonzeptes gegenüber den bereits bestehenden Konzepten zu belegen.

Abstract

The engineering of automated plants is characterised by the cooperation of different disciplines that are collaboratively planning, building and commissioning manufacturing or process plants. Due to strict requirements regarding time, cost and quality, a variety of approaches has been developed in recent years, aiming to reduce the effort of engineering by reuse. While systematic approaches of reuse can be considered as common in the field of software engineering or product development, the engineering of automated plants shows a different picture. Here reuse is characterized either by the reuse of fine-grained components or the unsystematic copying of entire or partial solutions. Because of this disadvantageous situation, this thesis is focused on combining existing approaches of different disciplines in order to allow reuse-based engineering of automated plants in an interdisciplinary and systematic manner.

After an introduction to the challenges of engineering, the thesis explains the general basics of reuse. This includes basics for structuring systems as a mandatory requirement of the systematic reuse as well as mechanisms of reuse and variability itself. The reuse approaches for the engineering of automated plants are described and analysed with reference to the aforementioned basics of reuse. This description includes both, approaches focused on specific disciplines and interdisciplinary concepts. Based on this analysis, current literature and standards, requirements for an interdisciplinary reuse concept are derived systematically. These requirements cover the methodology, the reusable artefacts, the organization as well as the engineering tools and therefore serve as the foundation for the development of the interdisciplinary reuse concept. This concept is separated in two almost independent parts: the project-independent development of variable reusable artefacts on one side and the application of these artefacts during the engineering of the automated plant on the other side. The function-oriented development of reusable artefacts is supported by approaches for qualitative assessment of reusability, explicit variability modelling approaches as well as a consistency check for variable artefacts. The project-dependent part consists of largely independent conceptual building blocks in order to ensure the applicability within various specific approaches of engineering.

The reuse concept is implemented by using two different alternative engineering tools, which are moreover combined with a variant management tool. To assess the applicability of the concept, it is evaluated by two different industrial examples: a seawater desalination plant as well as an extractive gas analyser. The developed requirements are used to verify the advantages of the reuse concept compared to other existing concepts.

1. Einleitung

If you want to go fast, go alone.
If you want to go far, go together.
Afrikanisches Sprichwort

1.1. Motivation

Automatisierte Anlagen der Prozessindustrie dienen der Realisierung eines Verfahrens zum Zwecke der zielgerichteten Umwandlung von Rohstoffen in (Zwischen-)Produkte definierter Spezifikation und Qualität. Dabei kann es sich sowohl um Produkte der Grundstoffindustrie, der chemischen und pharmazeutischen Industrie wie auch der Nahrungsmittelindustrie handeln [HEL03]. Jedoch unterscheiden sich diese Produkte erheblich hinsichtlich ihrer Produktionsmenge und Produktdifferenzierung [LIE13, S. 57FF.]. Während die jährlichen Absatzmengen von Basischemikalien, wie beispielsweise Chlor, Ammoniak oder Ethylen, aufgrund der breiten Anwendung als Zwischenprodukte allein in Deutschland im Bereich mehrerer Millionen Tonnen liegen [VCI14@], existieren auch Feinchemikalien, die nur in sehr geringen Mengen und im Falle der Spezialchemikalien auch gemäß individueller Spezifikation hergestellt werden. Im Bereich der Spezialchemikalien wird mittels modularer Anlagen das Ziel verfolgt, die Zeit zwischen der Entwicklung des Produktes und der Inbetriebnahme der Anlage zu reduzieren [NE 148; HOF+14], wobei dieser Ansatz hinsichtlich möglicher Durchsatzmengen deutliche Restriktionen aufweist und folglich für Basischemikalien ungeeignet scheint.

Unabhängig von der Absatzmenge des Produktes steht die spezifikationsgerechte Herstellung des Produktes im Interesse desjenigen, der Planung, Realisierung und Inbetriebnahme einer Anlage in Auftrag gibt. Folglich werden Innovationen im Bereich der Anlagen meist durch Produktinnovationen ausgelöst, welche ein neues Verfahren erforderlich machen, wozu dann wiederum eine neuartige Anlage nötig sein kann. Daraus folgt, dass Engineering-Organisationen selten Innovationen selbst initiieren, sondern in der Regel die Umsetzung der Anforderungen des Anlagenbetreibers unter großem Zeitdruck ermöglichen müssen. Darüber hinaus verhindert dieses Geschäftsmodell die Umsetzung strategischer Planungsmethoden, wie sie aus anderen Industrien bekannt sind [GRS+15].

Aufgrund des großen räumlichen wie auch technischen Umfangs automatisierter Anlagen wird das Engineering meist von zahlreichen Gewerken, wie beispielsweise der Verfahrenstechnik, Elektrotechnik, oder Automatisierungstechnik, durchgeführt. Die Gewerke bearbeiten und realisieren begrenzte Aufgabenpakete, die entsprechend der gewerkspezifischen Kompetenzen definiert bzw. gestaltet sind [FAY09]. Die zumeist unterschiedliche Zuordnung der Gewerke zu Unternehmen oder Unternehmensabteilungen im Rahmen eines Engineeringprojekts führt dazu, dass jedes Gewerk die zeit- und aufwandsoptimierte Durchführung des eigenen Aufgabenpaketes anstrebt, nicht aber zwingend die Optimierung des übergeordneten Anlagenengineerings berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund entstand eine Vielzahl wissenschaftlicher Ansätze wie beispielsweise zur beschleunigten Erstellung von R&I-Fließschemas [UZU13], der Optimierung der Apparateplanung durch Package-Units [RGF+12] oder der bestmöglichen Verwaltung von automatisierungstechnischen Softwarefunktionen [WAEP15]. All diese Ansätze haben das Ziel, gewerkspezifische Engineering-Tätigkeiten zu erleichtern oder zu beschleunigen. Gewerkeübergreifende Ansätze, die beispielsweise der systematischen

Wiederverwendung ganzer Anlageteile dienen, sind bisher nicht etabliert. Sie beschränken sich in der Praxis auf unsystematisches Kopieren und Anpassen von Teilen vergangener Projekte [KVF04; VFS+15, S. 22F.]. Da die herangezogene Vorlage keiner Qualitätskontrolle unterliegt und der Bezug meist unzureichend dokumentiert wird, können sich negative Auswirkungen auf die Qualität der Anlage ergeben [MAG12, S. 26; MAH14; VFS+15, S. 22]. Das Engineering automatisierter Anlagen ist somit bisher gekennzeichnet durch eine erfahrungsgetriebene und unsystematische Vorgehensweise oder funktional sehr begrenzte Wiederverwendung. Die bisherigen Ansätze schöpfen vorhandene Potentiale der Wiederverwendung hinsichtlich der Aufwands- und Risikoreduktion nicht vollständig aus. Ein gesteigerter Wiederverwendungsgrad würde zu einer schnelleren Projektabwicklung sowie einem geringeren Risiko führen [ENG06, S. 13]. Um dies zu ermöglichen, unterstreichen [GEI14@] wie auch [BIT15@] den Bedarf hinsichtlich eines gesteigerten Wiederverwendungsgrades bzw. einer Weiterentwicklung von Modularisierungs- und Standardisierungsstrategien im Engineering.

Ein Vergleich des Engineerings automatisierter Anlagen mit den Ansätzen und Konzepten anderer Industriezweige, wie beispielsweise der Entwicklung und Herstellung von Kraftfahrzeugen, ergibt, dass bei Letztgenannten bereits Ansätze existieren, die Herausforderungen eines systematischen, interdisziplinären Vorgehens adressieren [GMM+13*, S. 256]. Die kundenindividuelle Konfiguration und automatisierte Fertigung ganzer Kraftfahrzeuge ist hierbei nur ein Beispiel [GRÄ04]. Trotz oder gerade wegen dieses konzeptionellen Defizits im Engineering, fordern die Befragten in [LSS+14] mittelfristig einen gewerkeübergreifenden Entwurf für die Anlagenautomatisierung, der langfristig eine Möglichkeit zur Handhabung von variablen Entwicklungsartefakten bietet. Zieht man darüber hinaus in Betracht, dass Anlagen gleichen Typs zwar niemals identisch, häufig jedoch sehr ähnlich sind, erscheint es sinnvoll, die Ansätze anderer Domänen und Wissenschaftsgebiete hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Engineering automatisierter Anlagen zu untersuchen. So variieren beispielsweise kundenindividuelle Kraftfahrzeuge meist hinsichtlich deren Nebenfunktionen, Gestaltungsmerkmalen oder technischer Realisierung, wohingegen diese in der Regel identische Hauptfunktionen aufweisen. Die höchst unterschiedlichen Absatzzahlen von automatisierten Anlagen und Kraftfahrzeugen führen aber dazu, dass eine Anwendbarkeit dieser Ansätze im Engineering automatisierter Anlagen nicht ohne weiteres möglich ist [GMM+13*, S. 256]. Gelingt es allerdings, gemeinsame Anteile mehrerer Anlagen zu identifizieren und somit von denjenigen Teilen zu differenzieren, welche gegebenenfalls innovative Funktionen bzw. Verfahrensabschnitte realisieren, wird die Möglichkeit geschaffen, eine gewerkeübergreifende systematische Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen zu etablieren. Gemäß des einleitenden Sprichworts birgt ein solcher gewerkeübergreifender Ansatz die Chance, im Engineering als Ganzes mehr Potentiale auszuschöpfen als es die verschiedenen, auf die Geschwindigkeit einzelner Gewerke fokussierten Ansätze vermögen.

1.2. Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit

Wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, existieren verschiedene Ansätze der Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen, die das Wiederverwendungspotential bisher jedoch nicht gänzlich ausschöpfen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, bestehende Konzepte zu analysieren und basierend darauf ein Wiederverwendungskonzept zu erarbeiten, welches die systematische gewerkeübergreifende Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen ermöglicht.

Die beschriebenen und analysierten Wiederverwendungskonzepte, die das Engineering automatisierter Anlagen thematisieren, entstammen nicht nur der Automatisierungstechnik, sondern insbesondere auch der Automatisierungstechnik vorgelagerten Gewerken. Die Analyse dieser teils gewerkspezifischen, teils gewerkeübergreifenden Konzepte mündet in Use-Cases und Anforderungen, die herangezogen werden, um ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept zu spezifizieren, welches den Herausforderungen des Engineerings genügt. Die Nachvollziehbarkeit der Use-Cases und Anforderungen führt dazu, dass auch andere Autoren diese nutzen können. Folglich ist diese Anforderungsbasis das erste wichtige Ergebnis dieser Arbeit.

Das interdisziplinäre Wiederverwendungskonzept soll nicht von Grund auf neu erfunden, sondern unter Bezugnahme auf bestehende und bestenfalls etablierte Ansätze entwickelt werden, um vorhandenes Wissen zu nutzen, aber auch die Akzeptanz der Anwender sicherzustellen. Dabei gilt es, die bereits in [JGJ97] identifizierten, jedoch auch heute noch gültigen Hürden der Wiederverwendung zu meistern. Genannt werden hier eine mangelnde Beschreibung, ein mangelndes Vorhandensein oder eine mangelnde Flexibilität der wiederverwendbaren Artefakte sowie eine ungenügende werkzeugtechnische Unterstützung der Wiederverwendung [JGJ97, S. 8]. Um diese Hürden zu überwinden, werden Konzepte aus anderen Wissenschaftsgebieten wie der Produktentwicklung oder auch dem Software-Engineering herangezogen. Hinsichtlich des BMW-Prinzips [SCH99, S. 18FF.] liefert die vorliegende Arbeit so einen Beitrag zum Themengebiet *Methode*, indem ein systematisches Vorgehen beschrieben wird. Ein Beitrag hinsichtlich der *Beschreibungsmittel* wird erreicht, indem die Variabilität innerhalb wiederverwendbarer Einheiten explizit modelliert wird und zudem auch implizites Wissen der Entwickler dokumentiert werden kann. Die abschließend vorgestellten Umsetzungsszenarien repräsentieren eine *Werkzeugunterstützung* (nach [SCH99] auch „*Realisierungsmittel*“), die sicherstellt, dass eine Umsetzung des Konzeptes in verschiedenen Engineering-Werkzeugen möglich ist.

1.3. Struktur der Arbeit

Dem einleitenden Kapitel 1 folgend wird in Kapitel 2 eine allgemeine Beschreibung des Engineerings vorgenommen. Kapitel 2 umfasst, neben der Klärung der zentralen Terminologie, auch gängige Vorgehensmodelle und Strukturierungsansätze für automatisierte Anlagen. Das darauffolgende Kapitel 3 erläutert grundlegende Aspekte der Wiederverwendung technischer Systeme im Allgemeinen. Folglich umfasst dieses Kapitel zum einen wiederverwendungsspezifische Strukturierungsansätze verschiedener Domänen. Zum anderen werden Wiederverwendungsmechanismen erläutert und hinsichtlich deren Charakteristika klassifiziert. Abgeschlossen wird Kapitel 3 mit einer ausführlichen Abhandlung hinsichtlich der Variabilität in technischen Systemen sowie der damit einhergehenden Terminologie. Diese Schilderung dient als Basis der Beschreibung und Bewertung der Wiederverwendungskonzepte, die in Kapitel 4 dokumentiert sind, um den aktuellen Stand der Forschung zu reflektieren. Auf Basis dieser bestehenden Wiederverwendungskonzepte sowie weiterer Literatur werden Anforderungen für ein interdisziplinäres systematisches Wiederverwendungskonzept für das Engineering automatisierter Anlagen herausgearbeitet. Kapitel 4 schließt mit einer Überprüfung der Anforderungserfüllung bestehender Ansätze.

Der konzeptionelle Teil der Arbeit wird durch Kapitel 5 eingeleitet. Dort werden die vier zentralen Grundgedanken des erarbeiteten Wiederverwendungskonzeptes erläutert. Kapitel 6 spezifiziert die wiederverwendbaren Einheiten, einschließlich der Definition der Granularität, der Funktionalität, wie auch der Variabilität. Eine ausführliche Beschreibung der systematischen Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten im projektunabhängigen Teil des Wiederverwendungskonzeptes ist Kapitel 7 zu entnehmen. Die projektabhängige Anwendung der Einheiten im Rahmen des Engineerings wird in Kapitel 8 beschrieben. Hier werden Konzeptbausteine anstelle eines Vorgehensmodells für das Engineering verwendet, um die Anwendbarkeit des Konzeptes innerhalb verschiedener Vorgehensmodelle sicherzustellen.

Basierend auf den konzeptionellen Kapiteln thematisiert Kapitel 9 die werkzeugtechnische Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes anhand zweier Umsetzungsszenarien. Dabei werden jeweils zwei alternative Engineering-Werkzeuge herangezogen. Umsetzungsszenario I umfasst die Ergänzung des jeweiligen Engineering-Werkzeugs durch ein gesondertes Variantenmanagement-Werkzeug, wohingegen Umsetzungsszenario II auf der originären Funktionalität des jeweiligen Engineering-Werkzeugs basiert.

In Kapitel 10 wird mittels zweier industrieller Fallbeispiele die Anwendbarkeit des Wiederverwendungskonzeptes belegt. Die Anwendung des Konzeptes anhand der Fallbeispiele erfolgt in zwei Fallstudien, die jeweils inklusive der erstellten Ergebnisse und Modelle ausführlich beschrieben werden. Das Kapitel mündet in eine Bewertung der Anforderungserfüllung in Relation zu den Wiederverwendungskonzepten, welche in Kapitel 4 beschrieben sind.

Die Arbeit schließt in Kapitel 11 mit einer Zusammenfassung, einer kritischen Reflektion sowie einem Ausblick, der mögliche Weiterentwicklungen des vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes und darüberhinausgehende Forschungsfragen skizziert.

2. Engineering automatisierter Anlagen in der Prozessindustrie

Das Engineering automatisierter Anlagen ist geprägt durch die Vielzahl der involvierten Gewerke, die in Projekten zusammenarbeiten, um eine automatisierte Anlage zu planen, zu realisieren und in Betrieb zu nehmen [FAY09]. Nachfolgend werden die wichtigsten Begriffe und Charakteristika des Engineerings vorgestellt, sowie die verschiedenen Vorgehensmodelle und Strukturierungsansätze dargelegt.

2.1. Engineering: Begriffe und Definitionen

Die zuvor erläuterte Vielfalt des Engineerings und die daraus resultierende Vielfalt an involvierten Akteuren führen dazu, dass Begriffe im Kontext verschiedener Gewerke unterschiedlich geprägt werden. Darum werden nachfolgend die grundlegenden Begriffe im Kontext der vorliegenden Arbeit erläutert und damit die Terminologie definiert.

Automatisierte Anlage: Bei einer automatisierten Anlage (oder auch automatisierten Produktionsanlage) handelt es sich um eine „Zusammenstellung von Ausrüstungen, die einen oder mehrere Rohstoffe umwandeln, trennen oder miteinander reagieren lässt, um Zwischen- oder Endprodukte zu produzieren“ [DIN EN 62264-1, S. 10]. Alternative Definitionen, wie beispielsweise für Anlagen der Chargenproduktion [DIN EN 61512-1], widersprechen dieser Definition nicht, sondern präzisieren diese für das jeweilige Anwendungsfeld. Demnach wird eine Anlage beschrieben als „eine logische Gruppierung von Einrichtungen, die die zur Herstellung einer oder mehrerer Chargen benötigten Einrichtungen beinhaltet“ [DIN EN 61512-1, S. 5]. Eine ergänzende Definition dahingehend ist, dass „in verfahrenstechnischen Anlagen (…) Ausgangsstoffe (Edukte) in vertriebsfähige Produkte“ [HEL03, S. 1] umgewandelt werden. Dabei ist nicht entscheidend, welchen Aggregatzustand die gehandhabten Stoffe aufweisen oder ob es sich dabei um End- oder Zwischenprodukte handelt [HEL03]. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe Produktionsanlage und Anlage synonym für eine verfahrenstechnische Anlage der Prozessindustrie verwendet. Diese Konvention ist nötig, da sich das Engineering einer verfahrenstechnischen Anlage vom Engineering einer fertigungstechnischen Anlage hinsichtlich des Vorgehens, der verwendeten Dokumente und Werkzeuge unterscheidet [HEL03].

Engineering: Der Begriff des Engineering wurde bereits im Jahre 1941 vom *Engineers‘ Council for Professional Development* wie folgt definiert: „*The creative application of scientific principles to design or develop structures, machines, apparatus, or manufacturing processes; or works utilizing them singly or in combination; or to construct or operate the same with full cognizance of their design; or to forecast their behavior under specific operating conditions; all as respects an intended function, economics of operation and safety to life and property*.“ [ECPD41]. Auch [FAY09] bezieht sich auf dieses Zitat und stellt heraus, dass die Terminologie „Engineering“ im aktuellen Sprachgebrauch dort herangezogen wird, wo die Begriffe „‚entwerfen‘, ‚entwickeln‘, ‚erfinden‘“ [FAY09, S. 43] nicht genügen, um die Tätigkeit eines Ingenieurs zu beschreiben, da diese die wissenschaftlichen aber auch gesellschaftlichen Aspekte der Ingenieurstätigkeit nicht angemessen wiedergeben.

Bezogen auf das Anlagengeschäft definiert [BRSC15] das Engineering als „alle Vorgänge und Schritte, die erforderlich sind, um von einer ersten Prozessidee zu einer fertigen Prozessanlage“ [BRSC15, S. 632] zu gelangen. Dabei geht das Engineering einer automatisierten Anlage über die planungsbezogenen Tätigkeiten hinaus und umfasst folglich die Phasen der Grundlagenermittlung, Grob- wie auch Detailplanung, Beschaffung, Montage und Inbetriebnahme aber auch begleitende Tätigkeiten wie die

Kosten- und Terminverfolgung [STR02, S. 577FF.]. Tätigkeiten nach der Inbetriebnahme, wie die „Überprüfung, Optimierung, Erweiterung und Modernisierung“ [FAY09, S. 41; VDI/VDE 3695-1, S. 5], oder auch der Rückbau [WESC08, S. 15], werden analog zu der in [SCH08] angeführten Terminologie „Anlagen-Engineering“ [SCH08, S. 4FF.] oder dem engen Verständnis des Engineerings nach [TAU13, S. 47] im Rahmen dieser Arbeit nicht unter dem Begriff Engineering subsummiert.[1] Verschiedene Vorgehensmodelle für das Engineering werden nachfolgend (in Kapitel 2.2) beleuchtet.

Der hohe Aufwand eines Engineering-Projektes oder fehlende gewerkspezifische Kompetenzen eines einzelnen Unternehmens können dazu führen, dass das Engineering nicht von einem Unternehmen getragen werden kann, sodass es zu projektbezogenen Zusammenschlüssen kommt. Meist werden die Arbeitspakete innerhalb dieser Projekte an spezialisierte Unternehmen vergeben. Ein Unternehmen oder auch ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen, die gemeinsam das Engineering einer Anlage leisten, wird nachfolgend in Anlehnung an [VDI/VDE 3695-1, S. 2] als „Engineering-Organisation“ bezeichnet. Diese Definition umfasst bewusst keine organisatorischen, wirtschaftlichen oder ortsbezogenen Charakteristika, um die generelle Anwendbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit sicherzustellen.

Fachdisziplinen / Gewerke: Die zuvor erläuterte Vielfalt hinsichtlich möglicher automatisierter Anlagen sowie die umfassende Sichtweise des Engineerings haben zur Folge, dass eine große Zahl teils hochspezialisierter Fachdisziplinen am Anlagenentstehungsprozess beteiligt sind [UZU13, S. 53FF.]. Nachfolgend werden die Bezeichnungen Fachdisziplin und Gewerk synonym verwendet. Je nach Anlagentyp variiert jedoch die Zusammenstellung dieser Fachdisziplinen, da beispielsweise für eine Raffinerie andere Fähigkeiten und folglich Fachdisziplinen (z.B. Petrochemie) benötigt werden als dies beispielsweise bei einer Transporteinrichtung der Logistik-Branche der Fall ist, bei der Kompetenzen hinsichtlich der Förderung von Stückgütern erforderlich sind. Folglich dokumentieren verschiedene Quellen auch abweichende Beispiele für typische, am Engineering beteiligte Fachdisziplinen. So führt [STR02, S. 589] aus Sicht der Automatisierungstechnik die Fachdisziplinen Prozesstechnik, Anlagentechnik, Sicherheitstechnik, Bautechnik, Elektrotechnik, aber auch den Anlagenbetreiber an. Aus Sicht der Verfahrenstechnik werden in [HEL03] die Fachdisziplinen Chemische / Thermische / Mechanische / Biologische Verfahrenstechnik, Apparate- und Rohrleitungsbau, Werkstofftechnik, E/MSR-Technik (Elektrotechnik, Messtechnik, Leittechnik), Aufstellungs- und Gebäudeplanung sowie Erd- und Bauarbeiten angeführt [HEL03]. Um beiden genannten Perspektiven Rechnung zu tragen, werden als exemplarische Fachdisziplinen nachfolgend die Verfahrenstechnik, Apparatetechnik, Elektrotechnik sowie Automatisierungstechnik herangezogen. Darüber hinaus wird in [FAY09, S. 45] die Terminologie des „führenden Gewerks“ geprägt. Hierbei ist „führend“ auch durchaus wörtlich zu verstehen: Dieses Gewerk bzw. diese Fachdisziplin entwirft und plant den Produktionsprozess, der durch die zu realisierende Anlage ausgeführt werden soll. Folglich kommt dem führenden Gewerk ein höheres Maß an Freiheitsgraden zu als dies bei den nachfolgenden Fachdisziplinen der Fall ist, die sich an möglichen Restriktionen durch vorgelagerte Fachdisziplinen orientieren müssen [FAY09]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit handelt es sich bei dem führenden Gewerk um die Verfahrenstechnik (vgl. Kapitel 2.2 oder 5.2).

[1] Somit entspricht die in dieser Arbeit verwendete Definition des Engineerings dem engen Verständnis nach [TAU13] und umfasst folglich nicht die „Prozesse zur Dokumentation von Anlagen während ihres gesamten Lebenszyklus von der Planung über die Betriebsphase bis zur Demontage“ [TAU13, S. 47], welche dem Engineering im weiteren Sinne zugeschrieben werden.

2.2. Vorgehensmodelle für das Engineering automatisierter Anlagen

Das Vorgehen im Engineering ist ebenso vielfältig wie die Bandbreite der automatisierten Anlagen selbst. Es spielen nicht nur die Art und Größe der Anlage eine Rolle, sondern auch die organisatorischen Rahmenbedingungen und die Perspektive desjenigen, der ein Vorgehensmodell definiert oder dokumentiert. In Abbildung 2-1 ist eine Übersicht verschiedener Vorgehensmodelle für das Engineering automatisierter Anlagen aufgeführt. Die Vorgehensmodelle sind Richtlinien (Zeilen 1-3) sowie der Literatur (Zeilen 4-10) entnommen und teils idealisiert abgebildet. So sind zum Beispiel Iterationen [VoKA07, S. 291] aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit in die Abbildung aufgenommen worden. Die hier dargestellten Vorgehensmodelle sind auf die Planung und Errichtung der Anlage ausgerichtet. Mögliche Quellen, wie [NA 35] oder [LaGö99], die auf das Engineering der prozessleittechnischen Lösung fokussiert sind, werden an dieser Stelle aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht aufgenommen. Die Länge einzelner Prozessschritte dient lediglich der qualitativen Vergleichbarkeit der verschiedenen Vorgehensmodelle und lässt an dieser Stelle keine quantitative Aussage über die Dauer oder den Aufwand einzelner Phasen zu. Die rote Linie dient der Markierung des Beginns der planungsorientierten Phasen und ermöglicht so eine Vergleichbarkeit der verschieden Vorgehensmodelle hinsichtlich der Abdeckung der dem Engineering vorgelagerten Phasen.

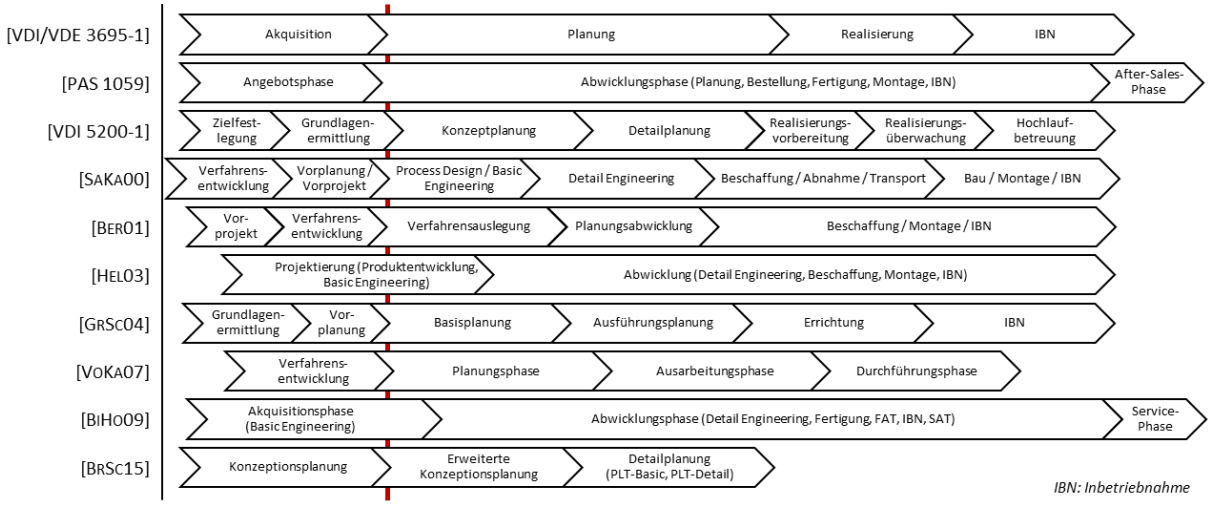

Abbildung 2-1: Verschiedene projektabhängige Vorgehensmodelle im Engineering automatisierter Anlagen[2]

Die Bandbreite der gemäß der genannten Quellen abgedeckten Phasen reicht von den akquisebezogenen Phasen zu Beginn des Engineerings, über die ausführliche verfahrenstechnische wie auch automatisierungstechnische Planung, meist differenziert in Vor- und Detailplanung [VDI 5200-1, S. 8], sowie Realisierung und Inbetriebnahme der Anlage bis hin zu Tätigkeiten, die im Rahmen des Services den Betrieb der Anlage sicherstellen. Auch hier spiegelt sich die Vielfalt der möglichen Definitionen der Terminologie „Engineering“ wider, die bereits in Kapitel 2.1 beschrieben wurde. Herauszustellen ist, dass einige Vorgehensmodelle neben den inhaltlich geprägten Phasen und Aktivitäten auch Elemente des Projektmanagements, der Organisation oder der Vertragsschließung beschreiben. Ein Beispiel dafür ist die häufig genannten Phase „Akquise“ oder „Vorprojekt“. Dem liegt zu Grunde, dass nicht unerhebliche Aufwände des Engineerings von der Engineering-Organisation in

[2] Nach [VDI/VDE 3695-1, S. 5; PAS 1059, S. 4; VDI 5200-1, S. 8; VoKA07, S. 317ff.; BiHo09, S. 5ff.; HeL03, S. 9ff.; BrSc15, S. 634ff.; SaKA00, S. 33ff.; BeR01, S. 149ff.; GrSc04, S. 510].

Vorleistung, das heißt vor der Vergabe bzw. Vertragsunterzeichnung, durchgeführt werden müssen. Diese Vorarbeit findet sich auch in einigen Vorgehensmodellen, indem dort sogenannte Vorprojekte vorgesehen werden. Dabei handelt es sich um eigenständige Projekte, in denen die Aufwände vor dem eigentlichen Anlagenplanungsprojekt allokiert werden. Somit sollen hier die Grundlagen geschaffen werden, um einen Auftrag für ein Anlagenplanungsprojekt – unter wirtschaftlich rentablen Konditionen – zu gewinnen [BER01, S. 149FF.].

Das beschriebene, sequenzielle Vorgehen prägt die Zusammenarbeit der beteiligten Fachdisziplinen. Ergebnisse einer Fachdisziplin werden an eine andere Fachdisziplin übergeben, welche wiederum ihre Engineering-Tätigkeiten, basierend auf den erhaltenen Daten, durchführt [UZU13, S. 53FF.]. Die Verfahrenstechnik, als Beispiel eines führenden Gewerks, erarbeitet aus einer Beschreibung des chemischen Prozesses einen verfahrenstechnischen Produktionsprozess, der im Grundfließschema [DIN EN ISO 10628, S. 6] dokumentiert wird. Als Ergebnis werden die wesentlichen Apparate und Maschinen zur Ausführung des Produktionsprozesses festgelegt, die im Verfahrensfließschema [DIN EN ISO 10628, S. 8] festgehalten werden. Auf dieser Grundlage wird in enger Abstimmung mit der Fachdisziplin Automatisierungstechnik das R&I-Fließschema [DIN EN ISO 10628, S. 9] erstellt, in welchem auch die zugehörigen Antriebsmaschinen sowie Mess-, Regel- und Steuerfunktionen geplant werden. Die Automatisierungstechnik überführt die vorliegenden Zwischenergebnisse wiederum in weiterführende gewerkspezifische Dokumente, wie beispielsweise Stellenblätter [BIHO09, S. 62FF.].

Nicht nur die erforderliche inhaltliche Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Fachdisziplinen kann dazu führen, dass von einem streng sequenziellen Vorgehen ohne parallel ausgeführte Tätigkeiten abgewichen werden muss [HAB12, S. 101FF.]. Auch enge zeitliche Vorgaben können zur Folge haben, dass es nötig ist, Tätigkeiten zu parallelisieren. In diesem Fall muss das nachfolgende Gewerk mit Hilfe von Annahmen auf unsicheren Informationsständen bzw. vorläufigen Planungsständen arbeiten, was in zusätzlichen Iterationen und Mehrkosten resultieren kann [KAB+02, S. 46F; FAY09, S. 46; WSM10, S. 2518].

Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass automatisierte Anlagen eines Typs oft sehr ähnlich, aber nie identisch sind (vgl. Kapitel 1.1), ergibt sich ein Optimierungspotential hinsichtlich des Engineerings: Zum einen besteht seitens der Engineering-Organisation das Bestreben, repetitive und nicht kreative Tätigkeiten zu reduzieren, wie beispielsweise die wiederkehrende Erarbeitung ähnlicher Anlageteile oder Detaillierung einfacher Messstellen. Zum anderen sollen aber auch Tätigkeiten, die Grundlage für eine mögliche Vertragsunterzeichnung sind und damit meist in Vorleistung erbracht werden müssen, hinsichtlich der Ressourcennutzung möglichst effizient vollzogen werden. Ein Beispiel einer solchen in Vorleistung erbrachten Tätigkeit stellt die aufwendige Überführung des Lastenheftes in ein Pflichtenheft nach [VDI/VDE 3694] dar. Um diese Optimierung des Engineerings zu erreichen, bedarf es gezielter und systematisch geplanter Vorarbeit, die weitere Aufwände verursacht, welche keinem kundenspezifischen Projekt zugeordnet werden können. Allen in Abbildung 2-1 abgebildeten Vorgehensmodellen ist gemein, dass lediglich das Vorgehen beschrieben wird, welches das Engineering einer kundenspezifischen Anlage erfordert, nicht jedoch die projektunabhängigen Tätigkeiten beschreibt. Eine Ausnahme stellt die Richtlinie [VDI/VDE 3695-2] dar, welche als Fortführung der [VDI/VDE 3695-1] die Differenzierung zwischen projektabhängigen und -unabhängigen Teilen vorsieht.

Auf wissenschaftliche Wiederverwendungsansätze, welche diese Vorarbeiten auch explizit thematisieren, wird in Kapitel 4.1 näher eingegangen.

Aufgrund der abweichenden inhaltlichen und organisatorischen Definition der Phasen wird nachfolgend das Vorgehensmodell nach [VDI/VDE 3695-1] herangezogen, das durch den allgemeingültigen Charakter eine breite Anwendbarkeit sicherstellt. Zudem lässt es sich an spezifische Rahmenbedingungen anpassen. Das Vorgehensmodell nach [VDI/VDE 3695-1] umfasst die vier Phasen „Akquisition, Planung, Realisierung und Inbetriebnahme“ [VDI/VDE 3695-1, S. 5].

2.3. Strukturierung von Anlagen

Neben einem Vorgehensmodell bedarf die disziplinenübergreifende Zusammenarbeit im Rahmen des Engineerings darüber hinaus einer abgestimmten Strukturierung der Anlage, anhand derer die Zusammenarbeit innerhalb der Phasen koordiniert werden kann. Eine Übersicht dieser Strukturierungsansätze wird nachfolgend dargelegt.

Automatisierte Anlagen können in verschiedener Hinsicht erhebliche Umfänge annehmen: Dies betrifft nicht nur die teils große lokale Verteilung der Anlageteile, sondern auch die Anzahl verwendeter Sensoren und Aktoren. So führt [BRSC15] an, dass eine Anlage mittlerer Größe bis zu ca. 1000 Messstellen und 1500 Feldgeräte umfassen kann [BRSC15, S. 634]. Da das Engineering darüber hinaus in der Regel von einer Vielzahl von Fachdisziplinen durchgeführt wird, müssen im Rahmen des Engineerings die Tätigkeiten an einer Vielzahl von Objekten geplant und überwacht werden. Dies macht eine systematische Strukturierung der automatisierten Anlage unerlässlich. Diese Strukturierung kann anhand verschiedener, disziplinspezifischer Gesichtspunkte vorgenommen werden. Nachfolgend werden allgemeine Grundlagen der Normung bezüglich der Betrachtung und Strukturierung von Objekten erläutert sowie deren verschiedene Ausprägungen hinsichtlich automatisierter Anlagen geschildert.

Grundsätzliche Strukturierungsprinzipien industrieller Systeme und Anlagen werden unter anderem in [DIN 81346-1] definiert. Hier werden verschiedene Aspekte der Betrachtung von Objekten dokumentiert, wobei die Objekte Realweltgegenstände sein können, aber nicht zwingend sein müssen. Die vorgeschlagenen Betrachtungsaspekte nach [DIN 81346-1] sind in Tabelle 2-1 angeführt und werden nachfolgend genutzt, um Strukturierungsprinzipien verschiedener Arbeiten der Normung einzuordnen sowie eine geeignete und umfassende Strukturierung zu erreichen.

Tabelle 2-1: Betrachtungsaspekte nach [DIN 81346-1]

Betrachtungsaspekt	Erläuterung nach [DIN 81346-1]	Ausprägung hinsichtlich des Engineerings
Funktionsaspekt	Was ist der Zweck eines Objektes?	Welche Grundoperation führt eine technische Einrichtung aus?
Produktaspekt	Wie ist das Objekt realisiert, bzw. wie wird der Zweck erfüllt?	Durch welches Gerät/welche Geräte ist eine technische Einrichtung realisiert?
Ortsaspekt	Was ist die geplante und/oder tatsächliche innere räumliche Struktur des Objektes?	An welchem Standort (Gebäude, Raum, Schaltschrank, etc.) ist eine technische Einreichung installiert?
Weitere Aspekte	Ergänzende Aspekte, die nicht von den vorigen drei abgedeckt werden.	Welche automatisierungstechnische Funktion steuert die technische Einrichtung? Welchem Gewerk wird dieses Objekt zugeordnet?

Der Großteil der Normen wie [DIN EN 61512-1] oder [NE 33] greift die differenzierten Aspekte nach [DIN 81346-1] nur implizit auf. Im Gegensatz dazu werden diese Aspekte in [DIN 6779-13] explizit genutzt, um daraus eine geeignete Strukturierung für Chemieanlagen abzuleiten. Diese Strukturierung dient insbesondere der Erstellung eines Kennzeichnungssystems, worauf an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen wird.

Am Beispiel des Produktaspektes sind vier mögliche Strukturierungen in Abbildung 2-2 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass aus Gründen der Vergleichbarkeit die Strukturen entlang der Ebene „Anlage“ angeordnet sind. Allen Quellen ist gemein, dass die jeweilige Ebene aus mehreren Elementen der untergeordneten Ebene bestehen kann. Die hellgrau dargestellten Elemente „Unternehmen“, „Werk“ und „Anlagen“ sind zwar Teil der jeweiligen Struktur, entsprechen jedoch aufgrund der lediglich impliziten Bezugnahme der jeweiligen Norm zu [DIN 81346-1] nicht exakt der Definition des Produktaspektes. Der Vollständigkeit halber werden sie aber dennoch hier aufgeführt. Im Gegensatz zu den Normen [DIN EN 61512-1; DIN EN ISO 10628; NE 33] bezieht sich [DIN 6779-13] explizit auf [IEC 61346], den Vorgänger der [DIN 81346-1].[3]

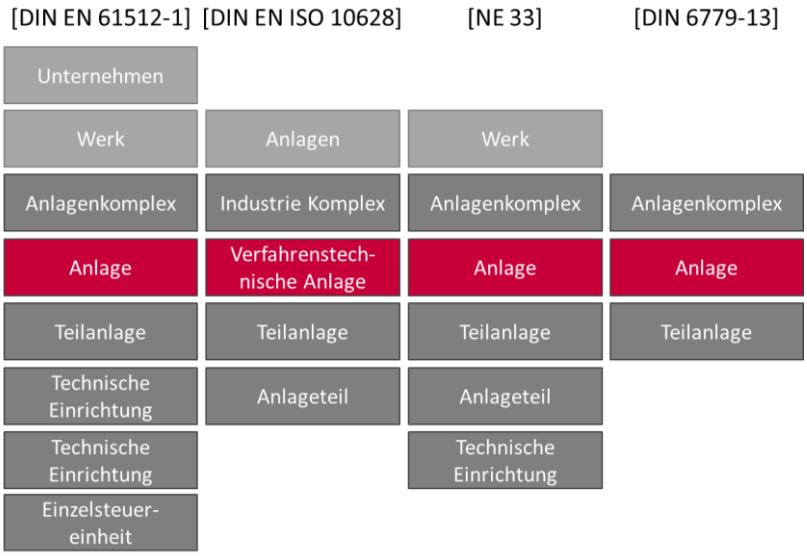

Abbildung 2-2: Mögliche Strukturierungen des Produktaspektes[4]

Herauszustellen ist der Ortsaspekt, der in [DIN 6779-13] aufgegriffen wird, und somit auch eine Strukturierung der Orte und Gebäude ermöglicht, auf die eine automatisierte Anlage verteilt sein kann. So wird hier die Hierarchie „Liegenschaft“, „Gebäudekomplex“, „Gebäude/Gebäudeteil“, „Ebene“, „Raum/Koordinate“ angeführt [DIN 6779-13, S. 10].

[3] Gemäß des Vorwortes der [DIN 6779-13] soll diese langfristig in die Reihe der [DIN 81346-1] eingegliedert werden. Dies ist jedoch bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht der Fall gewesen.

[4] Nach [DIN EN 61512-1; DIN EN ISO 10628; NE 33; DIN 6779-13]. Die Nennungen werden der Konsistenz halber im Singular aufgeführt. Die Benennungen sind der jeweiligen Quelle entnommen, was gegebenenfalls abweichende Schreibweisen erklärt.

Eine Betrachtung der betriebswirtschaftlich orientierten „rollenbasierten Anlagenhierarchie“ (Unternehmen, Betriebsstätte, Anlagenkomplex, Arbeitsplatz und Arbeitseinheit), wie sie in [DIN EN 62264-1, S. 20] definiert wird, ist hinsichtlich der im Rahmen dieser Arbeit beleuchteten Fragestellungen ungeeignet und wird daher nicht weiter betrachtet.

Der Produktaspekt stellt eine in der Normung gängige Strukturierungsgrundlage dar. Dies genügt jedoch, gerade vor dem Hinblick des interdisziplinären Charakters des Engineerings nicht, um auch die Tätigkeiten im Engineering geeignet strukturieren zu können. Die Strukturierung, welche in [DIN EN 61512-1] definiert wird, zeigt Abbildung 2-3. Ergänzend dazu wurde eine Einordnung gemäß der zuvor geschilderten Aspekte vorgenommen (vgl. Tabelle 2-1). Dabei wird ersichtlich, dass die zuvor genannten Aspekte nicht genügen, um eine differenzierte Strukturierung der Anlage zu ermöglichen. Darum wurde in [DIN EN 61512-1, S. 12] der Steuerungsaspekt ergänzt, um auch der Strukturierung der Prozesssteuerung Rechnung tragen zu können.

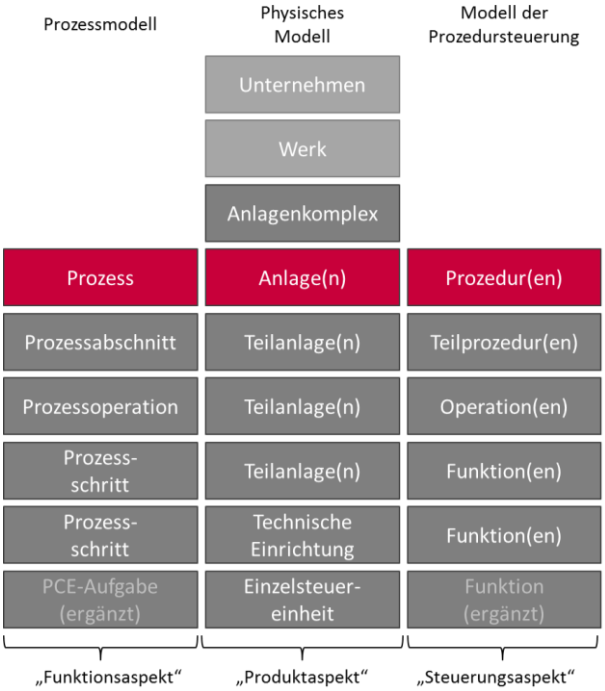

Abbildung 2-3: Strukturierung für Anlagen nach [DIN EN 61512-1, S. 13], ergänzt um PCE-Aufgabe

Der Funktionsaspekt, welcher in [DIN EN 61512-1] als Prozessmodell umgesetzt wurde, stellt im Besonderen in den frühen Phasen des Engineerings ein zentrales Instrument der Strukturierung dar. Bei der Verfahrensentwicklung, also dem Überführen der chemischen Grundgleichung hin zu einem industriell skalierten Verfahren, erfolgt bereits eine Dekomposition und weitere Detaillierung des Prozesses. Aufgrund dessen ist der Funktionsaspekt auch hier prägend für die nachfolgende Ausgestaltung der Produkt- und Steuerungsstruktur.

Die Dekomposition entlang der Modelle gemäß Abbildung 2-3 genügt allerdings nicht, um die für das Engineering notwendige Detaillierung zu erreichen. Darum müssen auch unterhalb des „Prozessschrittes“ weitere Elemente vorgesehen werden. Die „Process Control Engineering“-Aufgaben (kurz: PCE-Aufgaben) nach [DIN EN 62424, S. 8] sind diesbezüglich geeignet, um eine weitere Verfeinerung zu erreichen. Gemäß der Definition stellen die PCE-Aufgaben eine „Aufgabe an die Prozessleittechnik“ [DIN EN 62424, S. 12] dar, um den Prozessschritt im gewünschten Zustand führen

zu können, und ergänzen daher den Funktionsaspekt der Abbildung 2-3 in geeigneter Form. Es ist jedoch unerlässlich zu erwähnen, dass diese PCE-Aufgabe im Rahmen des Engineerings von der Verfahrenstechnik spezifiziert, von der Automatisierungstechnik aber detailliert und dann als Steuerungsfunktion umgesetzt wird. In Abbildung 2-3 wird die Entsprechung der Einzelsteuereinheit in einer Funktion der Steuerung gesehen. Eine weitere Dekomposition der Funktion in Schritte und Transitionen nach [IEC 60848], wie in [DIN EN 61512-1] beschrieben, ist hier nicht grafisch repräsentiert, da diese keine Äquivalenz hinsichtlich des Prozesses aufweist.

2.4. Zwischenfazit

Das Engineering automatisierter Anlagen ist geprägt von der Projektorientierung und den beteiligten Fachdisziplinen, die je nach Anlagentyp teils stark variieren. Allen dargestellten Vorgehensmodellen ist gemein, dass das Engineering Tätigkeiten aufweist, die vor Auftragserteilung durchgeführt werden müssen. Engineering-Organisationen haben das Bestreben, den Aufwand der Tätigkeiten vor Auftragserteilung systematisch zu reduzieren. Ein geeigneter Ansatz dafür kann beispielsweise sein, mittels systematisch entwickelter wiederverwendbarer Einheiten nicht nur das Engineering der Anlage zu optimieren, sondern auch die Überführung des Lastenheftes in ein Pflichtenheft zu beschleunigen. Dies bedarf jedoch einer Anpassung des Vorgehens im Engineering. So muss die Vielfalt des Engineerings hinsichtlich der Anlagen selbst (vgl. Kapitel 2.1) sowie der Vorgehensmodelle (vgl. Kapitel 2.2) berücksichtigt werden. Die Vielfalt spiegelt sich ebenfalls in den Strukturierungsansätzen wider, die eine auf verschiedene Aspekte fokussierte Dekomposition der Anlage ermöglichen. Erst diese Strukturierung ermöglicht eine zeitliche Parallelisierung der Tätigkeiten oder eine inhaltliche Zuordnung verschiedener Arbeitspakete. Die beschriebenen Strukturierungsansätze bilden folglich eine Grundlage, um wiederverwendbare Einheiten definieren, entwickeln und anwenden zu können. Die Betrachtung der neben den Strukturierungsansätzen notwendigen wiederverwendungs-spezifischen Grundlagen wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

3. Grundlagen der Wiederverwendung in der Entwicklung technischer Systeme

Das nachfolgende Kapitel dient der Erläuterung der grundlegenden, in der Literatur verankerten Prinzipien der Wiederverwendung sowie damit einhergehender Themen der Produktstrukturierung und Variabilität. Diese Prinzipien entstammen nicht ausschließlich dem Bereich des Anlagenbaus oder der Automatisierungstechnik, sondern umfassen beispielsweise auch Ansätze der Produktentwicklung. Die beschriebenen Grundlagen werden im Rahmen der wissenschaftlichen Wiederverwendungsansätze hinsichtlich des Engineerings in Kapitel 4.1 aufgegriffen, sodass an dieser Stelle lediglich die grundlegenden Mechanismen beschrieben werden, nicht aber deren Umsetzung in wissenschaftlichen Ansätzen für das Engineering.

3.1. Strukturierung als Voraussetzung für systematische Wiederverwendung

Abgesehen von unsystematischer Wiederverwendung, bei der bestehende Ergebnisse oder Teilergebnisse kopiert und angepasst werden, stellt eine adäquate Architektur des Produktes oder Systems eine zwingende Voraussetzung der Wiederverwendung dar. Neben den bereits in Kapitel 2.3 vorgestellten Ansätzen zur Strukturierung automatisierter Anlagen werden nachfolgend Ansätze aus der Konstruktionslehre bzw. Produktentwicklung angeführt. Hier werden bereits seit mehr als vier Jahrzehnten verschiedene Produktarchitekturen erforscht [PABE74] und das Thema im Laufe der Jahre systematisch erweitert und weiterentwickelt [BLE11; EKL+13; CHCR14]. Nachfolgend wird in Anlehnung an [COR02, S. 41FF.; GÖP98, S. 75; ULR95, S. 421], die Produktarchitektur als Zusammenspiel aus Funktionsstruktur und physischer Produktstruktur verstanden. Wie Abbildung 3-1 zeigt, muss hierbei keine 1:1-Zuordnung zwischen den Funktionen und den sie realisierenden Baugruppen oder Bauteilen – im physischen wie nichtphysischen Sinne – vorliegen.

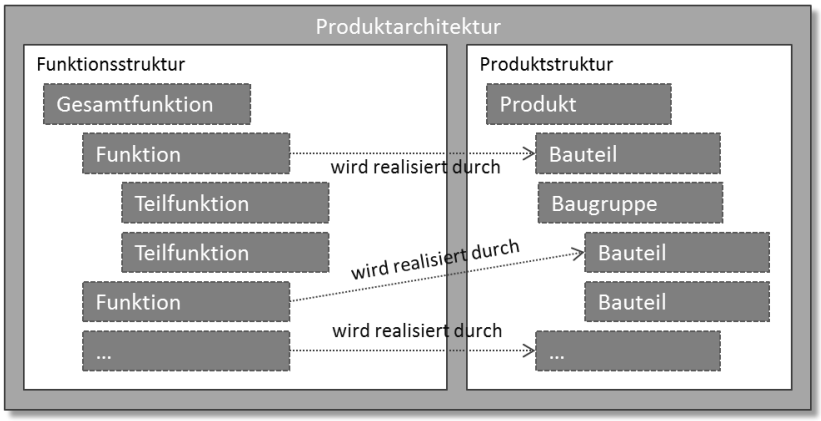

Abbildung 3-1: Produktarchitektur aus Funktions- und Produktstruktur nach [GÖP98, S. 75] bzw. [ULR95, S. 421]

Nachfolgend werden zum einen Produktstrukturen beschrieben, die den inneren Aufbau eines Produktes aus dessen Einzelteilen/Komponenten beschreiben. Zum anderen werden Ansätze zur Strukturierung von Produktlinien/-familien erläutert, welche den Aufbau der Produktlinie/-familie aus deren Produkten beschreiben [SCH05; BLE11, S. 7]. Diese Unterscheidung ist aufgrund des generellen Charakters der Ansätze nicht immer disjunkt zu treffen, sodass die Ansätze grundsätzlich beschrieben und nachfolgend vergleichend eingeordnet werden.

3.1.1. Baureihen

Das Prinzip der Baureihen beschreibt den Zusammenhang verschiedener, ähnlicher Produkte und wird in [EKL+13] dahingehend präzisiert, als dass eine Baureihe „aus funktionsgleichen technischen Gebilden (Maschinen), die der Größe nach systematisch gestuft sind“ [EKL+13, S. 332] bestünde. Hierbei muss bezüglich der Terminologie „funktionsgleich“ differenziert werden: So wird in [EKL+13] an nachfolgender Stelle herausgestellt, dass innerhalb einer Baureihe in der Regel die qualitative Funktion, die konstruktive Lösung und wenn möglich auch die Werkstoffe und die eingesetzten Fertigungsverfahren gleich sein sollten. Die Produkte einer Baureihe differieren also hinsichtlich der Abmessungen und Leistungsdaten, welche der quantitativen Funktion gleichgesetzt werden. Dem entgegen steht die weiter gefasste Definition nach [SCH05, S. 127], wonach lediglich die Skalierung eines Parameters (z.B. der Leistung) genügt, um verschiedene Produkte einer Baureihe zuzuordnen. In [KOL98] werden weitere Ausprägungen von Baureihen unterschieden: So können sich die verschiedenen Produkte einer Baureihe aufgrund Ihrer quantifizierbaren Parameter (z.B. Leistung, Kraft, Druck, etc.), den Abmessungen oder der Anzahl unterscheiden [KOL98, S. 327FF.]. Es ist anzumerken, dass meistens eine Korrelation zwischen den verschiedenen Parameter vorliegt, da beispielsweise eine höhere Leistung auch in größeren Abmessungen resultiert. Als strukturgebend wird nach [KOL98] folglich derjenige Parameter angesehen, der ausschlaggebend für die Variation innerhalb einer Baureihe ist.

Auch diese Unterscheidung bzw. die graduelle Abstufung der unterscheidenden Merkmale kann durch Ähnlichkeitsgesetze [FGP+13, S. 820] und Normreihen [DIN 323-1; DIN 323-2] reglementiert werden. Unabhängig davon bleibt aber auch dann die qualitative Funktion das gemeinsame, invariable Charakteristikum aller Vertreter einer Baureihe. Als häufige Beispiele für Baureihen werden Getriebegehäuse oder auch Zahnräder angeführt [FGP+13, S. 828-830]. Weiterführende Informationen können den zuvor genannten Quellen sowie [SCH89; RAP99; BAU05; VIST13] entnommen werden.

3.1.2. Baukasten

Im Gegensatz zu den Baureihen, die ein fest definiertes System meist funktionsgleicher Elemente darstellen [EKL+13, S. 347], handelt es sich bei einem Baukasten um ein flexibles Kombinationssystem, welches eine Sammlung im Vorhinein entwickelter Bausteine enthält. Eine diesbezüglich grundlegende Arbeit ist [BOR61], in der dargelegt wird, wie der Ansatz eines Spielzeugbaukastens – bestehend aus meist additiven Bausteinen – auf die Entwicklung technischer Produkte übertragen wird. So wird aufgezeigt, wie vorgefertigte, materielle und immaterielle Bausteine genutzt werden können, um die Produktentwicklung zu beschleunigen, indem durch eine Rekombination von Bausteinen ein neues Produkt entsteht. Es wird darüber hinaus festgestellt, dass die Implementierung eines Baukastenprinzips zumindest eine organisationsinterne Normung der Bausteine sowie deren Schnittstellen erfordert.

Der Ansatz der Baukästen wurde im Laufe der Jahre an verschiedener Stelle [PABE74; SCH89; GÖP98; KOL98; MIEL98; FHH+02; SCH05; BAU05; ENS06; EKL+13] aufgegriffen und weiter verfeinert. So werden in [KOL98] verschiedene Typen von Baukastensystemen klassifiziert (strukturgebundene, modulare, abstrakte, ein- oder mehrdimensionale sowie vollständige oder unvollständige Baukastensysteme)

[KOL98, S. 336FF.], die somit Ordnungsschemata für Baukästen darstellen, auf die an dieser Stelle aber nicht genauer eingegangen wird.

In Bezug auf technische Systeme stellt [FHH+02] heraus, es sei ein entscheidendes Merkmal von Bausteinen, dass diese – entsprechend deren Schnittstellendefinition – beliebig kombiniert werden können. Darüber hinaus können Baukästen oft auch Baureihen (vgl. Kapitel 3.1.1) enthalten [EKL+13, S. 347], was eine Rationalisierung der Erstellung bzw. Strukturierung des Inhalts von Baukästen darstellt. Als Beispiel kann an dieser Stelle der klassische Lego©-Baustein angeführt werden, dessen Schnittstellen (Verbindungszapfen an Ober- und Unterseite) genormt sind, der Baustein selbst jedoch als Baureihe ausgeführt ist, indem beispielsweise die Breite des Bausteins mit zwei Zapfen konstant, die Länge aber in Schritten von 1, 2, 3, 4, 6, 8 oder 10 Zapfen variiert.

3.1.3. Modulbauweise

Nachdem das vorige Kapitel 3.1.2 das Prinzip der Baukästen in der Produktentwicklung beschrieben hat, wird nachfolgend die damit teils eng verwobene Modulbauweise thematisiert. Bezüglich der Abgrenzung dieser beiden Prinzipien liegen verschiedene Ansichten vor [GÖP98; KOL98; SCH05, S. 128]. Nachfolgend wird aber die Definition nach [MIEL98] bzw. [PBF+05, S. 656] verfolgt, wonach ein Modul, im Gegensatz zu einem Baustein, immer einen nicht unerheblichen Anteil der Gesamtfunktion des Produktes realisiert. In Anlehnung an [MIEL98] wird im Folgenden neben einer historischen Einordnung des Prinzips selbst auch eine Erläuterung der mit der Modulbauweise verbundenen Begriffe Modul, Modularität und Modularisierung vorgenommen.

Der historische Ursprung der Modulbauweise liegt nach [MIEL98] in der Bauhaus-Architektur. So war es in dieser architektonischen Phase von 1919-1933 [DRO13] das Bestreben, die Erstellung der Gebäude durch vorgefertigte und standardisierte Elemente zu rationalisieren. Diese Module wurden anhand der zu realisierenden Funktion definiert, das heißt ein Modul entsprach einem Typen von Raum (z.B. Küche, Esszimmer, Schlafzimmer etc.), welcher diese Funktion im architektonischen Sinne realisierte. Schon 1923 wurden so die sogenannten „standardized housing units“ [DRO13, S. 112] vorgestellt, die entsprechend der Kundenanforderungen sowie der Anzahl der zukünftigen Bewohner angeordnet werden konnten [DRO13]. Die Struktur dieser Einheiten war derart gestaltet, dass eine möglichst universelle Kombination möglich sein sollte, was im zuvor genannten Beispiel aus dem Jahre 1923 zu einer Wabenform [DRO13, S. 112], in der Architektur im Generellen jedoch meist zu kubischen Grundformen, führte. Diese Formensprache wird noch heute als prägend für die Bauhaus-Architektur angesehen. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass zur Zeit der Bauhausarchitektur das Wort „Modul“ im Sinne eines proportionsbasierten Standardmaßsystem geprägt war und die erläuterten architektonischen Module zur damaligen Zeit als Bausteine bezeichnet wurden [MIEL98].

Modul: Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Bausteinen sind die Module nach [FHH+02, S. 72] nicht frei zu einem Produkt bzw. einem technischen System kombinierbar. Darüber hinaus definiert [BAU05] in Anlehnung an [ULR95] ein Modul als „(…) eine funktional und physisch vom restlichen Produkt weitgehend unabhängige Einheit“. Diese Definition ist jedoch stark an der physischen Repräsentation der Module orientiert. In [EKL+13] wird der Zweck eines Moduls in Anlehnung an [LAS00] hingegen als „Optimierung der Prozesse in Entwicklung, Beschaffung, Fertigung und Montage sowie Service (…)“ [EKL+13, S. 359] definiert. Diese weitaus mehr am Lebenszyklus des technischen

Systems orientierte Betrachtung eines Moduls scheint deutlich besser geeignet, um den ganzheitlichen Charakter der Module in der Entwicklung abzudecken. Jedoch greift diese Definition den in [MIEL98] geforderten, wichtigen Bezug zwischen Modul und Funktionalität sowie die zwingende Definition der Schnittstellen nicht auf. Darum soll im Sinne der Integralbauweise [KOL98, S. 308] folgende Definition eines Moduls verwendet werden: „Ein Modul ist eine Einheit von Objekten, welche eine Funktion realisieren, definierte Schnittstellen aufweisen und der Optimierung von Planung, Entwicklung, Beschaffung, Fertigung, Montage und Service dienen können“. Hierbei ist von zentraler Wichtigkeit, dass die Funktionsrealisierung als verpflichtend [ULR95; PBF+05], die Optimierung der verschiedenen Prozesse jedoch abhängig von der Ausprägung der Module als optional anzusehen ist. Die Definition sagt darüber hinaus nicht aus, ob das Modul im Rahmen des funktionsfähigen Produktes noch als Modul erkennbar sein muss oder nicht. Es werden also explizit auch Module eingeschlossen, die lediglich der Optimierung der Planung oder Entwicklung dienen. In [AND97] werden hier die Begriffe der „virtuellen“ oder „versteckten“ Module bzw. der Modularität eingeführt [AND97, S. 257]. Allen Definitionen ist gemein, dass die Anwendbarkeit der Module für materielle wie auch immaterielle Artefakte vorgesehen wird und folglich Inhalte verschiedenen Charakters verwendet bzw. strukturiert werden können.

Modularität: Die weitreichende Definition der Module impliziert auch eine strukturelle Änderung des Aufbaus der Produkte bzw. technischen Systeme bei der konsequenten Verwendung von Modulen während der Entwicklung. Die Modularität ist nach [PBF+05] eine „graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur im Sinne einer zweckmäßigen Strukturierung“ [PBF+05, S. 656]. Ähnliche Definitionen finden sich in [BAU05, S. 29]. Eine kritische Reflektion der Terminologie unter Berücksichtigung von Quellen wie [ULR95] oder [SAMA96] kann [GÖP98, S. 102] entnommen werden. Im Zusammenhang mit der angeführten Definition sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei Aspekte herausgestellt werden.

Zum einen muss der Begriff der „zweckmäßigen Strukturierung“ [PBF+05, S. 656] im Fokus einer jeden Arbeit definiert werden. Gemäß [GÖP98] stellt die Modularität eine Voraussetzung der gewinnbringenden Differenzierung zwischen Funktionsstruktur und physischer Baustruktur dar. So erlaubt erst die Modularität eines Systems die sinnvolle Entkopplung dieser beiden Strukturen [GÖP98, S. 74F.]. Ähnliche Aussagen können [ULR95, S. 420; MIEL98; BAU05; PBF+05] entnommen werden. Die modulare Planung wird beispielsweise auch in [VDI 2221] als ein zentraler Aspekt der methodischen Entwicklung bzw. des methodischen Konstruierens angesehen und gefordert.[5] Darüber hinaus erlaubt die modulare Planung aber auch, die gegebenenfalls verschiedenen Anforderungen an die funktionale sowie die bauliche Struktur aufzugreifen. Die funktionale Struktur orientiert sich an kundenorientierten Forderungen und dient somit der optimalen Erfüllung der Kundenanforderungen. Die bauliche Struktur hingegen stellt Aspekte der Beschaffung, Fertigung aber auch Wartung in den Vordergrund und soll so beispielsweise durch Gleichteile eine Kostenreduktion ermöglichen [SCH05, S. 130F.].

Zum anderen ist der graudelle Charakter der angeführten Definition der Modularität zu thematisieren. So verdeutlicht [BAU05, S. 28] in Bezugnahme auf [GÖP98], dass dieser Grad der Modularität nicht maximiert werden müsse, sondern vielmehr eine zielgerichtete Optimierung der Modularität

[5] Dies geschieht unabhängig davon, ob die Modularität dieses Systems nach dem Engineering noch ersichtlich ist [SAMA96, S. 65].

vielversprechend sei. So dient nach [SCH05] die Modularität der Schaffung einer Vielfalt von Endprodukten im Sinne von kundensichtbaren Produkten bzw. Produktvarianten, die aus einer begrenzten Zahl an Modulen resultieren [SCH05, S. 130]. Hierbei steht jedoch nicht im Vordergrund, eine möglichst maximale Bandbreite von Modulen vorzuhalten, sondern Kundenwünsche möglichst effizient zu erfüllen und Kosten zu reduzieren. In [SAMA96] sowie [MIEL98] wird ergänzend argumentiert, dass eine modulare Produktarchitektur aufgrund der Kapselung sowie der erforderlichen Schnittstellendefinition auch ein adäquates Mittel der Komplexitätsreduktion darstellen kann.

Modularisierung: Die Unterteilung einer Produktarchitektur in Module wird gemeinhin als Modularisierung bezeichnet und geschieht meist eingebettet in ein übergeordnetes Entwicklungsvorgehen [VDI 2221]. Eine exakte und weitreichende Definition wird in [PBF+05] angebracht: „[Die Modularisierung] *ist die Produktstrukturierung, bei der die Modularität eines Produkts erhöht wird. Ihr Ziel ist die Optimierung einer bestehenden Produktarchitektur, um Produktanforderungen zu erfüllen [BAU05]* (Anpassung des Quellenverweises durch den Autor) *oder um Rationalisierungseffekte in der Produktentstehungsphase zu erzielen*“ [PBF+05, S. 656]. Diese Definition greift die zuvor geschilderten Aspekte der Modularität auf und impliziert damit, dass es zwei verschiedene Arten der Modularisierung gibt: Eine kundensichtbare Modularisierung, deren Ziel die bestmögliche Erfüllung von Kundenanforderungen ist [MIEL98], und daneben eine innengerichtete Modularisierung, mithilfe derer Skaleneffekte und somit Kostenvorteile erzielt werden sollen. Eine Kombination dieser Vorteile wird möglich, indem Standard-Elemente definiert werden, die Teil jeder kundenindividuellen Lösung sind und sogenannte Grundfunktionen [PBF+05, S. 636] realisieren.

In [SAMA96; STOU09; EKL+13] werden organisationsorientierte Aspekte der Modularisierung betrachtet. Danach ermögliche die Modularisierung die klare Festlegung von Verantwortlichkeiten [STOU09, S. 26F.], was zu einer Reduktion der Schnittstellen im organisatorischen Ablauf führe [EKL+13, S. 359]. Hinsichtlich der Organisation wird in [SAMA96, S. 64] angeführt, dass die Modularisierung ein Treiber des organisationsweiten Lernens darstellen kann, wenn die Organisation konsequent auf die modulare Entwicklung der Produkte ausgerichtet ist. Darüber hinaus sei die Modularisierung bzw. die daraus folgende modulare Produktarchitektur eine Grundlage dafür, die Lieferung bzw. Fertigung von Teilen des Produktes an andere Organisationen zu vergeben [EKL+13]. Weiterführende Abhandlungen bezüglich der Anwendung der Modularisierung in der Simulation [WEST13], der Logistik [STOU09], der Entwicklung kundenindividueller Massenprodukte [KRCA05] oder auch für Package Units in der Prozessindustrie [RGF+12] sind den genannten Quellen zu entnehmen.

3.1.4. Plattform

Die Plattformbauweise stellt eine Produktarchitektur dar, die vor allem in der Automobilindustrie verbreitet ist [COR02]. Bei einer Plattform im Sinne der Produktentwicklung handelt es sich um ein Gleichteilkonzept, das sowohl auf Bausteine, Baureihen oder Module zurückgreifen kann [BAU05, S. 42; EKL+13, S. 360]. In [BAU05] wird das Bild geprägt, die Plattform stelle „den größten gemeinsamen Nenner einer Produktfamilie“ [BAU05, S. 42] dar. Diese Aussage verdeutlicht die wesentliche Auswirkung des Plattformgedankens auf die Struktur einer Produktfamilie sowie die daraus resultierenden Produkte: Basierend auf einer Sammlung von Bauteilen, der sogenannten Plattform, die allen Produkten der Produktfamilie gemein ist, werden unterschiedliche Produkte ausgeprägt. Diese Ausprägung geschieht dann entweder durch weitere produktspezifisch selektierte Gleichteile oder

durch Teile, die gänzlich neu entwickelt wurden. [EKL+13] differenziert an dieser Stelle bezüglich möglicher auftretender Änderungen: Bei einem Baukasten können Änderungen durch Versionierung einzelner Bausteine vorgenommen werden, bei einer Plattform hingegen kann eine Änderung Auswirkungen auf weitere Produkte haben, die auf derselben Plattform basieren [EKL+13, S. 360F.].

Ein oft zitiertes Beispiel einer Plattform stellen Automobile dar, welche unter verschiedenen Marken als unterschiedliche Modelle verkauft werden, aber auf einer gemeinsamen, konzernweiten Plattform basieren [COR02; BAU05, S. 42; ENG06, S. 168; EKL+13, S. 360]. Diese Strukturierung befähigt den Automobilhersteller, Skaleneffekte auch über Modell- oder gar Markengrenzen hinweg zu realisieren. Jedoch soll diese modellübergreifende Gleichteilverwendung meist für den Kunden nicht ersichtlich sein [BAU05, S. 42], um die Markendefinition nicht zu verwischen oder die „Kannibalisierung von Produkten aus dem eigenen Unternehmen“ [ENG06, S. 173] zu vermeiden. All dies verdeutlicht, dass die Motivation einer Plattformbauweise eher in der Kostenreduktion als in der optimalen Erfüllung der Kundenwünsche liegt [ULEP04, S. 182]. Eine Übersicht verschiedener Plattformkonzepte ist [DEL06, S. 79FF.] zu entnehmen.

Neben den zuvor geschilderten Risiken ergeben sich aus dieser anteilig gemeinsamen Produktstruktur auch eine Reihe von Vorteilen: An dieser Stelle sei die Nutzung von Skaleneffekten durch einen gesteigerten Anteil genutzter Gleichteile, eine beschleunigte Beschaffung, Fertigung und Montage, sowie eine schnellere Reaktion auf geänderte Marktverhältnisse durch Adaption der Produkte basierend auf der Plattform zu nennen [MELE97; BAU05, S. 42; PBF+05, S. 657; SCH05, S. 132FF.; ENG06, S. 173; MAG12, S. 20].
[SCH05] führt darüber hinaus an, die Schaffung einer Plattform diene der Entkopplung von „Produktstrukturlebenszyklus und Produktlebenszyklus“ [SCH05, S. 132], wobei die Produktstruktur hierbei gleichzusetzen ist mit der Terminologie Produktarchitektur (vgl. Kapitel 3.1). Dieser Aspekt wird jedoch auch von den in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Produktlinien erfüllt.

3.1.5. Produktlinien

Während die zuvor erläuterte Plattformbauweise lediglich die gemeinsamen Anteile verschiedener Produkte umfasst, fokussiert der Ansatz der Produktlinien insbesondere auf die variablen Anteile, welche zwischen den verschiedenen Produkten einer Produktlinie variieren. Dieser Ansatz wurde insbesondere im Bereich des Software-Engineering als „Software-Product-Lines“ [MAY97@; JRL00; PBL05; CLNO12] mit großem Aufwand verfolgt und erforscht.

In der Literatur ist eine Vielzahl möglicher Definitionen und Abgrenzungen der Begriffe „Produktlinie“ und „Produktfamilie“ aufzufinden. Die gängige Nomenklatur im Software-Engineering „Product-Line“ wird nachfolgend als synonym zu einer Produktlinie angesehen. Die Definition einer Produktfamilie (im Sinne einer losen Gruppe ähnlicher Produkte) wird, beispielsweise entgegen [BLE11], nachfolgend nicht weiter thematisiert. Eine sehr ausführliche Diskussion der Begrifflichkeit aus dem Fokus der Wirtschaftswissenschaften ist [DEL06, S. 46FF.] zu entnehmen.

In [CLNO12] wird eine „Software-Product-Line“ definiert als „[a] *set of software intensive systems sharing a common, managed set of features that satisfy the specific need of particular market segment or mission and that are developed from a common set of core assets in a prescribed way*” [CLNO12, S. 14]. Anzumerken ist diesbezüglich, dass die „*core assets*” an dieser Stelle gleichzusetzen

sind mit der zuvor erläuterten Plattform und die Definition im Kontext der vorliegenden Arbeit nicht nur auf den Bereich der Software beschränkt bleiben soll. Entgegen der Plattformbauweise beschreibt eine Produktlinie aber im Voraus (vgl. „(…) *in prescribed way*“ des vorigen Zitats), in welcher Art und Weise die einzelnen gegebenenfalls kundenindividuellen Produkte auf der gemeinsamen Plattform entwickelt werden [MELE97, S. 17]. [KRCA05] führt an, die hierarchische Ausprägung innerhalb einer Produktlinie könne gemäß den individuellen Anforderungen angepasst werden und sowohl recht simple Elemente (vgl. Bausteine), aber auch komplexere Elemente größeren Funktionsumfangs (vgl. Module) enthalten. Unabhängig von Komplexität und Funktionsumfang der Elemente, müssen diese aber immer Skaleneffekte durch Mehrfachnutzung ermöglichen [KRCA05, S. 82].

Wird der Produktlinienansatz angewendet, führt dies zu einem Perspektivenwechsel bezüglich der Produktarchitektur: Anstelle der Betrachtung eines singulären Produktes wird die gesamte Produktlinie betrachtet. Ein solcher Perspektivwechsel erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Kundenwünsche sowie des Marktes hinsichtlich dessen Segmentierung und Entwicklung, da die Produktlinie in Vorleistung entwickelt wird, also bevor das singuläre Produkt vom Kunden angefragt wird. Außerdem müssen die Elemente (i.S.v. Bausteine und Module) der Produktlinie ebenso beschrieben werden wie die logischen und variabilitätsbezogenen Zusammenhänge zwischen den Elementen sowie die Anforderungen, welche durch die Plattform erfüllt werden können.

Nach der Auftragserteilung zur Erstellung einer Software aus einer Produktlinie kann die kundenindividuelle Software aus der entsprechenden Produktlinie abgleitet werden, indem Variabilität gebunden wird (vgl. Kapitel 3.3). Dieser Vorgang stellt das Treffen und Dokumentieren von präskriptiv definierten Design-Entscheidungen dar und ermöglicht es, die Entwicklungsdauer nach Kundenauftrag zu reduzieren sowie zeitgleich qualitativ hochwertigere Software zu entwickeln [CLNO12, S. 17]. Diese Vorteile werden ermöglicht, da nicht nur Bestandteile der zukünftigen Software bereits im Vorhinein entwickelt, geprüft und gegebenenfalls bereits verwendet werden, sondern auch deren mögliches Zusammenspiel definiert wird. Genügt aufgrund geänderter Kundenwünsche die Ableitung eines Produktes aus der Produktlinie nicht, um die Anforderungen des Kunden zu erfüllen, kann der Fall eintreten, dass in der Folge auch die Produktlinie weiterentwickelt werden muss. Eine Beschreibung spezialisierter Produktlinienansätzen zum Zwecke der gesteigerten Wiederverendung ist Kapitel 4.1 zu entnehmen.

3.1.6. Einordnung der Ansätze

Die zuvor beschriebenen Produktarchitekturen sowie die Produktlinien entstammen verschiedenen Domänen, Fachgebieten und einer Zeitspanne von über 30 Jahren. Aufgrund dessen ist die Eignung der Ansätze für die Wiederverwendung im Kontext des Anlagenbaus nicht immer gegeben. Nachfolgend wird daher in Tabelle 3-1 eine Einordnung der Ansätze zur Produktstrukturierung hinsichtlich der Zuordnung in einem hierarchischen Produktaufbau sowie der Fokussierung der Ansätze vorgenommen.

Tabelle 3-1: Relationen zwischen Produktstrukturierung und hierarchischem Produktaufbau sowie Charakteristika

		Hierarchischer Produktaufbau				Charakteristika		
		Bauteil	**Baugruppe**	**Produkt**	**Produkt-komplex**	**Betrach-tungsweise**	**Komplexität der Struktur**	**Kunden-orientierung**
Produktstrukturierung	**Baureihe**	Im Fokus	Im Fokus			Bauteil-bezogen	Niedrig bis mittel	Niedrig
	Baukasten	Im Fokus				Bauteil-bezogen	Niedrig bis mittel	Mittel
	Modul-bauweise		Im Fokus	Im Fokus		Funktions-bezogen	Mittel bis hoch	Mittel
	Plattform	Im Fokus	Im Fokus			Bauteil-bezogen	Mittel bis hoch	Niedrig
	Produkt-linie			Im Fokus	Im Fokus	Produkt-/ Funktions-bezogen	Hoch	Hoch

In der linken Hälfte der Tabelle 3-1 ist die Relation zwischen den Strukturierungsansätzen und den tatsächlich manifestierten Aufbau des Produktes aus Bauteil, Baugruppe und Produkt bis hin zu einem Produktkomplex dargestellt. Der Produktkomplex, der eine kundenorientierte Agglomeration von Produkten repräsentiert, stellt eine Ergänzung des in [PBF+05] definierten Aufbaus dar und wird benötigt, um auch produktübergreifende Mechanismen verdeutlichen zu können. Hierbei wird ersichtlich, dass Baureihen, Baukästen und Plattformen auf die Ebenen der Bauteile und Baugruppen fokussiert sind. Die Modulbauweise hingegen fordert eine nicht zu vernachlässigende Funktion des Moduls [MIEL98]. Im Gegensatz zu den bauteilbezogenen Ansätzen stellen die Produktlinien das Produkt bzw. den damit eng verwobenen Aufbau der Produktlinie im Mittelpunkt der Betrachtung. Zwar basiert eine Produktlinie auf einer allen Produkten gemeinsamen Plattform, jedoch steht nicht die Steigerung des Anteils von Gleichteilen, sondern vielmehr die schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen und Marktentwicklungen im Vordergrund. Darüber hinaus ermöglichen Produktlinien die Strukturierung und Handhabung komplexer Systeme und Teilsysteme, welche den Herausforderungen des Engineerings näher kommen, als dies bei den vorherigen Ansätzen der Fall ist.

Die Bewertung in der rechten Hälfte der Tabelle 3-1 verdeutlicht die Auswirkungen der zuvor geschilderten Zusammenhänge hinsichtlich der Betrachtungsweise, der Komplexität des Aufbaus sowie der Kundenorientierung. Diese Bewertung dient dem qualitativen Vergleich der verschiedenen Ansätze, die aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen und Beziehungen nicht gänzlich voneinander getrennt bewertet werden können. Die Spalte Betrachtungsweise stellt eine Zusammenfassung der linken Hälfte der Tabelle dar. Die Komplexität der Struktur korreliert in der Regel stark mit der Anordnung im hierarchischen Produktaufbau. Hinsichtlich der Kundenorientierung kann davon ausgegangen werden, dass bauteilorientierte Ansätze (z.B. Baukästen oder Plattformen) der internen Kostenreduktion durch Skaleneffekte dienen, wohingegen Ansätze, die funktionale und

produktbezogene Aspekte fokussieren (z.B. Produktlinien), eher den Kundennutzen in den Vordergrund stellen. Während bestehende systematische Wiederverwendungsansätze im Engineering eher auf die Verwendung von Bausteinen fokussiert sind, erscheint es sinnvoll für ein Wiederverwendungskonzept, welches funktional umfassendere Einheiten berücksichtigen soll, eher einen produktlinienbasierten Ansatz als einen bauteilorientierten Ansatz zu wählen.

3.2. Grundlegende Wiederverwendungsmechanismen

Nachdem im vorigen Abschnitt verschiedene Produktstrukturen erläutert wurden, werden nachfolgend grundlegende Mechanismen der Wiederverwendung dargelegt. Diese Mechanismen bilden die Basis für die ausführliche Betrachtung der Wiederverwendungsansätze verschiedener Fachdisziplinen in Kapitel 4.1. Da die Wiederverwendungsmechanismen hinsichtlich Charakter und Anwendung teils stark divergieren, erscheint es sinnvoll, nachfolgend ein Klassifikationsschema anzuführen. In der Literatur werden verschiedene Wiederverwendungsstrategien vorgeschlagen, die in Tabelle 3-2 dargestellt und zueinander in Relation gesetzt sind. Hierbei werden die Klassifikationsschemata nach [MAG12] und [GRI03@] sowie die Zielzustände hinsichtlich Wiederverwendung angeführt, die in [VDI/VDE 3695-3] definiert sind. Die Abstufungen der Wiederverwendung reichen von der sogenannten „ad-hoc“[6] Wiederverwendung, also einem unsystematischen und erfahrungsgetriebenen Kopieren von Inhalten, bis hin zu einer gesteuerten und auf Standards basierenden projektübergreifenden Wiederverwendung. Die produktlinienbasierte Wiederverwendung stellt eine gezielt für die Wiederverwendung vorgenommene Anwendung des in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Produktlinienansatzes dar. [MAY97@] ergänzt die Klassifikation durch die Klassifikation „Hybrid“, welche eine Mischform der genannten Wiederverwendungsmechanismen darstelle. Da diese Klassifikation jedoch keinen Wiederverwendungsmechanismus an sich darstellt, wird diese in Tabelle 3-2 sowie im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-2: Verschiedene Klassifikationsschemata für Wiederverwendungsmechanismen und -ansätze

[MAG12] nach [MAY97@]	[GRI03@]	[VDI/VDE 3695-3]	Erläuterungen nach [VDI/VDE 3695-3]
„Ad-hoc“ Wiederverwendung	„Ad hoc“ Reuse	Zielzustand A	Mitarbeiter betreiben Wiederverwendung erfahrungsbasiert und unsystematisch. Elemente werden angepasst.
Opportunistische Wiederverwendung	Facilitated Reuse	Zielzustand B	Es wird gesteuerte Wiederverwendung innerhalb eines Projektes betrieben.
Systematische Wiederverwendung	Managed Reuse	Zielzustand C	Wiederverwendung wird innerhalb der Organisation projektübergreifend, von zentraler Stelle aus gesteuert, betrieben.
Produktlinienbasierte Wiederverwendung	Designed Reuse	Zielzustand D	Wiederverwendung wird anhand von Referenzmodellen betrieben, aus denen wiederverwendbare Einheiten abgeleitet werden können. Diese Referenzmodelle können Produktlinien darstellen.
		Zielzustand E	Die verwendeten Referenzmodelle sind intern und/oder extern standardisiert.

[6] Schreibweise „ad-hoc“ nachfolgend gemäß [MAY97@].

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Wiederverwendungsmechanismen in Relation zu einer Neuentwicklung wurde im Rahmen einer industriellen Fallstudie in [TGK+04] durchgeführt.[7] Das Ergebnis dieser Studie ist in Abbildung 3-2 grafisch aufbereitet. Anzumerken ist, dass die Untersuchung auf Basis von sieben zu realisierenden Software-Systemen durchgeführt wurde [TGK+04, S. 609FF.], die Grafik jedoch nur die Ergebnisse eines dieser repräsentiert [TGK+04, S. 611]. Folglich muss davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der anderen Systeme nicht derart eindeutig ausgefallen sind. Ähnliche Kausalitäten werden aber auch in [COR02] für Kraftfahrzeuge beschrieben. Nichts desto trotz zeigt Abbildung 3-2, wie der Aufwand einer jeweiligen Neuentwicklung verschiedener Systeme kumuliert wird, wohingegen der höhere Anfangsaufwand einer systematischen Wiederverwendung mit zunehmender Stückzahl, durch die geringeren nachfolgenden Aufwände, amortisiert wird. Interessant ist insbesondere, dass die systematische Wiederverwendung besonders dann effizient ist, wenn existierende Ergebnisse zur Wiederverwendung aufbereitet werden und diese nicht neu entwickelt werden müssen. So kann bereits der initial zu erbringende Aufwand reduziert werden.

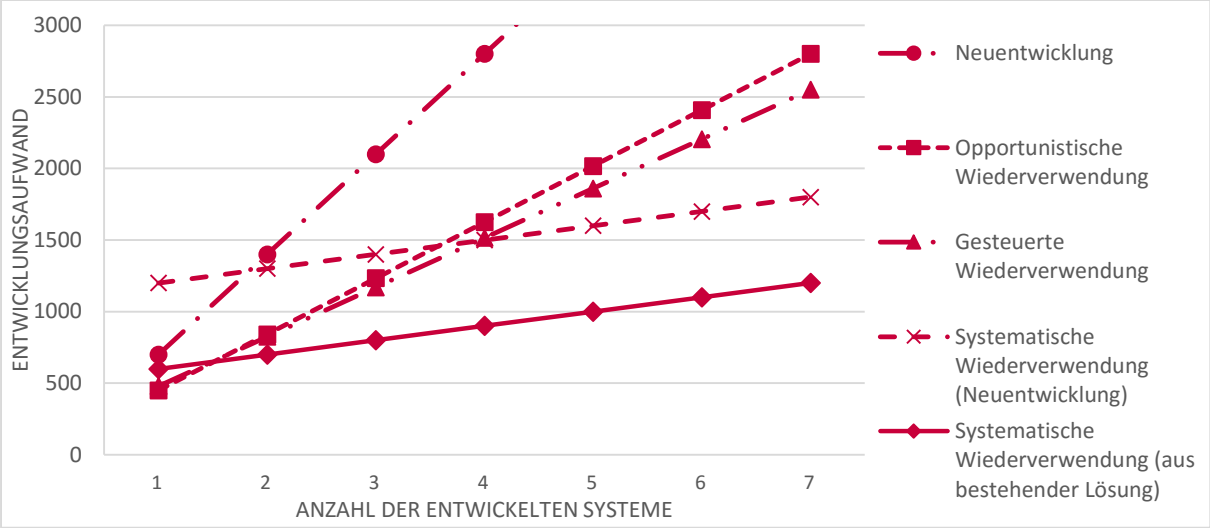

Abbildung 3-2: Kostenorientierter Vergleich verschiedener Wiederverwendungsmechanismen [TGK+04]

Ein alternativer Blick auf die Klassifikation der Wiederverwendung kann [BEU03] entnommen werden: Wird ein Stück Software wiederverwendet, das an den neuen Einsatz angepasst werden muss, um dort die gewünschte Funktion zu erfüllen, so wird dies als „temporal reuse“ bezeichnet. Dies kann der „ad-hoc“ Wiederverwendung zugeschrieben werden. Wird der Einsatz einer Software jedoch präskriptiv derart beschrieben, dass die Software ohne nachträgliche, unsystematische Anpassungen deren Funktion zur Verfügung stellen kann, so wird dies als „functional reuse“ deklariert [BEU03, S. 31F.]. Dieses Vorgehen kann den weiteren Klassifikationen gemäß Tabelle 3-2 zugeschrieben werden.

[7] Die produktlinienbasierte Wiederverwendung ist nach [TGK+04] als systematische Wiederverwendung variabler Artefakte anzusehen. Die dort angebrachte gesteuerte Wiederverwendung wird im Zuge der vorliegenden Arbeit zur opportunistischen Wiederverwendung subsummiert.

3.2.1. Copy, Paste & Modify

Das sogenannte „Copy & Paste", „Copy, Paste & Modify" oder „Clone & Own" stellt die wohl häufigste Art der Wiederverwendung dar [VFS+15, S. 22]. Ein Grund dafür ist, dass nahezu keine Vorarbeiten geleistet werden müssen, das heißt ein bestehendes Artefakt aus einem beliebigen Projekt kopiert und gegebenenfalls verändert werden kann. Diese Art der Wiederverwendung ist darum der „ad-hoc" Wiederverwendung zuzuschreiben. Einen weiteren Grund für die große Verbreitung im Software-Engineering [MAN06, S. 31] wie auch im Engineering von Anlagen [FFV12A, S. 1689], stellt die einfache Verständlichkeit dieses Mechanismus dar. [AAF03, S. 31] beschreiben vor dem Hintergrund des Anlagenengineerings ebenfalls, dass auch dort vorhandene Lösungen kopiert werden, um diese nicht neu entwickeln zu müssen.

Das Kopieren von Bekanntem erfordert lediglich ein sehr geringes Maß an Abstraktion und ist auch aus anderen Bereichen des täglichen Lebens wohl bekannt. [MAN06] definiert für den Bereich des Software-Engineerings fünf Anwendungsfälle, welche einen Entwickler dazu bewegen, diese Art der Wiederverwendung zu wählen, die so allgemein formuliert sind, dass diese auch in anderen Domänen als dem Engineering von Anlagen auftreten können. Diese Anwendungsfälle reichen von dem Wunsch, Teile löschen oder verschieben zu wollen, bis hin zur effizienten Wiederverwendung bestehender Ergebnisse in modifizierter oder nicht modifizierter Form [MAN06, S. 31FF.]. Die erstgenannten Anwendungsfälle liegen somit nicht im Fokus dieser Arbeit.

Das unsystematische Kopieren birgt jedoch, unabhängig von der Domäne, Risiken [VFS+15, S. 22]. So bemängelt [MAN06], dass das reine Kopieren und Einfügen nicht der ursprünglichen Intention dieser Aktivitäten entspräche (vgl. zuvor genannte Anwendungsfälle). Es fehle an geeigneten Möglichkeiten, die zu Grunde liegende Semantik zu dokumentieren [MAN06, S. 31]. Eine solche Dokumentation würde jedoch auch nur die Probleme lösen, die durch Copy & Paste hervorgerufen werden, nicht aber diejenigen, die dem Mechanismus selbst zu Grunde liegen, wie beispielsweise die mangelnde systematische Unterstützung hinsichtlich der methodischen Identifikation der wiederzuverwendenden Elemente. Gleiches gilt für die Ansätze in [LLM+06] oder auch [HJJ09]. Darüber hinaus muss der Anwender ein Spezialist für die als Vorlage genutzte Lösung sein, um diese auch vollständig zu durchdringen und die Eignung dieser verlässlich abschätzen zu können [MAH14, S. 29]. Eine ausführliche Abhandlung bezüglich Copy & Paste kann [MAH14, S. 26FF.] entnommen werden.

Das Copy & Paste stellt folglich einen geeigneten Mechanismus zur unsystematischen Wiederverwendung von kleinen, wenig komplexen Elementen dar, der auch ohne erhebliche, in Vorleistung erbrachte Aufwände möglich ist. Eine Untersuchung von [MAH14] zeigt, dass das Copy & Paste in verschiedenen Ausprägungen und Umfängen von vielen Engineering-Werkzeugen unterstützt wird [MAH14, S. 46FF.]. Gemäß [MAH14] wird Copy & Paste trotz bekannter Risiken aufgrund des geringen Abstraktionsaufwandes und der schnellen Durchführbarkeit häufig angewendet [MAH14, S. 26FF.].

3.2.2. Typ-Instanz-Konzept

Das Typ-Instanz-Konzept ist der Objektorientierten Programmierung zuzuordnen. Hier beschreibt ein Objekt „(…) einen Ausschnitt aus der realen Welt oder eines Modells davon. Ihm sind Merkmale, Merkmalswerte und Operationen zugeordnet. Die Merkmalswerte legen einen Zustand des Objektes fest. Durch die Operationen kann der Zustand ermittelt bzw. verändert werden“ [MoSc92, S. 10]. Die zuvor definierten Objekte können in Klassen gruppiert werden, wobei eine Klasse „Eigenschaften durch Merkmale und Operationen“ [MoSc92, S. 11] beschreibt. „Aus einer Klasse können Objekte abgeleitet werden, sogenannte Exemplare (Anmerkung des Autors: [oder Instanzen]) der Klasse. Sie besitzen die in der Klasse beschriebenen Eigenschaften, das heißt, ihre Merkmale und Operationen“ [MoSc92, S. 11]. Klassen beschrieben folglich den gemeinsamen inhaltlichen Kern ihrer Objekte, wobei dies nach [DIN 81346-1, S. 17ff.] auch der Definition des „Typs“ entspricht, weshalb Typ und Klasse nachfolgend als synonym anzusehen sind. Werden Objekte aus einer Klasse abgeleitet, so wird dieser Vorgang im üblichen Sprachgebrauch als „Instanziierung“ [Ern00, S. 297; Lie03, S. 104] bezeichnet, die in der Regel durch Konkretisierung oder Modifikation erreicht wird [Lie03, S. 104]. Dies erklärt auch die teils abweichende Nomenklatur, wobei „Typ“ der „Klasse“ und die „Instanz“ dem „abgeleiteten Objekt“ entspricht [Tab06, S. 332ff.].

Die Definition von Klassen erleichtert die Erstellung zukünftiger Objekte, da die Objekte nicht von Grund auf neu erstellt werden müssen, sondern aus den Klassen abgeleitet und konkretisiert werden können. Dieser Mechanismus kann sowohl der „ad-hoc“ als auch der opportunistischen Wiederverwendung, eine systematische Vorarbeit vorausgesetzt aber auch der systematischen Wiederverwendung zugeschrieben werden. Nicht zuletzt aufgrund dessen Herkunft ist dieser Mechanismus im Software-Engineering weit verbreitet und wird genutzt, um die Erstellung verschiedenster Objekte zu vereinfachen. Ähnliche Mechanismen werden auch in der Komponentenbasierten Programmierung angewendet, die jedoch nach [WeSo14, S. 310] kaum auf Bereiche außerhalb der reinen Programmierung übertragen werden kann. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf [And03; Lie03; Mat10] verwiesen.

Aber nicht nur in der Objektorientierten Programmierung, auch in der klassischen Konstuktionslehre ist dieses grundsätzliche Vorgehen bekannt. So beschreibt [EKL+13] dieses als „Typisierung“: Dabei werden Lösungsprinzipien abstrahiert und damit in einer breiteren Masse von Anwendungen wiederverwendbar gemacht. Als Beispiel wird in [EKL+13] eine Gasdruckfeder angeführt, die in verschiedenen Anwendungen (z.B. Kofferraumklappe, Lenksäulenverstellung, etc.) verwendet werden kann, um eine *„gedämpfte stufenlose Wegverstellung“* [EKL+13, S. 361f.] zu ermöglichen. Eine Sammlung solcher konstruktiver Prinziplösungen, also Typen, stellt beispielsweise [KoKa98] dar. Im diesbezüglichen Sprachgebrauch wird aber in der Regel nicht von der Instanziierung, sondern eher von Detaillierung oder Anwendung gesprochen.

3.2.3. Templates

Bei Templates handelt es sich um Vorlagen bzw. Schablonen, die genutzt werden, um Informationen strukturiert zur Wiederverwendung bereit zu stellen [UBR05; MAH14]. Templates sind in vielen softwarenahen Bereichen stark verbreitet. So führt [MAH14] nicht nur die Erstellung und Strukturierung von softwarebasierten Lerninhalten, sondern auch Briefvorlagen in gängigen Office-Anwendungen an [MAH14, S. 32]. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Typen, umfassen die Templates einen größeren Umfang und definieren in der Regel insbesondere auch den Zusammenhang zwischen den verwendeten Typen, welche durch ein Template instanziiert werden können.

Aber auch im Bereich der Automatisierungstechnik findet das Konzept der Templates Anwendung: Bedienbilder, welche dem Betreiber einer Anlage zur Steuerung und Beobachtung des Betriebs dienen, werden meistens unterstützt durch Templates erstellt. Hierfür können grafisch ähnliche, oft wiederkehrende Strukturen oder Bildelemente als Templates abgelegt werden. Diese Templates werden in der Regel aus Typen der zu verwendenden Elemente assembliert und so zur Wiederverwendung bereitgestellt. In gewissen Bereichen der Automatisierungstechnik wird auch der Terminus „Typical“ [NA 35, S. 30; UKZ12, S. 43] verwendet, der im nachfolgenden Verlauf der Arbeit synonym zu Template verstanden werden soll.

Verschiedene Anbieter von Engineering-Werkzeugen stellen diese Templates bereits in Form kommerziell angebotener Bibliotheken bereit (vgl. Kapitel 3.2.5). Somit können Templates sowohl zur opportunistischen als auch zur systematischen Wiederverwendung genutzt werden.

[MAH14] weist darauf hin, dass der größte Vorteil der Templates die klare Strukturierung der Information sei, dies aber auch gleichzeitig den größten Nachteil darstelle. Erkennt oder versteht ein Nutzer diese Struktur nicht oder orientiert sich nicht daran, kann das Template nicht angewendet werden. Darüber hinaus stelle es eine Herausforderung dar, die Templates zu aktualisieren und an einen veränderten Kontext (vgl. Kapitel 3.3.2) anpassen zu können [MAH14, S. 33]. Eine ausführliche Abhandlung zum Thema Templates kann [UBR05] entnommen werden.

3.2.4. Pattern

Der Fokus von Pattern (oder auch Mustern) liegt vielmehr auf der Wiederverwendung von Vorgehensweisen und Problemlösungsansätzen als der Wiederverwendung von Daten aus bestehenden (Planungs-)Projekten. Eine vielzitierte Definition der Patterns aus dem Jahr 1977 ist [AIS77] zu entnehmen: „*Each pattern describes a problem which occurs over and over again in our environment, and then describes the core of the solution to that problem, in such a way that you can use this solution a million times over, without ever doing it the same way twice*“ [AIS77, S. x]. Diese Definition, welche entsprechend der Quelle aus dem Städtebau stammt, stellt deutlich hervor, dass Patterns eine generalisierte Beschreibung eines Problemlösungsansatzes darstellen und folglich (vgl. letzter Nebensatz des obigen Zitats) an konkrete Probleme und die damit einhergehenden Herausforderungen angepasst werden müssen. Patterns können folglich genutzt werden, um opportunistische, aber auch systematische Wiederverwendung zu betreiben. Insbesondere im Hinblick auf die „*core assets*“ (vgl. Kapitel 3.1.4), also die gemeinsamen Anteile einer Produktlinie, ist die Anwendung der Pattern auch im Rahmen der produktlinienbasierten Wiederverwendung möglich [CLNO12, S. 36F.].

[GOL11] stellt heraus, dass trotz des Ursprungs der Patterns im Städtebau die Verbreitung dieses Mechanismus in der Objektorientierten Programmierung weitreichender ist [GOL11, S. 664]. Der Autor weist jedoch darauf hin, dass die Anwendung von Patterns nur dort geschehen solle, wo diese *„auch sinnvoll sind und Vorteile bringen“* [GOL11, S. 667]. Diese Empfehlung macht deutlich, dass Patterns zwar einen generalisierten Problemlösungsansatz darstellen, dieser aber auch zur Art des Problems passen muss. Diese starke Fokussierung auf das zu lösende Problem wird auch in [JRL00, S. 25] unterstrichen. Zielgerichtete Abhandlungen hinsichtlich der Anwendung von Patterns können bezüglich der Wirtschaftsinformatik in [SCH06], der Objektorientierten Programmierung in [GOL11], des Product-Lifecycle-Managements in [BUN09] sowie der Automatisierungstechnik in [MAH14] (vgl. Kapitel 4.1.8) gefunden werden. [BUN09] bietet darüber hinaus eine ausführliche Übersicht möglicher Pattern-spezifischer Beschreibungssprachen.

3.2.5. Bibliotheken

Geht man davon aus, dass wiederverwendbare Elemente (Klassen, Templates, Patterns/Muster, etc.) vorliegen, so stellt sich die Frage, wie diese Elemente dem späteren Anwender bzw. Entwickler zur Verfügung gestellt werden können, sodass dieser sie nachvollziehbar, systematisch und bestenfalls auch einfach auffinden kann. Im Software-Engineering ebenso wie auch in der Automatisierungstechnik wird dies in der Regel über verschiedene Bibliotheken gelöst [AAF03, S. 33]. Dabei ist nicht entscheidend, wie diese Bibliotheken technisch implementiert sind, ob diese also als Datenbank oder ähnliches ausgeführt sind. Vielmehr ist es das Grundprinzip, die Auffindbarkeit vorgedachter und im Voraus entwickelter Elemente sowie deren Merkmalen und Merkmalsausprägungen sicherzustellen. Folglich können diese Bibliotheken – je nach Ausgestaltung und methodischer Einbindung – sowohl die opportunistische als auch die systematische Wiederverwendung unterstützen.

In nahezu allen aktuellen Engineering-Werkzeugen sind mittlerweile Bibliotheken implementiert, welche es ermöglichen Gerätedaten oder Softwarefunktionen bereitzustellen [MAH14]. Dabei können die Softwarefunktionen von der einfachen booleschen Operation bis hin zur Regelung ganzer Geräte reichen. Dem Kunden wird so erlaubt, das Produkt „Engineering-Werkzeug“ optimal an seine Bedürfnisse anzupassen [AND97, S. 14].

Bei der Arbeit mit Bibliotheken muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Anzahl der enthaltenen Elemente nicht über die Maßen steigt [AAF03, S. 33]. Dies kann der Fall sein, wenn jeder Mitarbeiter die Berechtigung hat, wiederverwendbare Elemente in die Bibliothek aufzunehmen. Dem ist zum einen durch eingeschränkte Berechtigungen, zum anderen aber auch durch einen intelligenten Aufbau der gespeicherten Elemente vorzubeugen. Ansätze, welche auf der Verwendung von Bibliotheken beruhen finden sich auch in Kapitel 4.1.

3.3. Variabilität und Wiederverwendung

Die Anforderungen an Produkte, unabhängig davon, ob es sich um Endverbraucherprodukte oder Investitionsgüter wie automatisierte Anlagen handelt, können von Kunde zu Kunde stark voneinander abweichen. Dies hat zur Folge, dass Produkte entweder kundenindividuell entwickelt werden, wie es auch im Anlagenbau der Fall ist, oder Produkte schon während der Entwicklung mit Variabilität versehen werden, um nachträglich an Kundenwünsche angepasst zu werden. Folglich kann Variabilität als eine Möglichkeit verstanden werden, um a) Kundenwünsche besser oder mit weniger Aufwand erfüllen zu können und b) mit weniger wiederverwendbaren Einheiten die gleiche Anzahl an kundensichtbaren Produkten zu realisieren, indem eine Neukombination bestehender Bausteine vorgenommen wird (vgl. Kapitel 3.1.2). Neben dieser Flexibilitätssteigerung führt [MON05, S. 16] an, dass Variabilität bei geeigneter Implementierung in die Prozesse der Organisation dazu führen kann, das innerbetriebliche Änderungswesen zu vereinfachen. Als Grund hierfür wird die explizite Auseinandersetzung mit den Kundenwünschen sowie den resultierenden Auswirkungen auf die Produkte angeführt [MON05].

Der Umgang mit Variabilität stellt ein Forschungsfeld dar, das im Bereich der Produktentwicklung vor betriebswirtschaftlichem [HEI99; LÖS01; DEL06; BUC12] wie auch technischem Hintergrund [ERER99; KIP12; EKL+13], insbesondere aber im Bereich des Software-Engineerings [MEN01; BFG+02; BEU03; PBL05; CLNO12; CBK13] vorangetrieben wird. Die nachfolgenden Abschnitte dienen der Erläuterung der Begrifflichkeiten sowie des Prinzips der Variabilität. Dafür wird gemäß der Differenzierung nach [PORU11, S. 21FF.] vorab die Variabilität im System (also dem Produkt selbst) und dann die Variabilität im Kontext (also der relevanten Umgebung des Produktes) beschrieben. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über aktuelle Ansätze zur Modellierung von Variabilität.

3.3.1. Variabilität: Begriffe und Definitionen

Aufgrund der Vielfalt der verschiedenen Forschungsaktivitäten im Bereich des Variantenmanagements ist es unerlässlich, nachfolgend die zentralen Begriffe für den weiteren Verlauf dieser Arbeit zu definieren.

Variante: Die verschiedenen Definitionen des Begriffs Variante weichen zwar teilweise nur in Nuancen ab, spiegeln aber dennoch wider, in welch vielfältige Bereiche der Forschung und Industrie das Thema Variantenmanagement reicht. Sehr grundsätzlich definiert [DIN 199-1] Varianten als *„Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“* [DIN 199-1, S. 15]. Diese Definition ist jedoch sehr auf die rein bauliche Struktur der Varianten fokussiert und thematisiert in keiner Weise die Funktion(en) einer Variante. Diesen Aspekt greift [FHH+02] auf und definiert: *„Eine Variante eines Technischen Systems ist ein anderes Technisches System gleichen Zwecks, das sich in mindestens einer Beziehung oder einem anderen Element unterscheidet. Ein Element unterscheidet sich von einem anderen Element in mindestens einer Eigenschaft*“ [FHH+02, S. 12]. Herauszuheben ist an dieser Stelle, dass diese Definition zwar den Zweck bzw. die Funktion des „Technischen Systems“ bzw. des Produktes thematisiert, dieser Zweck aber lediglich als gemeinsamer Nenner verschiedener Varianten angesehen wird. Folglich sind Varianten anhand dieser Definition dadurch gekennzeichnet, dass sie dieselbe Funktion erfüllen. Diese

eingeschränkte, eher auf die Konstruktion bezogene, Definition ist also für Systeme, welche gerade auch aus funktionalen Gründen variieren können, als ungeeignet zu erachten.

Nach einer sehr ausführlichen Diskussion der Thematik Variabilität sowie der Bedeutung des Begriffes Variante [BUC12, S. 9FF.] kommt [BUC12] zu dem Schluss, dass die *„Abgrenzung der Varianten (…) subjektiv und relativ“* [BUC12, S. 14] erfolgt. Es bedarf folglich der konkreten Bezugnahme auf die organisationsspezifischen Rahmenbedingungen, um Varianten definieren zu können. So definiert [DEL06] aus Sicht eines produktlinienbasierten Ansatzes eine Variante als einzelnen Vertreter eine Produktfamilie [DEL06, S. 47]. Diese Definition ist insbesondere für konstruktionsorientierte Arbeiten interessant, da [VBH+09] die Variante als Ergebnis einer Variantenkonstruktion, also dem systematischen oder unsystematischen Konstruieren einer neuen Variante aus bestehenden Lösungen, definiert. In [VBH+09] wird argumentiert, dass sich aufgrund immer kürzerer Innovationszyklen der Anteil dieser sogenannten Variantenkonstruktionen zu Gunsten von Neu- und Anpassungskonstruktionen weiter reduzieren würde [VBH+09, S. 27]. Dieser Argumentation ist allerdings, vor dem Hintergrund der großen Verbreitung produktlinienbasierter Ansätze im Software-Engineering oder auch der Definition nach [DEL06], nur schwer zu folgen: Viel mehr ist zu erwarten, dass die systematische Entwicklung variabler Produktlinien zunimmt, die eine systematische und effiziente Ableitung kundenindividueller Produkte, also Varianten, ermöglicht.

Basierend auf diesen Erkenntnissen soll für den weiteren Verlauf dieser Arbeit eine Variante verstanden werden als die Ausprägung einer Produktlinie, die wesentliche Merkmale technischer, funktionaler oder struktureller Art der Produktlinie übernimmt, sich jedoch in mindestens einer Eigenschaft und/oder Merkmalsausprägung von den anderen Ausprägungen der Produktlinie unterscheidet. Dabei ist unerheblich, ob es sich um ein physisches oder nichtphysisches Produkt, einen Teil dessen oder um Planungsartefakte handelt.

Zu ergänzen ist an dieser Stelle, dass verschiedene Varianten einer Produktlinie zeitgleich bestehen und auch zeitgleich gültig sein können, wohingegen der oft fälschlicherweise synonym verwendete Begriff der „Version“ Ausprägungen (auch einer Produktfamilie) beschreibt, die zu verschiedenen Zeitpunkten Gültigkeit besitzen [LAPO05, S. 65FF.; FEVO13, S. 99F.]. Eine Version stellt demzufolge aus Sicht des Kunden eine zeitliche Weiterentwicklung, nicht aber eine Ausprägung gemäß seiner spezifischen Anforderungen dar [PBL05, S. 65].

<u>Arten von Varianten:</u> Wie bereits im vorigen Abschnitt zur Definition des Begriffes Variante deutlich wird, existieren verschiedene Sichtweisen auf die Thematik der Varianten. Eine ausführliche und oft zitierte Übersicht an Typen von Varianten ist in [HEI99] angeführt. Dort werden Varianten unter anderem differenziert nach der Auftrittshäufigkeit, technischer und struktureller Kriterien, der Festlegung der Varianten sowie der subjektiven Wahrnehmung [HEI99, S. 6]. Diese weitreichende und vielschichtige Betrachtung führt jedoch im Rahmen dieser Arbeit zu weit, sodass nachfolgend die Unterteilung nach [ZWMO05], die auch von [LUT11] aufgegriffen wird, herangezogen und geringfügig erweitert wird. Dort wird in Struktur-, Teile- und Mengenvarianten [ZWMO05, S. 36F.] unterschieden, im Rahmen dieser Arbeit soll aber explizit auch eine Funktionsvariante eingeführt werden, um dem Funktionsaspekt Rechnung zu tragen (vgl. Abbildung 2-3).

Entsprechend dieser Argumentation werden die nachfolgenden Typen von Varianten vorgesehen. Die Definitionen repräsentieren zweckgebundene Detaillierungen der zuvor angebrachten Definition der Variante:

Strukturvarianten stellen technische Systeme gleicher Funktion dar, welche bezüglich ihrer Struktur abweichen. Dabei kann es sich sowohl um einen alternativen hierarchischen Aufbau, aber auch eine abweichende Struktur innerhalb einer gleichbleibenden Hierarchie handeln.

Teilevarianten stellen technische Systeme gleicher Funktion und Struktur dar, welche in Bezug auf die verwendeten Teile (in physischem wie nichtphysischem Sinne) variieren.

Mengenvarianten stellen technische Systeme gleicher Funktion dar, welche in Bezug auf die Anzahl der verwendeten Teile variieren.

Funktionsvarianten stellen technische Systeme dar, welche trotz eines Großteils an gemeinsamer Funktionalität hinsichtlich mindestens einer Funktion voneinander abweichen.

Es ist festzustellen, dass diese Variantendefinitionen nicht disjunkt sind, vielmehr geht es darum, den zentralen Treiber der Variabilität, wie sie in [ERI98] angeführt sind, explizit zu machen.

Variabilitätssubjekt und -objekt sowie Variationspunkt: Im Bereich des Software-Engineerings wird angestrebt, mittels abstrakter Modelle die Variabilität adäquat zu beschreiben. Ziel ist es, mittels definierter Terminologie ausdrücken zu können, ob sich die Variabilität im realen Produkt oder in dessen Repräsentation (in Form von Modellen und Artefakten) befindet und wie diese zusammenhängen.

So wird nach [LAPO05] das „Variabilitätssubjekt“ als variabler Anteil oder variable Eigenschaft eines Realweltgegenstands bezeichnet [LAPO05, S. 60]. Das Variabilitätssubjekt beschreibt folglich *was* variiert. Als Beispiel hierfür kann die Farbe oder der Motor eines KFZ angesehen werden. Ergänzend dazu wird das „Variabilitätsobjekt“ definiert, welches die zugehörigen Ausprägungen des Variabilitätssubjektes darstellt [LAPO05, S. 60]. Folglich beschreibt ein Variabilitätsobjekt *wie* ein Variabilitätssubjekt variiert. Im Falle des angeführten Variabilitätssubjektes „Farbe“ wären mögliche Beispiele für Variabilitätsobjekte „rot“, „gelb“ und „grün“, im Falle des Motors hingegen „Ottomotor“ oder „Dieselmotor“, wobei in der Praxis detailliertere Ausprägungen die Regel sind.

Diese Differenzierung erscheint auf den ersten Blick künstlich und wenig eingängig, erlaubt aber in der weiterführenden Auseinandersetzung mit dem Thema Variabilität eine dezidierte Benennung der kausalen Zusammenhänge.

Ergänzend zu der angeführten Definition des Variabilitätssubjektes, das den real variierenden Gegenstand oder dessen Eigenschaft beschreibt, wird in [PBL05] auch der „Variationspunkt“ als Repräsentation dieses Variabilitätssubjektes in Modellen und Artefakten definiert, die durch Kontextinformationen (vgl. Kapitel 3.3.2) angereicht wird [LAPO05, S. 61F.]. Dies deckt sich auch weitgehend mit der Definition nach [JGJ97, S. 99], wonach ein Variationspunkt eine oder mehrere abstrakte Stellen innerhalb eines Produktes darstellen, in denen Variabilität auftritt. Abbildung 3-3 zeigt den Zusammenhang von Variabilitätssubjekt/-objekt, Variationspunkt sowie Variante.[8] Es

[8] Ein Variationspunkt kann als variabilitätsrelevantes Merkmal und die Variante (eines Variationspunktes) als die Ausprägung von variabilitätsrelevanten Merkmalen angesehen werden [VDI 2218].

entspricht der terminologischen Definition nach [LAPO05, S. 63], dass die Ausprägung eines Variationspunktes als Variante bezeichnet wird. Diese strikte Beschränkung des Begriffes „Variante“ auf die Modellwelt ist jedoch nicht praktikabel. Da darüber hinaus reale Systeme nicht derart trivial strukturiert sind,[9] wird auch nachfolgend der Begriff „Variante“ für die konkrete Ausprägung eines Produktes in Real- und Modellwelt stehen, welche auch mehr als einen Variationspunkt aufweisen kann. Weiterführende Informationen können [JGJ97] oder [LAPO05] entnommen werden.

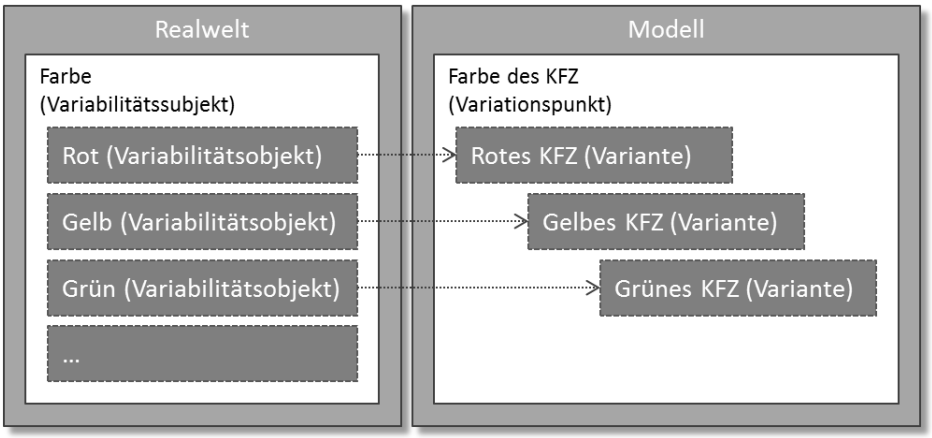

Abbildung 3-3: Beispiel für Variabilitätssubjekt und -objekt sowie Variationspunkt nach [LAPO05, S. 63]

Externe und interne Variabilität: Die Differenzierung zwischen externer und interner Variabilität wird in verschiedenen Arbeiten aus dem Bereich der Produktentwicklung [AND97; BLE11] und des Software-Engineerings [PBL05] erläutert und geprägt. Hierbei sind die Abweichungen der verschiedenen Definitionen voreinander als gering zu bezeichnen, wobei in [PBL05] und [BLE11] der Gedanke weitergeführt wird und auch die Entwicklung von externer und interner Variabilität über die Zeit der Entwicklung beleuchtet wird [LAPO05, S. 71F.; BLE11, S. 65].

Gemeinhin wird Variabilität als extern bezeichnet, wenn diese aus Sicht des Kunden wahrnehmbar ist. Ein eingängiges Beispiel für externe Variabilität sind die verschiedenen Optionen, die ein Kunde bei der Konfiguration eines PKW wählen kann (z.B. Farbe, Motorisierung, Ausstattungspakete etc.). Die externe Variabilität wird in [AND97] weiter in nützliche und nutzlose Variabilität differenziert [AND97, S. 45]. Diese Unterscheidung wird vorgenommen, da nicht jede mögliche Merkmalsausprägung oder Option auch zu einem höheren Kundennutzen führt oder aber der Mehrwert dieser Variabilität so gering ist, dass dieser den Mehraufwand, um die Variabilität bereitzustellen, nicht aufwiegt. Gemäß des zuvor angeführten Beispiels stellt die Auswahl verschiedener Motor- und Getriebevarianten meistens nützliche Variabilität dar, da es so ermöglicht wird, Anforderungen verschiedener Kundengruppen (z.B. sportlicher oder defensiver Fahrer) bestmöglich zu erfüllen. Als Beispiel nutzloser Variabilität wird in [AND97, S. 45] angeführt, dass ein KFZ-Hersteller 87 externe Varianten von Lenkrädern angeboten hatte, wohingegen 70 davon nur in ca. 5 % der Bestellungen gewählt wurden. Folglich genügten ca. 20 % der Varianten, um 95 % der Nachfragen zu erfüllen. Geht man davon aus, dass der Aufwand, die übrigen 80 % zu unterhalten und zu warten, größer ist als der Aufwand, 5 % der Nachfrage individuell zu bedienen, stehen Nutzen und Aufwand in einem ungünstigen Verhältnis. Es ist anzumerken, dass es

[9] Würden anstelle des einzelnen Variationspunktes „Farbe des KFZ“ auch weitere (z.B. „Motor des KFZ“) betrachtet, würde dies zu einer Potenzierung der Variantenzahl führen [GÖP98, S. 42].

Sonderfälle geben kann, in denen es aus anderen Gründen sinnvoll sein kann, solch exotische Varianten vorzuhalten. Ein Beispiel ist das Aufzeigen neuer Technologien oder das Abdecken strategisch wichtiger Marktnischen.
Interne Variabilität hingegen beschreibt diejenigen variablen Anteile eines Produktes, die von durchschnittlichen Kunden nicht unmittelbar wahrgenommen werden können oder auch dürfen. Hintergrund des erstgenannten Falles ist, dass Kunden sich meist nicht mit den detaillierten technischen Fragestellungen auseinandersetzen möchten, sondern eher an den übergeordneten Anforderungen interessiert sind. Im zweiten Fall kann ein Unternehmen Interesse daran haben, die Realisierung der Kundenanforderungen nicht zwingend explizit zu machen, sodass diese als interne Variabilität „versteckt“ wird (z.B. zum Zwecke des Know-how-Schutzes). Ein Beispiel für diese Art der Variabilität stellt eine konzernweite Plattform in der Automobilindustrie dar. Diese wird genutzt, um Entwicklungszeiten bei hoher Varianz der Endprodukte zu reduzieren. Jedoch besteht nach [COR02, S. 74F.] die Gefahr, Kunden würden weniger der hochpreisigen Produkte kaufen, wenn sich die Meinung manifestiert, dass diese aus den gleichen Elementen bestehen wie die günstigeren Produkte.

In Bezug auf das Engineering automatisierter Anlagen fällt die Differenzierung zwischen interner und externer Variabilität nicht so leicht, wie es in den zuvor angeführten Beispielen der Fall ist. Ein Grund hierfür ist, dass die möglichen Rollen, also Anlagenbetreiber und Anlagenbauer, nicht disjunkt trennbar sind, da beispielsweise auch der Anlagenbetreiber im Betrieb der Anlage teils noch Änderungen oder eine Optimierung der Anlage vornimmt, die ein detailliertes Wissen über den technischen Aufbau der Anlage erfordern. Nichts desto trotz kann diese Differenzierung in zweierlei Hinsicht genutzt werden: Zum einen kann so die Einordnung bestehender Ansätze und deren Fokus vorgenommen werden, zum anderen erlaubt diese Differenzierung, im Rahmen der Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten explizit zu machen, aus welchen Gründen Variabilität vorgesehen wird.

Variantenmanagement: Der geeignete und verhältnismäßige Umgang mit den Varianten wird als „Variantenmanagement“ bezeichnet und beispielsweise von [FHH+02] basierend auf [MEN01] definiert als „alle Steuerungsvorgänge zur Optimierung der Variantenvielfalt und zur Beherrschung der Auswirkungen variantenreicher Produktspektren“ [FHH+02, S. 12]. Das Variantenmanagement umfasst folglich nicht nur die Variabilität innerhalb der Produkte und Modelle, sondern darüber hinaus auch die damit einhergehenden Prozesse des gesamten Produktlebenszyklus. [EKL+13] führt außerdem an, das Variantenmanagement diene der Fokussierung auf nötige Varianten, dem Erkennen und Reduzieren unnötiger Varianten sowie der Verringerung der Zeiten für Entwicklung und Fertigung sowie den damit einhergehenden Kosten [EKL+13, S. 294F.]. Somit lässt sich zusammenfassen, dass das Varianten-management zur Aufgabe hat, die positiven Auswirkungen von Variabilität zu maximieren und dabei die negativen Auswirkungen zu reduzieren.
Obgleich der Terminus „Variabilitätsmanagement“ die zu Grunde liegenden Sachverhalte treffender wiedergibt, wird auch nachfolgend der verbreitete Begriff des Variantenmanagements verwendet. Weiterführende Informationen können [NEU03, S. 59FF.; HEHU13, S. 395FF.] sowie [EKL+13, S. 294FF.] entnommen werden.

3.3.2. Variabilität im Kontext des Systems

Der vorige Abschnitt thematisierte die grundlegenden Definitionen und Begriffe hinsichtlich der Variabilität innerhalb eines Systems, also beispielsweise eines Produktes oder Anlageteils. Der vorliegende Abschnitt beschreibt im Gegensatz dazu die Variabilität im Kontext des Systems. Aktuelle Forschungsarbeiten wie [HKC15] stellen den Zusammenhang zwischen eben dieser Variabilität und dem aus dem Requirements-Engineering bekannten Systemkontext, beispielsweise nach [PoRu11], her. So stellt [HePo14] heraus, dass in den Arbeiten um [ClNo12] die Variabilität des Systems zwar explizit berücksichtigt wird, die Variabilität des Kontextes hingegen keine explizite Berücksichtigung findet [ClNo12, S. 190].

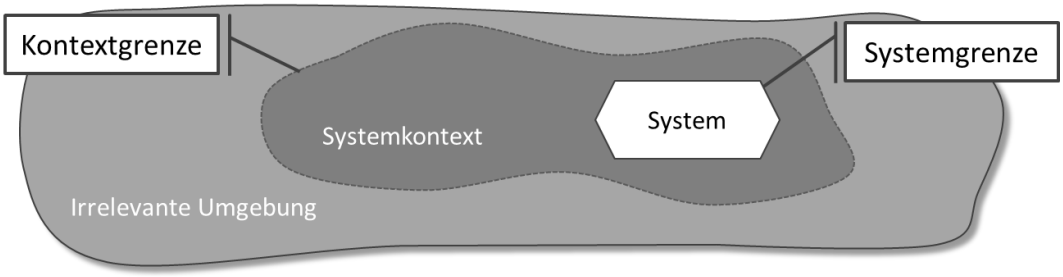

Abbildung 3-4: System, Systemkontext und Umgebung nach [PoRu11, S. 23]

In [Beu03] wird die Bedeutung des Kontextes für die Wiederverwendung herausgestellt: Wird ein System gezielt für die Wiederverwendung entwickelt, so bedarf es einer adäquaten Abschätzung hinsichtlich der erforderlichen Systemfunktionen, aber insbesondere auch des zukünftigen Kontextes des Systems [Beu03, S. 31f.]. Diese Präskription stellt nach [Beu03] das Differenzierungsmerkmal zum sogenannten „temporal reuse“ [Beu03, S. 32] dar (vgl. Kapitel 3.2), der jedoch eher im Bereich der zeitlichen Evolution von Systemen Anwendung findet und folglich nicht im Fokus dieser Arbeit steht. Wie in Abbildung 3-4 ersichtlich, ist nach [PoRu11] „der Systemkontext (…) der Teil der Umgebung eine Systems, der für die Definition und das Verständnis der Anforderungen des betrachteten Systems relevant ist.“ [PoRu11, S. 21]. Diese Definition zeigt nicht nur die deutliche Einordnung dieser Thematik in das Requirements-Engineering, sondern betont auch den engen Zusammenhang zwischen Kontext und den Anforderungen an ein System. Als Beispiele für Aspekte innerhalb des Kontextes werden Personen, interagierende Systeme und Prozesse, Ereignisse und Dokumente angeführt [PoRu11, S. 22]. Dabei wird aber deutlich, dass die Definition der Grenze zwischen dem Kontext und der irrelevanten Umgebung essentiell wichtig, gleichermaßen aber auch schwer zu treffen ist. Wird der Kontext zu weit gefasst, werden unnötige und gegebenenfalls irrelevante Anforderungen berücksichtigt. Werden Teile des Kontexts hingegen vernachlässigt, entgehen Anforderungen, die für die korrekte Funktion des technischen Systems relevant sein können. Für detaillierte Informationen hinsichtlich der Definition sowie des Umgangs mit dem Kontext sei an dieser Stelle auf [Wey11] sowie auf [PoRu11, S. 21ff.] verwiesen. Eine beispielhafte Anwendung des Kontextgedankens auf automatisierte Anlagen kann [SZH+13*] entnommen werden.

Wird anstelle eines invariablen Produktes eine Produktlinie, also ein variabler Entwicklungsgegenstand, betrachtet, führt dies zu der Frage, ob Variabilität im Produkt immer aus Variabilität im Kontext resultiert und welche generellen kausalen Zusammenhänge zwischen der Variabilität im Kontext und der Variabilität des Produktes vorliegen. Diese Fragestellungen liegen zwar nicht im Fokus der

vorliegenden Arbeit, stellen aber ein interessantes Forschungsfeld dar, das auch Auswirkungen auf Wissenschaftsgebiete außerhalb des Requirements- und Software-Engineerings aufweist und unter anderem in [HEPO14; HKC15] behandelt wird. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass auch der Kontext variieren kann und dies – der vorigen Definition folgend – Auswirkungen auf das technische System bzw. die Produktlinie hat. Ein Beispiel kann ein mobiles Navigationsgerät sein, das in Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Stromversorgungen und von verschiedenen Personengruppen bzw. Stakeholdern wie beispielsweise technisch versierten oder unerfahrenen Anwendern betrieben wird. Eine beispielhafte Darstellung dieser Variationspunkte findet sich in Abbildung 3-5.

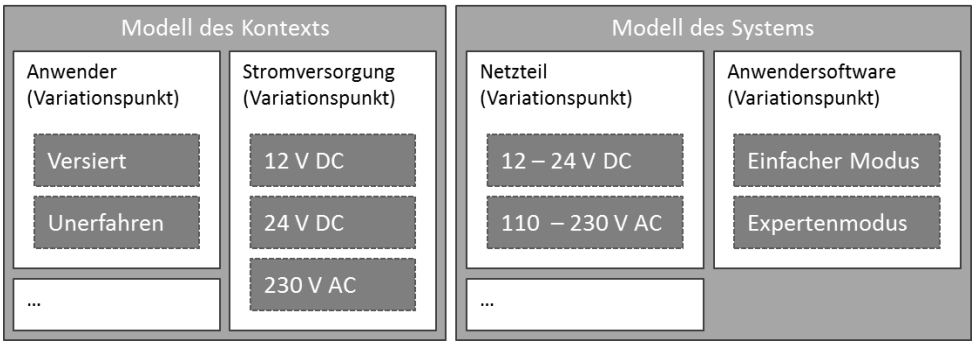

Abbildung 3-5: Beispielhafte Variationspunkte im Modell des Kontexts sowie des Systems

Anhand des einfachen Beispiels in Abbildung 3-5 wird ersichtlich, dass die explizite Modellierung der Variabilität im Kontext dazu führen kann, die benötige Variabilität im System, also die mögliche Bandbreite bereitzustellender Funktionen und Eigenschaften, deutlich zu machen. Gemäß der abgebildeten Variationspunkte kann der Variabilität des Kontextes und damit auch den daraus resultierenden Anforderungen entsprochen werden, da diese über Ausprägungen der Variationspunkte im Modell des Systems bzw. den daraus kombinatorisch resultierenden Varianten realisiert werden können. Es ist anzumerken, dass seitens des Modells nicht definiert ist, ob die vorhandene Variabilität auch im verkauften Produkt noch vorliegen muss (Kunde kann zwischen einfachem und Expertenmodus wechseln) oder ob diese bereits bei der Entwicklung gebunden wird (Produkt wird nur mit AC- oder DC-Netzteil verkauft) [BFG+02]. Dies sind weitgehend Entscheidungen des Produktmanagements, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden kann.

3.3.3. Modellierung von Variabilität

Das einfache Beispiel des vorigen Kapitels (vgl. Abbildung 3-5) zeigt bereits, dass eine geringe Anzahl von Variationspunkten in den Modellen von Kontext und System zu einer Vielzahl von Abhängigkeiten und daraus resultierenden Varianten führen kann. Bei nicht vereinfachten Produkten oder Anlagen realen Umfangs führt dies schnell dazu, dass die Variabilität nicht mehr zu handhaben ist. [LAPO05] führt darüber hinaus an, dass es drei hauptsächliche Gründe für das explizite Modellieren der Variabilität gibt:

- eine verbesserte *Entscheidungsfindung*, da die Entwickler dazu gezwungen werden, Begründungen und Zusammenhänge zu dokumentieren,
- eine verbesserte *Kommunikation* hinsichtlich der Variabilität auch gegenüber Kunden,
- eine verbesserte *Nachvollziehbarkeit* der Variabilität, also ob ein Variationspunkt als Ursache oder als Auswirkung von Variabilität angesehen werden kann [LAPO05, S. 73F.].

Folglich müssen diese Modelle nicht nur eine formale Basis bieten, sondern vor allem auch für Entwickler und Kunden verschiedener Domänen nachvollziehbar und verständlich sein. Aufgrund dessen kommt eine rein mathematische Modellierung, wie sie beispielsweise in der theoretischen Modellbildung angewendet wird [VBH+09, S. 135FF.], nicht in Frage. Im Nachfolgenden liegt der Fokus daher auf den gängigen Arten der Variabilitätsmodellierung. In einer ausführlichen Abhandlung hinsichtlich Vielfalt im Bereich der Software werden in [SRC+12] verschiedene Ansätze der Variabilitätsmodellierung angeführt und systematisch eingeteilt. Hierbei wird in einem ersten Schritt unterschieden zwischen Variabilität des Problemraums, die in Anforderungen und Funktionen auftritt, sowie Variabilität des Lösungsraumes, die in Komponenten, Artefakten oder der Dokumentation auftritt. Diese Einteilung ermöglicht die Differenzierung zwischen der funktionsorientierten Struktur eines Systems im Problemraum und der technischen Struktur eines Systems im Lösungsraum und unterstützt so die konsequente Funktionsorientierung. Die Differenzierung zwischen Problem- und Lösungsraum weist ähnliche, wenn auch weitreichendere Kriterien auf, wie die produktorientierte Differenzierung zwischen Funktions- und Produktstruktur, welche in Abbildung 3-1 abgebildet ist. Eine detaillierte Abhandlung bezüglich Problem- und Lösungsraum kann [CZEI99] entnommen werden.

Um Variabilität zu modellieren, wird im Problemraum zwischen merkmalbasierten[10] und entscheidungsbasierten Ansätzen, im Lösungsraum hingegen zwischen annotativen, kompositionellen sowie transformativen Ansätzen unterschieden. Darüber hinaus muss betrachtet werden, wie die Variabilitätsmodelle zwischen Problem- und Lösungsraum verknüpft werden, um ein ganzheitliches Bild bezüglich der Variabilität eines Systems zu gewährleisten.

<u>Variabilität im Problemraum:</u> Die am weitesten verbreiteten Ansätze zur Modellierung von Variabilität im Problemraum sind merkmalbasierte Ansätze. Diese Merkmalmodelle (oder „Feature-Models“) repräsentieren die kundensichtbaren Eigenschaften eines Systems, wie auch die möglichen Kausalitäten, die zwischen diesen Eigenschaften vorliegen. Die Modelle bestehen aus verpflichtenden, optionalen und alternativen Merkmalen sowie den Relationen zwischen den Merkmalen [KCH+90@; REHA09, S. 363FF.; BSR10]. So wird es ermöglicht, variable Eigenschaften und Fähigkeiten eines Systems

[10] Entgegen des englischen Begriffes „feature-oriented“ (vgl. [SRC+12]) wird nachfolgend der deutsche Terminus „merkmalbasiert“ in Anlehnung an [VDI 2218] verwendet.

abzubilden und Plausibilitätsprüfungen hinsichtlich der Variabilität durchzuführen. Auch in der Entwicklung technischer Systeme können merkmalbasierte Ansätze als bewährt angesehen werden [VDI 2218; VBH+09, S. 189]. Ansätze zur Erstellung hierarchischer Modelle [REWE07] ermöglichen die Verknüpfung verschiedener Modelle oder Teilmodelle und erlauben somit einen effizienten Umgang auch mit komplexen und/oder umfangreichen Modellen. Weiterführende Informationen hinsichtlich der Grundlagen der Merkmalmodellierung können [KCH+90@] sowie (mit einer möglichen Anwendung im Bereich des Software-Engineerings) [ABK+13] entnommen werden. Eine ausführliche Beschreibung der grundlegenden Mechanismen, Abbildungsregeln und möglicher Prüfungstechniken sind [BSR10] zu entnehmen.

Darüber hinaus existieren entscheidungsbasierte Ansätze, um die Variabilität im Problemraum abzubilden. Hierbei kommen Entscheidungsbäume oder -tabellen zum Einsatz, um meist aus Kundensicht die Entscheidungen zu definieren, die nacheinander getroffen werden müssen, um ein Produkt eindeutig zu spezifizieren [SRC+12, S. 479]. Dieser Ansatz impliziert einen sequenziellen Charakter der zu treffenden Entscheidungen, obgleich hierbei weitere Kausalitäten vorliegen können.

Variabilität im Lösungsraum: Die Modellierungsansätze der Variabilität im Lösungsraum werden dahingehend unterschieden, wie ein singuläres Produkt (bzw. dessen Konfiguration) aus den Variabilitätsmodellen abgeleitet wird.

Bei den annotativen Ansätzen repräsentiert ein Modell sämtliche Variabilität einer Produktlinie und wird auch „150%-Modell“ [SRC+12, S. 480] genannt. Um ein konsistentes Produkt (bzw. eine Variante) abzuleiten, müssen alle nicht benötigten Anteile des Modells entfernt werden. Die Kennzeichnung dieser entfernbaren Anteile geschieht in der Regel mittels formaler oder semiformaler Modellierungsansätze oder auch UML-Stereotypen. Hierbei müssen die Varianten eindeutig spezifiziert sowie mit Informationen versehen werden, wann deren Anwendung als sinnvoll zu erachten ist. Ein weiterer Ansatz ist das „Orthogonale Variabilitätsmodell“ nach [LAPO05, S. 74FF.], welches die Variabilität, die in den Planungsartefakten vorhanden ist, an zentraler Stelle abbildet. Dies erlaubt zwar eine gebündelte Abbildung der Variabilität, geht aber auch mit hohen Anforderungen hinsichtlich der Konsistenz zwischen den Variabilitätsmodell und Entwicklungsartefakten einher.

Im Gegensatz zu den annotativen Ansätzen wird bei den kompositionellen Ansätzen das gegenteilige Prinzip angewendet: Hier werden Modelle und Modellteile zusammengeführt, um ein konsistentes Produkt zu erarbeiten. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass die Modellelemente auch zusammengefügt werden können, um die Nacharbeit an den Schnittstellen zu reduzieren. Daher erfordern rein kompositionelle Ansätze klar definierte Rahmenbedingungen und Schnittstellendefinitionen, um das Zusammenführen zu ermöglichen. Eine Übersicht möglicher kompositioneller Ansätze kann [SRC+12, S. 482] entnommen werden.

Entgegen den eindeutig auf Reduktion oder Komposition ausgerichteten Variabilitätsmodellierungsansätzen erlauben die transformativen Ansätze eine Kombination dieser beiden Vorgehensweisen bzw. Blickrichtungen. So werden über definierte Transformationsregeln einem Kernmodell Elemente hinzugefügt oder daraus entnommen. Dies ermöglicht es, einen möglichst beständigen Kern der Produktlinie (vgl. Plattform) zu definieren und die Anpassungen systematisch bei der Konfiguration des Produktes vorzunehmen. Ein Beispiel für einen transformativen Ansatz stellt die Delta-Modellierung [SBB+10; HRR+11] dar, bei der sogenannte Delta-Module definiert werden, die dann inkrementell

angewendet werden können, um ein singuläres Produkt mittels Addition, Subtraktion oder Modifikation zu erstellen. In Verbindung mit einer eindeutig definierten Anwendungsbeschreibung der Delta-Module können diese genutzt werden, um die Variabilität im Lösungsraum abzubilden. Anwendungen der Delta-Modellierung sind bisher primär im Bereich des Software-Engineerings zu finden [HKM+13].

Zusammenhang zwischen Problem- und Lösungsraum: Neben den zuvor beschriebenen Ansätzen zur Modellierung der Variabilität in Problem- oder Lösungsraum ist es unerlässlich, auch die Beziehungen zwischen den Modellen dieser Betrachtungsräume abzubilden. Somit wird modelliert, welche Bauteile, Softwareelemente oder Artefakte des Lösungsraumes die Merkmale und Funktionen des Problemraums realisieren. Diese Relationierung weist Ähnlichkeiten zu der Zuordnung von Funktions- zu Produktstruktur innerhalb der Produktarchitektur in Abbildung 3-1 auf. Die verschiedenen Ansätze der Variabilitätsmodellierung bieten diesbezüglich eine Vielzahl an Möglichkeiten und Werkzeugunterstützungen (eine Übersicht kann [SRC+12, S. 483] entnommen werden), deren Kern es jedoch immer ist, die Variabilität des Problemraumes mit der Variabilität des Lösungsraumes zu verknüpfen. Hierbei wird in der Regel auf eine Grundmenge möglicher Relationen zurückgegriffen, die meistens positiven („requires“), negativen („conflicts“) oder informativen Charakter („influences“) aufweisen [BEU03, S. 80]. Erst diese Verknüpfung erlaubt es, ein Produkt in einem ersten Schritt basierend auf Anforderungen, Funktionen und Merkmalen zu konfigurieren, also die Kundenwünsche in den Mittelpunkt zu stellen und basierend darauf die Fragen der technischen Umsetzung zu behandeln.

3.4. Zwischenfazit

Das vorliegende Kapitel dient der Beschreibung von grundlegenden Mechanismen, die hinsichtlich einer detaillierten Betrachtung verschiedener Wiederverwendungsansätze für das Engineering automatisierter Anlagen unerlässlich sind.

Einleitend werden verschiedene Ansätze zur Produktstrukturierung angeführt und bezüglich deren Charakteristik eingeordnet. Diese Einordnung zeigt, dass vor allem die Produktlinien dazu geeignet sind, komplexe Systeme und Verbünde mehrerer Systeme zu definieren. Die Produktlinien erlauben es, weitere Strukturierungsansätze (z.B. Plattformen oder Module) zu integrieren.

Neben den Ansätzen der Produktstrukturierung existieren vielfältige grundlegende Wiederverwendungsmechanismen, welche die Bandbreite von der unsystematischen bis hin zu einer produktlinienbasierten Wiederverwendung unterstützen.

Das Kapitel schließt mit einer Abhandlung des Themenkomplexes Variabilität, da erst die explizite Berücksichtigung der Variabilität eine systematische Anpassung wiederverwendbarer Einheiten an verschiedene Kundenanforderungen ermöglicht. Das Kapitel zeigt, dass mannigfaltige grundlegende Mechanismen existieren, die von Entwicklern angewendet werden können, um technische Systeme zu strukturieren und Teile dieser strukturierten Systeme wiederzuverwenden. Das nachfolgende Kapitel beschreibt Wiederverwendungskonzepte, welche diese grundlegenden Mechanismen aufgreifen und hinsichtlich spezifischer domänen- oder disziplinspezifischer Herausforderungen detaillieren.

4. Wiederverwendungskonzepte und resultierende Anforderungen

Das nachfolgende Kapitel gibt einen Überblick über wissenschaftliche Arbeiten, welche die systematische Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen thematisieren. Die Beschreibung dieser wissenschaftlichen Ansätze stützt sich auf die Grundlagen, welche in den vorigen Kapiteln geschildert wurden. Diesem deskriptiven und einordnenden Teil des Kapitels folgt in Kapitel 4.3 die Beschreibung der abgeleiteten Ist-Use-Cases und Soll-Use-Cases sowie der erarbeiteten Anforderungen an ein systematisches interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept für das Engineering automatisierter Anlagen.

4.1. Wiederverwendungskonzepte für das Engineering automatisierter Anlagen

Der nachfolgende Abschnitt dient der Beschreibung und Einordnung verschiedener Wiederverwendungsansätze, die unterschiedlichen, am Engineering beteiligten Gewerken entstammen und folglich teils unterschiedliche Ansatzpunkte und Herangehensweisen aufweisen. Dies spiegelt sich auch in der Benennung wider, die nicht immer auf Wiederverwendungsansätze schließen lässt. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ansätze zu ermöglichen, folgt auf die textuelle Einordnung, Beschreibung und Bewertung eines jeden Ansatzes eine tabellarische Übersicht dessen. Kapitel 4.2 ist neben einer kumulierten tabellarischen Darstellung in Tabelle 4-11 eine zusammenfassende Diskussion der Wiederverwendungskonzepte zu entnehmen.

Aufgrund der vielfältigen Aspekte nach denen Wiederverwendungskonzepte strukturiert werden können, wird auf eine zweckgebundene Sortierung der nachfolgenden Ansätze verzichtet. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Wiederverwendungskonzepte in Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4 von Akteuren aus dem Umfeld der Verfahrenstechnik entwickelt wurden und die Konzepte in Kapitel 4.1.5 bis 4.1.10 der Automatisierungstechnik, bzw. damit eng verbundenen Fachdisziplinen, entstammen. Die Reihenfolge ist jedoch nicht als Ordnungskriterium zu betrachten und ermöglicht keinen Rückschluss hinsichtlich des Reifegrades der Wiederverwendung.

4.1.1. Multikriterielle Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen nach Hady et al.

Die wissenschaftlichen Arbeiten von Ł. Hady, welche größtenteils in [HAWO12] zusammenfassend beschrieben sind, behandeln die Planung modularer Anlagen und zeigen eindrücklich, dass Wiederverwendung nicht zum Selbstzweck betrieben wird, sondern unterschiedlichen konkreten Zielen, wie Kosten- oder Aufwandsreduktion, untergeordnet ist. Im Fall von [HAWO12] ist dies aufbauend auf [STR08] die modulare Kostenkalkulation, die es ermöglichen soll, in verschiedenen Phasen des Anlagenengineerings adäquate Kalkulationsmethoden anzuwenden und die Kosten nicht nur schätzen zu müssen. Die hierfür nötigen Grundlagen hinsichtlich der Modularisierung [HAD07; HAWO10], der Kalkulationsgrundlagen [HDW09] sowie der Speicherung und Handhabung der Anlagenmodule [HAWO09] sind aus Sicht der Apparateplanung weitreichend aufgearbeitet und veröffentlicht.

Die Grundlage des Ansatzes zur modularen Kostenkalkulation stellt eine als gewerkeübergreifende Basis zu betrachtende Modularisierung der Anlagen basierend auf dem R&I-Fließschema dar, welches durch [DIN EN ISO 10628] als genormt angenommen werden kann [HAWO12, S. 605]. Diesbezüglich wird die [NE 33] vorgeschlagen, welche Ansätze für die Strukturierung von Verfahren und Anlagen

aufzeigt (vgl. Kapitel 2.3). Grundsätzlich wird eine Verankerung der Modulstruktur auf allen Ebenen als möglich erachtet, ist jedoch unter Berücksichtigung des Anwendungsfalles anzupassen.
Hinsichtlich der auf Modulen basierenden frühen Kalkulation wird in [HAWO12] ein interessanter Zielkonflikt aufgezeigt: Die Module werden einerseits möglichst offen ausgelegt, um späteren Entwicklern eine Anpassung zu erleichtern, eine präzise Kalkulation jedoch erfordert möglichst wenig Freiheitsgrade des Moduls, da sich diese als Unsicherheit in der Kalkulation niederschlagen [HAWO12, S. 601]. Daher wird in [HAWO12], basierend auf [HAD07; HDW08; HDW09], ein Ansatz zur stufenweisen Kalkulation der Investitionskosten vorgestellt, der sich auf [AACE 18R-97] bezieht. [HAWO12] sieht vor, dass je nach Entwicklungsstand („Entwicklungsphase, Entwurfsphase, Ausführungsphase“) entsprechende Kalkulationsmethoden („Kapazitätsmethode, Strukturmethode, Methode mit spezifischen Daten“) auf immer tieferen Ebenen der Anlagenstruktur („Anlage, Teilanlagenmodul, Baugruppenmodul, Ausrüstung“) angewendet werden [HAWO12, S. 610F.]. Nach [HDW09] führt dieses stufenweise Vorgehen zu einer belastbaren und dem Entwicklungsstand angemessen präzisen Kalkulation.
Eine ausführliche Darstellung weiterer Aspekte der Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen ist in [HAWO12] angeführt. Hier werden auch Herausforderungen aus apparatetechnischer Sicht, wie die Übergänge von der verfahrenstechnischen Planung im R&I-Fließschema über 2D-Modelle hin zu 3D-Modellen, behandelt. Anhand dieses Beispiels wird verdeutlicht, dass bereits aus einem Baugruppenmodul im R&I-Fließschema eine Vielzahl von Varianten abgeleitet werden kann, die sich hinsichtlich des dreidimensionalen Entwurfs unterscheiden. Ein werkzeugbasierter Ansatz für die Speicherung und Handhabung dieser Varianten wird in [HAWO09] präsentiert. Hierbei werden allerdings lediglich Varianten, nicht aber variable Modelle gespeichert, sodass bei Nutzung der Module eine unsystematische Anpassung vorzunehmen ist.

Der Ansatz zur multikriteriellen Modularisierung von Anlagen zur optimierten Kostenkalkulation [HAWO12] stellt eine valide Basis für das Anlagenengineering dar. Die stufenweise Verfeinerung der Kalkulation fügt sich in die phasenweise Detaillierung ein, welche auch das Engineering der Anlage charakterisiert. Der Fokus der Arbeiten ist jedoch sehr stark auf die apparatetechnische Planung gerichtet. Vorgelagerte Arbeiten der verfahrenstechnischen Planung oder nachgelagerte Arbeiten wie die automatisierungstechnische Planung werden zwar in der grafischen Aufbereitung berücksichtigt [HAWO10, S. 6FF.; HAWO12, S. 608], spiegeln sich in den konzeptionellen Ansätzen aber nur bedingt wider bzw. werden nicht in die Planungstätigkeiten integriert.
Die in [HAWO09] vorgestellte werkzeugtechnische Unterstützung zur Speicherung der Module erlaubt keine explizite Modellierung von Variabilität, was dazu führt, dass Module entweder mit Freiheitsgraden vorgeplant werden, diese aber bestenfalls textuell dokumentiert werden, oder ein unsystematisches Anpassen starrer Module vorgenommen werden muss. Letzterem würde der Gedanke der frühen Kalkulation entgegenstehen. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Tabelle 4-1: Einordnung „Multikriterielle Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen nach Hady et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition → Planung → Realisierung → Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung, Stahlbau, Automatisierungshardware (bedingt)		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
opportunistisch bis systematisch		Bibliotheken mit Modulen	nein, nur definierte Varianten

4.1.2. Wissensbasierter Ansatz zur modulbasierten Erstellung von R&I-Fließbildern[11] nach Uzuner et al.

In [UzSc12; Uzu13] wird ein Ansatz für die wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließschemata vorgestellt, der im Kontext der Forschungsarbeiten zu [WSS10] entstand. Entgegen des Ansatzes nach [HaWo12] (vgl. Kapitel 4.1.1), welcher dem R&I-Fließschema nachgelagerte Tätigkeiten thematisiert, ist es die Motivation des Ansatzes nach [Uzu13], die Erstellung eben dieser, oftmals strukturell ähnlichen, aber stets kundenindividuell entwickelten R&I-Fließschemata effizienter zu gestalten [UzSc12, S. 748f.]. Das Wissen für die Fließschema-Erstellung wird mittels Entscheidungsbäumen konserviert und somit für zukünftige Entwickler systematisch zugänglich gemacht (vgl. Kapitel 5.3). Der Fokus liegt hierbei zwar auf der Erstellung des R&I-Fließschemas, das aufbereitete Wissen umfasst aber auch generelle Design-Entscheidungen, die im R&I-Fließschema frühzeitig manifestiert werden, jedoch weitreichende Auswirkungen auf die nachgelagerten Engineering-Tätigkeiten aufweisen [Uzu13]. Diese, dem R&I-Fließschema nachgelagerten, Arbeiten liegen nicht im Fokus von [Uzu13].

Der 3-stufige Ansatz umfasst die Schritte (1) Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen auf der Basis von Fließschemata, (2) Entwicklung wissensbasierter Planungseinheiten und (3) Realisierung der Planungseinheiten im R&I-Design [Uzu13].
In Schritt (1) wird die Anlage in Anlagenmodule, Teilanlagenmodule, Equipment-Module, Untermodule, Teilmodule, Baugruppen und Unterbaugruppen strukturiert. Diese Dekomposition ist weitaus feingranularer als dies bei den Ansätzen aus Kapitel 2.3 der Fall ist, macht aber deutlich, dass lediglich der Produktaspekt im Vordergrund steht (vgl. Abbildung 2-3). Die Strukturierung wird anhand der vorgelagerten Fließschemata, beispielsweise des Grundfließschemas, vorgenommen, indem der Bilanzraum sowie Ein- und Ausgangsgrößen bestimmt werden. Hierbei wird die Konvention befolgt, dass ein Equipment-Modul einen Prozessschritt realisiert und in der Regel eine Planungseinheit repräsentiert [UzSc12, S. 750]. Eine Komposition dieser Equipment-Module zu (Teil-)Anlagenmodulen erfolgt regelbasiert [UzSc12, S. 751].
In Schritt (2) werden die sequenziellen Design-Entscheidungen mittels einer argumentationsbasierten Designraum-Analyse formalisiert. Hierbei wird explizit darauf hingewiesen, Design-Entscheidungen mit einer starken strukturellen Auswirkung möglichst früh vorzusehen, wohingegen die Entscheidungen über rein additive, optionale Ausrüstungen am Ende des Entscheidungsprozesses zu allokieren sind. Die verschiedenen Design-Entscheidungen können thematisch gruppiert werden, um die Anwendung eingängiger zu gestalten [UzSc12, S. 752f.].
Der abschließende Schritt (3) des wissensbasierten Ansatzes stellt die, in *COMOS* vorgenommene, objektorientierte Implementierung dar. Diese Umsetzung ermöglicht das nachträgliche Ändern der

[11] Nachfolgend gemäß [DIN EN ISO 10628] als „Fließschema“ bezeichnet.

Entscheidungsbäume, ohne in den Programmcode der prototypischen Implementierung eingreifen zu müssen [UZU13, S. 51]. Klassen oder Objekte können hinzugefügt, gelöscht oder alternativ referenziert werden.

[UZU13] umfasst die Aufarbeitung von sechs Anwendungsbeispielen in bemerkenswerter Detaillierung. Diese Beispiele sind aber ausschließlich darauf fokussiert, die Erstellung des R&I-Fließschemas effizienter zu gestalten, nachgelagerte Arbeiten und Inhalte anderer Gewerke werden nicht berücksichtigt. In Konsequenz ist die Wiederverwendung gewerkeübergreifender Artefakte oder von Relationen zwischen diesen Artefakten nicht vorgesehen. Entscheidungsbäume sind jedoch ungeeignet, um die Variabilität in der Entwicklung großer oder komplexer Systeme abzubilden, wie beispielsweise in [HAWO12, S. 601F.] geschildert wird. Das liegt primär am sequenziellen Charakter der Entscheidungsbäume. Diese implizieren, das Engineering könne auf eine prozessuale Frage-Antwort-Basis reduziert werden, was aber insbesondere bei der meist komplexen Interaktion verschiedener Gewerke nicht der Fall ist. Darüber hinaus sind die Entscheidungsbäume zwar einfach nachzuvollziehen, bergen jedoch das Risiko einer erheblichen Redundanz der Informationen, da trotz einer alternativen Verzweigung an einer Designentscheidung die nachfolgende Designentscheidung identisch sein kann. Folglich ist eine Wartung und Aktualisierung, die explizit gefordert wird [UZU13, S. 51], sehr aufwendig. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-2 zu entnehmen.

Tabelle 4-2: Einordnung „Wissensbasierter Ansatz zur modulbasierten R&I-Fließbild Erstellung nach Uzuner et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition, Planung, Realisierung, Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Verfahrenstechnik, Apparateplanung, Rohrleitungsplanung		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch, produktlinienbasiert		Objekt-Bibliotheken (Typ-Instanz)	ja, in Entscheidungsbäumen

4.1.3. Modularisierung im Planungsprozess von Anlagen nach Bramsiepe et al.

In [BRSC12] und [SSB+12] wird ein Modularisierungsansatz für verfahrenstechnische Anlagen vorgestellt, der ähnlich [UZU13] (vgl. Kapitel 4.1.2) auf [WSS10] basiert. Motivation ist es, Forderungen nach [PRSU10@] gerecht zu werden und die verfahrens- sowie apparatetechnische Planung von Anlagen effizienter zu gestalten, indem wiederverwendbare Elemente verschiedenen Charakters definiert werden.

Einen ersten Schritt stellen dabei, ähnlich der Arbeiten in [UZU13], sogenannte „2D-Variantenmodule“ [BRSC12, S. 582] dar. Diese Module unterstützen den Planer bei der Erstellung des R&I-Fließschemas, allerdings wird nicht explizit darauf eingegangen, ob diese Detaillierung auf Basis des Grund- oder des Verfahrensfließschema geschieht. Unabhängig davon werden in diesem Schritt zentrale Design-entscheidungen getroffen und somit die Weichen für das nachfolgende Engineering gestellt. Trotzdem erfordert dieser Schritt in Relation zum gesamten Engineering der Anlage nur einen vergleichsweise geringen Aufwand, sodass die Optimierung lediglich geringe Auswirkungen auf das Engineering insgesamt aufweist. Es steht möglichen positiven Auswirkungen, beispielsweise hinsichtlich der Effizient der Anlage, nicht entgegen, auch nachgelagerte Tätigkeiten zu berücksichtigen.

Eine Steigerungsform stellen die sogenannten „3D-Variantenmodule“ [BrSc12, S. 582] dar, die nicht nur die Apparatetypen umfassen, wie sie im R&I-Fließschema definiert sind, sondern auch „sämtliche Größen, die für eine Fertigung des Moduls benötigt werden (z. B. Rohrdurchmesser, Isolierung, Anschlussgeometrie und -position etc.)“ [BrSc12, S. 582]. Aus dieser Anreicherung resultiert, dass die 3D-Variantenmodule nicht mehr nur von einem Gewerk definiert und entwickelt werden können, sondern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderlich ist, um die Gestaltung der Module sowie der zugehörigen Varianten in sinnvoller Weise vornehmen zu können. [SSB+12] beschreibt einen Ansatz, der diesen Typ von Modul konsequent integriert. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass es möglich ist, im Rahmen der Verfahrensplanung einzelne Apparate in Modulen entweder unter- oder überdimensioniert betreiben zu können, da die Module lediglich in diskreten Größenabstufungen vorliegen. Bei zu großen Abstufungen zwischen den verschiedenen Moduldimensionen kann ein „numbering up“ vorgenommen werden, um führende Prozessparameter optimal zu approximieren. Folglich ist es anzustreben, Grundoperationen, die den größten Einfluss auf die Kostenstruktur aufweisen, als führend hinsichtlich der Verfahrensparameter anzusehen [SSB+12, S. 146]. Ein Konzept, das die weitreichenden verfahrenstechnischen Auswirkungen eines solchen modularen Ansatzes und der mit der Diskretisierung der Modulgrößen einhergehenden Approximation an den optimalen Betriebspunkt mittels multipler, gegebenenfalls paralleler Module beleuchtet, wird in [BSS+12] präsentiert. Die Vor- und Nachteile der modularen Planung mittels diskreter Module werden anhand einer Vielzahl von Beispielen aus dem Bereich der Lebensmittelindustrie thematisiert [BSS+12, S. 39ff.]. Die weitreichendste Form der Modularisierung, die in [BrSc12] vorgestellt wird, stellt die Verwendung von „Planungsmodulen“ [BrSc12, S. 582] dar. Diese Planungsmodule basieren auf den 2D- und 3D-Variantenmodulen, können aber Informationen enthalten, welche die „Auswahl, Auslegung und Dimensionierung“ [BrSc12, S. 583] der Module betreffen. Hierbei ist neben der Apparateplanung auch die Integration weiterer Gewerke vorgesehen. Neben dieser konservativen Betrachtung der Planungsmodule wird darüber hinaus die Vision eines nahezu autonom agierenden Moduls skizziert, das sich in Interaktion mit dem Planer durch den Planungsprozess navigiert [BrSc12, S. 586]. Diese Selbstbestimmtheit des Moduls weist Ähnlichkeit zu den Forderungen nach einem sich selbst durch die Fertigung steuernde Produkt auf [KWH13], wie es beispielsweise im Kontext von Industrie 4.0 diskutiert wird. Die Ähnlichkeit dieser beiden Visionen ganz unterschiedlicher Fachdisziplinen (Verfahrenstechnik und Informationstechnologie) zeigt, dass ein interdisziplinärer Planungsansatz, welcher Ansätze verschiedener Gewerke zusammenführt, möglich sein kann.

Der Modularisierungsansatz nach [BrSc12] liefert einen Ansatz zur Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen aus Sicht der Verfahrens- und Apparatetechnik. Der Ansatz ermöglicht die modulbasierte Planung konventioneller Anlagen ebenso wie die Planung modularer Anlagen. Eine teilweise modulare Planung konventioneller Anlagen wird zwar ermöglicht, reduziert jedoch die Wirksamkeit des Ansatzes [BrSc12, S. 585]. Die verschiedenen Abstufungen der Module zeigen die Bandbreite hinsichtlich möglicher wiederverwendbarer Artefakte auf. Die gewerkspezifische Fokussierung des Ansatzes reduziert die Wirksamkeit bezüglich des übergeordneten Engineerings der Anlage, stellt aber gleichwohl eine adäquate Basis für interdisziplinäre Wiederverwendungsansätze dar. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-3 zu entnehmen.

Tabelle 4-3: Einordnung „Modularisierung im Planungsprozess von Anlagen nach Bramsiepe et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition, Planung, Realisierung, Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Verfahrenstechnik, Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Bibliotheken mit Modulen	nein, nur definierte Varianten

4.1.4. Effizientes Engineering durch die Modularisierung in Package Units nach Rottke et al.

Der Wiederverwendungsansatz nach [RGF+12] wird motiviert aus der 50%-Idee [PRSU10@] und basiert auf der Definition von Modulen (sogenannte „Package-Units“). Package-Units sollen das Engineering automatisierter Anlagen insofern beschleunigen, als dass sie vorkonfiguriert am Ort der Errichtung mit der Anlage verbunden und im Betrieb genommen werden. Im Idealfall führt dies zu einer Reduktion des Planungs- und Errichtungsaufwandes (sogenanntes „plug and produce“). Der Ansatz kann in den Kontext der modularen Anlagen eingeordnet werden.

Grundlage des Wiederverwendungsansatzes stellt die Definition von Modulen dar, die auf diskret abgestuften Parametern basieren. Das zugrunde liegende R&I-Fließschema wird als unveränderlich definiert [RGF+12, S. 2]. Beispielsweise werden für den Durchmesser einer Kolonne diskrete Dimensionen festgelegt sowie die resultierenden möglichen Durchflüsse errechnet [RGF+12, S. 2-4]. Gemäß dieser Abstufungen werden Module entwickelt, die mittels definierter Schnittstellen verbunden werden können. Es wird herausgestellt, dass diese Modularisierung (vgl. Kapitel 3.1.3) die zentrale Grundlage für die Etablierung eines Wiederverwendungsansatzes darstellt [RGF+12, S. 2]. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Anforderungen des Kunden hinsichtlich der Dimensionierung nicht mehr 1:1 realisiert werden können, sondern an die nächstmögliche diskrete Dimensionierung des Moduls angepasst werden müssen. Es wird betont, dass diese Nachteile durch Vorteile hinsichtlich der Austauschbarkeit ganzer Anlageteile aufgewogen werden könnten [RGF+12, S. 3].
Darüber hinaus wird in [RGF+12] herausgestellt, dass die Präzision der Kalkulation im Zuge der Anlagenplanung durch die Modularisierung deutlich zunehmen kann, was aber primär daraus resultiert, dass der Ansatz keine variablen Module zulässt, Freiheitsgrade also lediglich über die Kombinatorik der Module erreicht werden können [RGF+12, S. 2]. Diese Restriktion entspricht folglich der Logik nach [HAWO12] (vgl. Kapitel 4.1.1). Der Ansatz wurde im Kontext von *COMOS* prototypisch umgesetzt.

Der Wiederverwendungsansatz nach [RGF+12] liefert einen Beitrag zu den Arbeiten des modularen Anlagenbaus. Zwar werden Charakteristika der Module sowie der kundenorientierten Prozesse angeführt, eine detaillierte Beschreibung der Schritte für die systematische Definition der Module sowie deren Anwendung wird jedoch nicht veröffentlicht. Die involvierten Gewerke sind auf die Apparatetechnik und die damit eng verbundene Rohrleitungsplanung begrenzt. Darüber hinaus muss die Voraussetzung, das R&I-Fließschema als statisch anzunehmen, als kritisch angesehen werden, da dieses zentrale Dokument von verschiedenen Gewerken kollaborativ erstellt wird und folglich im Laufe des Engineerings gegebenenfalls häufig geändert werden muss. Des Weiteren schränkt es die Anwendbarkeit des Ansatzes stark ein, lediglich diskret abgestufte Modulgrößen anzubieten, obgleich dem gegenüber – aufgrund der nicht zu berücksichtigenden Variabilität – a priori ein geringerer

Aufwand entsteht. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-4 zu entnehmen.

Tabelle 4-4: Einordnung „Effizientes Engineering durch die Modularisierung in Package Units nach Rottke et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition, Planung, Realisierung, Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Bibliotheken mit (Baureihen von) Modulen	nein, definierte Varianten, in diskreter Abstufung

4.1.5. Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering nach Obst et al.

Das wissensbasierte Assistenzsystem für das modulare Engineering automatisierter Anlagen der Prozessindustrie nach [ObUr12] und [ODU13] steht im Kontext von Ansätzen zur Planung modularer Anlagen und deren Leitsystemen [UBJ+12; UDK+12] sowie Arbeiten zur Integration von Package-Units [OHU14]. Allen Ansätzen gemein ist, dass diese eher die Planung modularer Anlagen als die modulare Planung konventioneller Anlagen thematisieren.

Der wissensbasierte Ansatz nach [ObUr12] beruht auf der Annahme, dass spezifische Aufgaben innerhalb des Engineerings einen stark repetitiven Charakter aufweisen [ObUr12]. Diese Aufgaben (z.B. die Detailplanung einer Pumpeneinheit) werden als Fälle betrachtet und die Lösungen dieser Fälle in einer Falldatenbank hinterlegt. Tritt nun ein ähnlicher Fall auf, wird basierend auf den bestehenden Fällen auf geeignete bestehende Lösungen geschlossen. Das fallbasierte Schließen geschieht unter Zuhilfenahme geeigneter Algorithmen und Ähnlichkeitsmetriken (z.B. Attribut-Wert-Paare). Die Lösung des bestmöglichen, den Anforderungen der aktuellen Aufgabe entsprechenden Falls wird daraufhin zur Unterstützung der Lösungserarbeitung herangezogen [ObUr12, S. 105ff.]. Die Lösung der aktuellen Aufgabe kann nach einer Überprüfung in der Falldatenbank abgelegt werden. Diese Rückführung führt zu einem steten, wenn auch unsystematischen Wachstum der Falldatenbank. Wie [ObUr12] zu entnehmen ist, umfasst das Konzept die Elemente, welche es ermöglichen, einen frühen konzeptionellen Entwurf in ein R&I-Fließschema zu überführen. Eine mögliche Werkzeugintegration in *COMOS* wird konzeptionell aufgezeigt.

Die Arbeiten zur Integration von Package-Units können mit dem zuvor beschriebenen Ansatz kombiniert werden, haben aber auch unabhängig davon Bestand. Allerdings fokussiert der vorgeschlagene Prozess „Plug, Configure, Check & Produce“ [UDK+12, S. 617ff.] auf die Zusammenstellung und Konfiguration einer modularen Anlage, weniger auf deren Engineering. Die Kopplung dieser Package-Units kann entweder mittels einer definierten Infrastruktur oder mittels spezialisierter Stoffrangiermodule [UDK+12] erfolgen. Auch diese Package-Units können als in sich gekapselte, wiederverwendbare Einheiten betrachtet werden. Dieser Ansatz ist jedoch im Bereich des modularen Anlagenbaus angesiedelt und ist somit vielmehr auf die kurzfristige Produktion kleiner Losgrößen als die effiziente wiederverwendungsbasierte Planung konventioneller Anlagen ausgerichtet.

Die Integration des fallbasierten Schließens in einen Wiederverwendungsansatz ermöglicht es, zwischen Anforderungen (Spezifikation des Falles) und der Umsetzung dieser Anforderungen (wiederverwendbare Lösung) zu differenzieren. Ungeachtet dessen stellt es eine bisher ungelöste Herausforderung dar, die Ähnlichkeit zweier Fälle zuverlässig und deterministisch sicherzustellen [ODU13, S. 107]. Diese Herausforderung wird mit jedem integrierten Gewerk komplexer, da die Anzahl der zu berücksichtigenden Kriterien, Falltypen und Beziehungen damit ebenfalls steigt (vgl. Kapitel 4.1.1 bzw. [HAWO12]). Darüber hinaus ist nicht davon auszugehen, dass die Lösung eines identifizierten Falles unverändert für die Lösung der aktuellen Aufgabe herangezogen werden kann. Folglich ist eine nachträgliche, nicht von systematischen Prozessen unterstützte, Anpassung der (Zwischen-)Ergebnisse nötig. Dieses Vorgehen birgt ähnliche Risiken, wie dies bei unsystematischen Ansätzen der Fall ist, wie beispielsweise dem Copy & Paste (vgl. Kapitel 3.2.1).
Die Erweiterung der Falldatenbank um gelöste Fälle erlaubt zwar eine effiziente Speicherung von Informationen, sieht jedoch keine systematische Planung zukünftiger wiederverwendbarer Einheiten vor. Eine solche Systematik sei zwar grundsätzlich möglich, nicht aber Teil des vorgestellten Konzeptes. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-5 zu entnehmen.

Tabelle 4-5: Einordnung „Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering nach Obst et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition, Planung, Realisierung, Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Apparatetechnik, Mechanik, Elektrotechnik, Prozessleittechnik (bedingt)		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Bibliothek (Templates und Pattern)	nein

4.1.6. Modulare Offene Verteilte Funktionsblocksysteme für die Automatisierungstechnik

In [ORD+01] wird ein Ansatz zu Optimierung der Steuerungs- und Leitsystementwicklung als Bestandteil des Anlagenengineerings beschrieben, um den kürzer werdenden Innovationszyklen und der damit einhergehenden zunehmenden Flexibilisierung Rechnung zu tragen. Ergebnis dieses BMBF-geförderten Forschungsprojektes „Modulare Offene Verteilte Funktionsblocksysteme für die Automatisierungstechnik (MOVA)“ ist eine Methodik, eine Definition der Funktionsmodule sowie das sogenannte *Merge-Tool* [ORD+01, S. 41FF.].

Der Wiederverwendungsansatz basiert auf der Feststellung, dass im Rahmen von Maschinen- und Anlagenbauprojekten der Vertrieb in Zusammenarbeit mit dem Kunden meist neben den Anforderungen auch Funktionen und mögliche implementierungsspezifische Rahmenbedingungen festlegt. Diese Daten werden dann in Form einer Modulliste an die gewerkspezifischen Fachabteilungen übergeben [ORD+01, S. 24F.]. Während in der mechanischen Konstruktion Baustein- und Modulbibliotheken vorliegen, existierten im Bereich der Steuerungs- und Leitsystementwicklung keine vergleichbaren Sammlungen. Stattdessen wird vorzugsweise auf Basis auf feingranularer und implementierungsspezifischer Bausteine [DIN IEC 61131-3] geplant. Um dem entgegenzuwirken sollen Funktionsmodule entwickelt werden, welche die jeweiligen gewerkspezifischen Anteile [ORD+01, S. 21] beinhalten. Ein Bezug zwischen den Anteilen verschiedener Gewerke wird aber nicht zwingend vorgesehen. Die Funktionsmodule erlauben nicht nur eine funktionsorientierte

Dekomposition der Anlage [ORD+01, S. 19], sondern auch eine Planung unabhängig der Restriktionen möglicher herstellerspezifischer Echtgeräte [ORD+01, S. 64].
Als Schnittstelle zwischen einer spezifischen Planungsabteilung und deren Bibliothek von Funktionsmodulen dient ein sogenanntes *Merge-Tool*, welches beispielhaft für die Umsetzung der Bausteine für die Steuerungs- und Leitsystementwicklung detailliert beschrieben wird [ORD+01, S. 41FF.]. Das *Merge-Tool* erlaubt die Planung der Steuerungssoftware basierend auf den Abläufen und Funktionen, die innerhalb der Funktionsmodule in Form von Funktionsbausteinen nach [DIN IEC 61499-1] definiert sind. Schon bei der Verknüpfung der Funktionsbausteine wird berücksichtigt, ob es sich dabei um Funktionalität handelt, die auf einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (kurz: SPS) realisiert werden kann, oder steuerungsübergreifende Auswirkungen vorliegen. Die verknüpften Funktionsbausteine werden nachfolgend in Steuerungscode nach [DIN IEC 61131-3] übersetzt, der entsprechend der funktionalen Spezifikation auf verschiedene SPS verteilt werden kann [ORD+01, S. 53F.]. Dieses implementierungsnahe *Merge-Tool* wird ergänzt durch eine Methode zur Leitsystemkonfigurierung [KDN+98; ORD+01, S. 108FF.].

Der Ansatz ist auf die Steuerungs- und Leitsystementwicklung fokussiert. Es wird vorausgesetzt, dass innerhalb der Organisation gewerkeübergreifende Funktionsmodule definiert sind, die von vertrieblich orientierten Akteuren vorselektiert werden können. Es wird nicht darauf eingegangen, wie den gewerkeübergreifenden Herausforderungen, beispielsweise durch unterschiedliche Granularität innerhalb dieser Funktionsmodule, begegnet werden kann. Diese Funktionsmodule sehen keine explizite Variabilität vor, sodass nicht exakt den Anforderungen entsprechende Funktionsmodule projektspezifisch und unsystematisch angepasst werden müssen. Lediglich implementierungsspezifische Optionen sind vorgesehen [ORD+01, S. 21]. Hinsichtlich der Steuerungsentwicklung ist positiv herauszustellen, dass die funktionale Entwicklung der Abläufe vor der implementierungsnahen Auslegung und Verteilung durchgeführt wird. Diese Reihenfolge erlaubt eine Entwicklung der Steuerungs- und Leitsystemfunktionalität, ohne zu früh durch implementierungsbezogene Restriktionen eingeschränkt zu werden. Die starke Fokussierung auf den Steuerungs- und Leitsystementwurf führt jedoch dazu, dass gewerkeübergreifende Fragestellungen übergeordneter Aufgaben des Engineerings nicht adressiert werden. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-6 zu entnehmen.

Tabelle 4-6: Einordnung „Modulare Offene Verteile Funktionsblocksysteme für die Automatisierungstechnik (MOVA)“

Abgedeckte Phasen	Akquisition → Planung → Realisierung → Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Automatisierungstechnik (Fokus: Steuerungs- und Leitsystementwicklung [ORD+01, S. 20])		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Bibliothek mit Modulen	implizit (implementierungs-spezifische Optionen)

4.1.7. Adaptierbares Wiederverwendungskonzept nach Maga et al.

Nachdem [JOS07] bereits den Gedanken des „Domain Engineerings“ [DIA01; CZEI05] auf den Softwareteil eines Automatisierungssystems angewendet hat, überträgt das adaptierbare Wiederverwendungskonzept nach [MAG12] diesen Ansatz auf automatisierte Systeme als Ganzes. Folglich werden nicht nur Artefakte des Software-Engineerings in Betracht gezogen, sondern auch die Artefakte der anderen beteiligten Gewerke. Dieses Wiederverwendungskonzept kann als eine Detaillierung des in [VDI/VDE 3695-2] proklamierten Vorgehensmodells angesehen werden.

Das adaptierbare Wiederverwendungskonzept adressiert drei primäre Ziele: (1) Die systematische Entwicklung wiederverwendbarer Artefakte [MJE+09; JMG+10], (2) die geeignete Modellierung [MAJA10A; MAJA11], Strukturierung [MJG11B] und Speicherung der Artefakte [MAJA09; MJG+11C] sowie (3) die systematische Anwendung der Artefakte im Engineering [JMG+10]. Anforderungen an Engineering-Werkzeuge, die aus diesem Wiederverwendungskonzept im Speziellen sowie systematischer Wiederverwendung im Allgemeinen resultieren, sind in [MJG11A] zusammengefasst und werden unter anderem in Kapitel 4.3 berücksichtigt.

Die systematische Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten wird im sogenannten „Domain Engineering“ vorgenommen. Terminologische Grundlage ist die Annahme, dass die wiederverwendbaren Einheiten in einer klar abgegrenzten Domäne (z.B. Lasten- und Personenaufzüge [MAG12, S. 114FF.]) anwendbar sind. Als Grundlage dieser Entwicklung werden zunächst die Domänenanforderungen im Rahmen einer Analyse [MAG12, S. 49] ermittelt. Diese Anforderungen werden im Anschluss im sogenannten „Domain Repository“ [MAJA09] gespeichert. Zusätzlich werden die wiederverwendbaren Artefakte, die Prozesse und weiteren Hilfsmittel gespeichert, die in den Phasen „Domain Analyse“, „Domain Entwurf“ und „Domain Realisierung“ entwickelt werden [MAJA09]. Die Handhabung variabler Artefakte ist grundsätzlich vorgesehen [MAG12, S. 54F.].

Das „Domain Repository“ ist unterteilt in eine Basisschicht, welche die wiederverwendbaren Artefakte beinhaltet, eine Verbindungsschicht zur Verknüpfung der Artefakte sowie die „Domain Repository Engine“ zur Steuerung des Zugriffs [MAJA09; MAG12, S. 85FF.]. Das „Domain Repository“ dient zur Ablage und Sicherstellung der Wiederauffindbarkeit der zuvor beschriebenen Artefakte. Dabei können die Artefakte anhand verschiedener Strukturen (vgl. Kapitel 2.3) allokiert werden [MAG12, S. 70FF.]. Das konzipierte „Domain Repository“ stellt eine Auswahl möglicher Relationen zwischen den verschiedenen Artefakten zur Verfügung, bietet jedoch keine konzeptionelle Unterstützung bei der Definition und Verwaltung der Relationen.

Im Rahmen des „Application Engineerings“ werden die diversen, im „Domain Repository“ gespeicherten Artefakte herangezogen, um die Erstellung der kundenindividuellen Lösung, aber auch die Planung des Entwicklungsprozesses bzw. des Engineerings zu unterstützen [MAG12, S. 99FF.]. Auch dieser Teil des Konzeptes, dem die Anforderungen des Kunden zugrunde liegen, ist in die Phasen Analyse, Entwurf und Realisierung unterteilt. Werden Bestandteile der Lösung benötigt, die nicht mit Hilfe bestehender Artefakte realisiert werden können, ist eine kundenindividuelle Entwicklung erforderlich. Während des „Application Entwurfes“ werden die Automatisierungsfunktionen und Zustände definiert und basierend darauf der mechanische, elektrische und automatisierungstechnische Entwurf vorgenommen [MAG12, S. 103FF.]. Nach der Spezifikation von Tests wird in der „Application Realisierung“ das System detailliert geplant, unter Einbeziehung der Baustellenplanung und Prototypenerstellung [MAG12, S. 107FF.].

Das adaptierbare Wiederverwendungskonzept [MAG12] stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, da die Grundlage der Differenzierung in projektunabhängige und projektabhängige Tätigkeiten bereits in anderen Domänen weit verbreitet ist [CZEI05; PBL05] und auch im Bereich des Engineering bereits Einfluss in die Normung gefunden hat [VDI/VDE 3695-2]. Jedoch führt die gezielte Adaptierbarkeit an verschiedene Domänen mit teils deutlich abweichenden Prozessen, Artefakten und Architekturen dazu, dass Lösungsansätze nicht ausreichend detailliert dargestellt werden. Dies ist insbesondere bei der Definition der wiederverwendbaren Einheiten, der Identifikation und Modellierung der Variabilität sowie der Gestaltung der gewerkeübergreifenden Zusammenarbeit der Fall. So werden beispielsweise im Zuge des „Domain Engineerings“ Schritte aufgezeigt, wie wiederverwendbare Einheiten zu entwickeln sind. Hierbei wird jedoch kein Bezug zu möglichen Domänen genommen, sodass beispielsweise eine Umsetzung des Konzeptes in die Prozesse einer Engineering-Organisation erschwert wird. Auch die gewerkeübergreifende Zusammenarbeit, welche als zentraler Aspekt angesehen wird [MAG12, S. 17], leidet unter diesem Umstand. So wird eher die Trennung zwischen Hard- und Software berücksichtigt [MAG12, S. 41F.] als das Zusammenspiel der Fachdisziplinen, welche später am Engineering beteiligt sind, und meist eine weitaus feinere – teilweise auch weniger eindeutige – Aufteilung aufweisen. Ferner erfordert die Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes eine Änderung nahezu aller Prozesse im Engineering, was ein erhebliches Risiko für Kundenprojekte und auch die Engineering-Organisation selbst birgt. Eine schrittweise Integration zur stetigen Steigerung des Wiederverwendungsgrades im Sinne der [VDI/VDE 3695-3] wird nicht thematisiert. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-7 zu entnehmen.

Tabelle 4-7: Einordnung des „Adaptierbares Wiederverwendungskonzept nach Maga et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition	Planung	Realisierung / Inbetriebnahme
Abgedeckte Gewerke	Mechanik, Elektrotechnik, Automatisierung, Bauwesen, Softwaretechnik (jeweils inklusive Planung, Qualitätssicherung und Test)		
Klassifikation Wiederverwendung	Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität	
systematisch, produktlinienbasiert	Module, Produktlinien, Bibliotheken	ja, explizite Modellierung vorgesehen, kein konkreter Ansatz	

4.1.8. Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering nach Mahler

Das Konzept für das funktionsorientierte Automatisierungsengineering mit Hilfe von Automatisierungsmodulen nach [MAH14] unterstützt den Entwickler einer Automatisierungslösung bei der Geräteauswahl sowie der Integration der Funktionalität in das umgebende System. Das Wiederverwendungskonzept ist folglich auf eine spezifische Tätigkeit im Engineering automatisierter Anlagen fokussiert.

Basierend auf einer ausführlichen Diskussion der Anwendbarkeit sowie der Vor- und Nachteile von Modulen und Patterns im Engineering automatisierter Anlagen, wird in [MAH14] ein Konzept aufgezeigt, welches die Erstellung und Anwendung von sogenannten Automatisierungsmodulen thematisiert [MAH14]. Ein zentraler Grundgedanke des Konzeptes ist die Verteilung der Funktionalität auf dezentrale Buskoppler. Somit werden Probleme hinsichtlich der Übertragungszeiten vermieden

[MAH14, S. 81]. Wie die Benennung schlussfolgern lässt, ist die Anwendung dieser Automatisierungsmodule auf die Unterstützung der Automatisierungstechnik fokussiert. Die Module enthalten die zur Realisierung einer Funktion benötigte Automatisierungssoftware und -hardware, die Dokumentation sowie eine Spezifikation der Funktion und des Kontextes, in welchem das entsprechende Automatisierungsmodul generell eingesetzt werden kann. Einem Automatisierungsmodul ist dabei mindestens eine Ein- oder Ausgangseinheit zugeordnet, um eine Interaktion mit dem übergeordneten Softwaresystem und/oder den Feldgeräten zu ermöglichen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die Hardware nicht zwingend herstellerspezifisch vorgesehen werden muss, sondern auch die Verwendung von Gerätetypen oder Standardgeräten möglich und sogar als vorteilhaft angesehen wird [MAH14, S. 79F.].
Neben der Konzipierung der Automatisierungsmodule wird ein Vorgehensmodell für das Entwickeln, Speichern und Wiederauffinden sowie Anwenden der Automatisierungsmodule beschrieben. Hierbei wird der Entwickler bzw. Anwender der Module stets in den Vordergrund gestellt: Die Akzeptanz hinsichtlich potentieller initialer Mehrarbeiten oder die Vermeidung der Angst des „sich ersetzbar Machens“ kann nur dann erreicht werden, wenn ein deutlicher Nutzen des Konzeptes ersichtlich wird. Dieser Nutzen kann sich durch eine Reduktion lästiger, unkreativer Tätigkeiten manifestieren [MAH14, S. 97].

Das Konzept für ein Automatisierungsengineering mittels funktionsorientierter Automatisierungsmodule ermöglicht eine systematische Erarbeitung dezentraler Automatisierungsfunktionen, die nicht durch die Auswahl spezifischer Hardware, sondern vielmehr durch die Auseinandersetzung mit der zu realisierenden Funktion geprägt ist. Der Gedanke der Funktionsorientierung, welcher der Produktentwicklung entstammt [AKI94; PBF+05], wird auf die Herausforderungen der Automatisierungstechnik angewendet und ermöglicht folglich einen Anknüpfungspunkt anderer funktionsorientierter Wiederverwendungsansätze vorgelagerter Gewerke. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-8 entnehmen.

Tabelle 4-8: Einordnung „Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering nach Mahler“

Abgedeckte Phasen	Akquisition → Planung → Realisierung → Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Automatisierungstechnik bzw. Prozessleittechnik		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Modularisierung / Pattern	nicht explizit

4.1.9. Interdisziplinärer Produktlinienansatz für Maschinen- und Anlagenbau nach Fuchs et al.

Der interdisziplinäre Produktlinienansatz für den Maschinen- und Anlagenbau nach [FLK+14B] gründet auf einer breiten Basis verschiedener Arbeiten zur Modularisierung [FFV12B; FUVO12] sowie zur Handhabung von Änderungen [FEVO13].

Ziel des Ansatzes ist es, den Wiederverwendungsgrad durch die Bereitstellung und systematische Kombination wiederverwendbarer Artefakte zu steigern. So werden nach [FLK+14B] bereits bestehende Maschinen neu strukturiert, so dass auf die Entwicklung der technischen Lösung nicht eingegangen, sondern lediglich eine nicht weiter detaillierte Strukturierung vorgenommen wird. Für die Sicht des Kunden werden hierzu „Feature-Modelle“ (nachfolgend gemäß Kapitel 3.3.3 „Merkmalmodelle“ genannt) verwendet. Die Bestandteile der Produktlinie werden, zwischen den Gewerken disjunkt separiert, in Zuordnungsdiagrammen [FLK+14B, S. 4] abgebildet. Diese getrennte Darstellung ermöglicht eine gewerkspezifische Definition der jeweiligen wiederverwendbaren Artefakte. Gewerkeübergreifende Beziehungen werden lösungsseitig jedoch nicht modelliert oder berücksichtigt. Die Erstellung einer kundenspezifischen Maschine wird basierend auf den Merkmalmodellen sowie dem Zuordnungsdiagramm vorgenommen. Eine Modellierung der Relationen zwischen den Merkmalen aus Kundensicht und den gewerkspezifischen Lösungsbestandteilen auf Ebene der Produktlinie erfolgt nicht. Die Lösungsbestandteile werden mittels der Zuordnungstabellen selektiert und daraufhin variantenspezifisch zu einer Lösung assembliert und konsolidiert (vgl. Schritt „Synthese“ [FLK+14B, S. 4]).

Der interdisziplinäre Produktlinienansatz nach [FLK+14B] greift Arbeiten nach [MAG12] auf und führt diese hinsichtlich des Maschinenbaus weiter aus. Die Modellierung der kundensichtbaren Merkmale im Bereich des Anlagenbaus [FLK+14B] ist zwar noch wenig verbreitet, ermöglicht bzw. erfordert aber die explizite Auseinandersetzung und Dokumentation der Kundenwünsche in formalisierter Weise. Sich daraus ergebende Vorteile hinsichtlich der Definition von Granularität oder Abstraktion werden jedoch durch die tabellarische Beschreibung der Zuordnung von Merkmalen zu den gewerkspezifischen Lösungsbestandteilen nicht ausgeschöpft. Diese Art der Zuordnung ist im Bereich eines akademischen Fallbeispiels noch handhabbar; eine Skalierbarkeit auf Beispiele industriellen Charakters und Umfangs ist jedoch nicht gegeben.
Entgegen der Forderung aus [FFV12A], Varianten wiederverwendbarer Einheiten seien nur gewerkeübergreifend sinnvoll umzusetzen [FFV12A, S. 1689], werden die Beziehungen zwischen gewerkspezifischen Lösungsbestandteilen auf Ebene der Produktlinie, also nicht lediglich der Varianten, in [FLK+14B] vernachlässigt. Folglich erlaubt der Wiederverwendungsansatz zwar, zwischen den verschiedenen Gewerken abweichende Definitionen der wiederverwendbaren Artefakte vorzunehmen, stellt diese aber nicht in Bezug zueinander, sodass die Artefakte zwar gemeinsam selektiert werden, anschließend aber manuell konsolidiert werden müssen. Der Aufwand dieses Schrittes ist nur schwer abzuschätzen und stellt den interdisziplinären Charakter dieses Ansatzes in Frage. Die Techniken zur Konsistenzprüfung nach [FLK+14A] werden in [FLK+14B] nicht aufgegriffen. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-9 zu entnehmen.

Tabelle 4-9: Einordnung des „Interdisziplinärer Produktlinienansatz für Maschinen- und Anlagenbau nach Fuchs et al.“

Abgedeckte Phasen	Akquisition, Planung, Realisierung, Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Maschinenbau, Hardwareplanung, Software		
Klassifikation Wiederverwendung	Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität	
systematisch, produktlinienbasiert	Produktlinien, Bausteine	ja, Merkmalmodelle	

4.1.10. Function Based Engineering nach Himmler et al.

Der Ansatz des „Function Based Engineering“ nach [HIM14; HLO+14; HILA15] dient der funktionsorientierten Standardisierung von Anlagen, um das Engineering hinsichtlich der interdisziplinären Zusammenarbeit zu optimieren sowie den Wiederverwendungsgrad zu steigern. Kern des Ansatzes ist ein Prozessmodell für ein funktionsorientiertes Engineering sowie ein Objektmodell für Anlagen [HLO+14, S. 405].

Das Prozessmodell wird in zwei Ausprägungen vorgestellt. Die erste Ausprägung dient der Entwicklung standardisierter Anlagen, ohne zuvor geplante Anlagen in Betracht zu ziehen. In der Phase „Define“ wird eine funktionale Struktur, inklusive optionaler Funktionen, definiert. In der Phase „Standardize“ werden Varianten dieser funktionalen Strukturen erzeugt, indem die zuvor definierten Optionen selektiert, also Variabilität gebunden wird. Die Auswahl geschieht ohne Nutzung adäquater Variabilitätsmodellierungsansätze (vgl. Kapitel 3.3.3). In der dritten Phase „Realize“ wird dann diejenige standardisierte Anlagenvariante herangezogen, welche die Kundenanforderungen am besten erfüllt. Anschließend erfolgt die Zuordnung der Funktionen zu den Mechatronischen Objekten nach [BGK+11], welche diese Funktionen realisieren sollen [HLO+14, S. 408F.].
Die zweite Ausprägung des Prozessmodells kommt zum Tragen, wenn bereits geplante Anlagen vorliegen, die in standardisierte Anlagen überführt werden sollen. In diesem Fall wird das Prozessmodell um drei Phasen erweitert, welche der zuvor beschriebenen Definition vorausgehen. Diese Phasen werden als „Analyze, Prepare Features, Prepare Functions“ bezeichnet [HLO+14, S. 412] und dienen der Aufbereitung bestehender Lösungen, um diese zur Wiederverwendung bereit zu stellen, werden aber nicht detailliert beschrieben.
Das Objektmodell umfasst die Elemente „Customer Requirement Specification, Plant, Function, Mechatronic Object, Feature, Purchasable Object“ sowie die Relationen zwischen diesen Objekten, die in [HLO+14, S. 410] erläutert werden. Dieses Objektmodell kapselt die interdisziplinären Zusammenhänge und Beziehungen in Form Mechatronischer Objekte, sodass die Herausforderungen der interdisziplinären Wiederverwendung nicht mehr berücksichtigt werden müssen. Das Objektmodell wird ergänzt durch ein Sichtenmodell, welches die Sichten „Functional Engineering View, Component View, Production View“ umfasst. So soll der Übergang von den Funktionen im „Functional Engineering View“ über die Mechatronischen Objekte im „Component View“ zu den „Purchasable Objects” im „Production View“ ermöglicht werden. Allerdings werden die interdisziplinären Querbeziehungen nicht thematisiert, stattdessen wird eine 1:1-Zuordnung vorgenommen [HLO+14, S. 411].

Der Ansatz des Function Based Engineering weist sinnvolle Impulse für das wiederverwendungsbasierte Engineering auf. So wird in [HLO+14] bei der Entwicklung der wiederverwendbaren Artefakte, unabhängig von deren Art, dahingehend differenziert, ob diese neu entwickelt oder aber aus

bestehenden Lösungen extrahiert werden. Die Beschreibung der Tätigkeiten innerhalb des Vorgehensmodells ist jedoch zu kurz gefasst, um die Möglichkeit eines Transfers in die industrielle Praxis adäquat zu bewerten. So wird beispielsweise nicht beschrieben, wann die Entwicklung eines umfassenden, funktionalen Anlagenstandards überhaupt als sinnvoll zu erachten ist [HLO+14, S. 412]. Inwiefern die interdisziplinäre Zusammenarbeit durch die Kapselung der Lösungsbestandteile in Mechatronische Objekte, deren Entwicklung nicht thematisiert wird, gesteigert werden kann, bleibt fraglich.

Variabilität wird lediglich innerhalb der standardisierten, funktionalen Strukturen vorgesehen, wobei dies lediglich die Variabilität des Problemraumes umfasst. Die technische Lösung / Realisierung wird in jedem Projekt kundenindividuell erstellt, basierend auf der standardisierten, funktionalen Struktur, welche den Kundenanforderungen am besten entspricht. Folglich wird Variabilität innerhalb der technischen Lösung oder gar innerhalb der Mechatronischen Objekte nicht berücksichtigt. Die vorgesehene Variabilität des Problemraumes wird darüber hinaus nicht explizit modelliert. Gerade aber diese Modellierung wäre von großer Bedeutung, weil eine Standardisierung auf Ebene ganzer Anlagen zu einer enormen Variabilität führen kann, die ohne dezidierte Variabilitätsmodellierung nicht gehandhabt werden kann. Auf alternativer Ebene zu standardisieren, beispielsweise auf Ebene von Teilanlagen, wird zwar nicht explizit vorgeschlagen, scheint aber möglich. Eine zusammenfassende tabellarische Einordnung des Ansatzes ist Tabelle 4-10 zu entnehmen.

Tabelle 4-10: Einordnung „Function Based Engineering nach Himmler et al."

Abgedeckte Phasen	Akquisition → Planung → Realisierung → Inbetriebnahme		
Abgedeckte Gewerke	Technische wie auch nicht technische Gewerke, allerdings in „Mechatronic Objects" gekapselt [HLO+14, S. 409]		
Klassifikation Wiederverwendung		Wiederverwendungsmechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
systematisch		Bibliotheken, funktionale Muster	eingeschränkt, optionale und alternative Funktionen

4.2. Zusammenfassung der Wiederverwendungskonzepte

Wie der vorige Abschnitt zeigt, existiert bereits eine große Bandbreite an Wiederverwendungskonzepten, die jedoch hinsichtlich der abgedeckten Gewerke und der Ausgestaltung der Konzepte teils stark differieren. Eine übersichtliche Einordnung dieser Wiederverwendungskonzepte anhand zentraler Aspekte, wie der abgedeckten Gewerke, der verwendeten Wiederverwendungsmechanismen oder auch der Berücksichtigung von Variabilität kann Tabelle 4-11 entnommen werden.

Tabelle 4-11: Kumulierte tabellarische Einordnung der Wiederverwendungskonzepte

Wiederverwendungs-konzept	Abgedeckte Gewerke	Klassifikation Wiederverwendung	Wiederverwendungs-mechanismus	Berücksichtigung von Variabilität
Hady et al. (→ 4.1.1)	Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung, Stahlbau, Automatisierungshardware (bedingt)	opportunistisch bis systematisch	Bibliotheken mit Modulen	nein, nur definierte Varianten
Uzuner et al. (→ 4.1.2)	Verfahrenstechnik, Apparateplanung, Rohrleitungsplanung	systematisch, produktlinien-basiert	Objekt-Bibliotheken (Typ-Instanz)	ja, in Entscheidungs-bäumen
Bramsiepe et al. (→ 4.1.3)	Verfahrenstechnik, Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung	systematisch	Bibliotheken mit Modulen	nein, nur definierte Varianten
Rottke et al. (→ 4.1.4)	Apparatetechnik, Rohrleitungsplanung	systematisch	Bibliotheken mit (Baureihen von) Modulen	nein, definierte Varianten, in diskreter Abstufung
Obst et al. (→ 4.1.5)	Apparatetechnik, Mechanik, Elektrotechnik, Prozessleittechnik (bedingt)	systematisch	Bibliothek (Templates und Pattern)	nein
MOVA (→ 4.1.6)	Automatisierungstechnik (Fokus: Steuerungs- und Leitsystementwicklung [ORD+01, S. 20])	systematisch	Bibliothek mit Modulen	implizit (implementierungs-spezifische Optionen)
Maga et al. (→ 4.1.7)	Mechanik, Elektrotechnik, Automatisierung, Bauwesen, Softwaretechnik (jeweils inklusive Planung, Qualitätssicherung und Test)	systematisch, produktlinien-basiert	Module, Produktlinien, Bibliotheken	ja, explizite Model-lierung vorgesehen, kein konkreter Ansatz
Mahler (→ 4.1.8)	Automatisierungstechnik bzw. Prozessleittechnik	systematisch	Modularisierung / Pattern	nicht explizit
Fuchs et al. (→ 4.1.9)	Maschinenbau, Hardwareplanung, Software	systematisch, produktlinien-basiert	Produktlinien, Bausteine	ja, Merkmalmodelle
Himmler et al. (→ 4.1.10)	Technische wie auch nicht technische Gewerke, allerdings in „Mechatronic Objects“ gekapselt [HLO+14, S. 409]	systematisch	Bibliotheken, funktionale Muster	eingeschränkt, optio-nale und alternative Funktionen

Die Übersicht in Tabelle 4-11 verdeutlicht, dass alle beschriebenen Wiederverwendungskonzepte eine weitgehend systematische Wiederverwendung unterstützen. Während dieser Umstand der Auswahl wissenschaftlich umfassend beschriebener Wiederverwendungskonzepte geschuldet ist, ist das Bild bei den jeweilig abgedeckten Gewerken weitaus differenzierter. So besteht eine Gruppe von Konzepten (Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4), die auf die Verfahrenstechnik bzw. die Apparateplanung fokussiert ist. Neben Ansätzen, die eher auf die Automatisierungstechnik ausgelegt sind (Kapitel 4.1.6 und 4.1.8), gibt es auch eine Gruppe von Konzepten (Kapitel 4.1.5, 4.1.7, 4.1.9 und 4.1.10), welche die interdisziplinäre systematische Wiederverwendung thematisieren.

Bei der Berücksichtigung von Variabilität zeigt sich ein heterogenes Bild. Ein großer Teil der Konzepte berücksichtigt Variabilität lediglich implizit (Kapitel 4.1.6 und 4.1.8), unsystematisch (Kapitel 4.1.1, 4.1.3, 4.1.4 und 4.1.10) oder vernachlässigt diesen Aspekt gänzlich (Kapitel 4.1.3 und 4.1.5). Aber auch diejenigen Ansätze, welche Variabilität explizit berücksichtigen, weisen eine große Bandbreite der konzeptionellen Verankerung auf: Der Ansatz nach H. Uzuner (Kapitel 4.1.2) thematisiert die Variabilität der technischen Lösung ausführlich. Die Modellierung der Variabilität wird hier mittels Entscheidungsbäumen vorgenommen, ohne mögliche Alternativen zu diskutieren oder die Defizite dieses Modellierungsansatzes zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.3.3). Hingegen werden in den Arbeiten von C. Maga (Kapitel 4.1.7) verschiedene Ansätze der Variabilitätsmodellierung diskutiert, diese aber nicht derart spezifisch beschrieben, dass ein Transfer in die Prozesse einer Engineering-Organisation ermöglicht werden würde. Die Übersicht zeigt aber, unabhängig von der jeweiligen Unterstützung, dass Fragestellungen bezüglich der Variabilität im Kontext der Wiederverwendung über Gewerkegrenzen hinweg Beachtung finden.

Da es das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, bestehende Ansätze aufzugreifen, zeigt das heterogene Bild, welches Tabelle 4-11 hinsichtlich der verschiedenen Wiederverwendungskonzepte bietet, Ansatzpunkte für ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept. Während gewerkeübergreifende Konzepte das übergeordnete Vorgehen spezifizieren, geben teilweise stark spezialisierte Ansätze (beispielsweise bezüglich der Apparatetechnik) Aufschluss darüber, wie ein Wiederverwendungskonzept gestaltet sein muss, um auch in diesen Fachdisziplinen Akzeptanz zu finden.

4.3. Anforderungsermittlung für ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept

Im vorigen Abschnitt werden Wiederverwendungskonzepte beschrieben, welche verschiedenen Gewerken entstammen und teils sehr heterogene Charakter aufweisen. Neben der konzeptionellen Beschreibungen der Wiederverwendungskonzepte, die in Kapitel 4.1 referenziert sind, äußern Autoren verschiedenen Hintergrundes darüber hinaus auch direkt Anforderungen an interdisziplinäre Wiederverwendung. Im Folgenden wird beschrieben, wie diese heterogenen Quellen von Konzepten und Anforderungen in der vorliegenden Arbeit strukturiert und in eine umfassende Anforderungsbasis überführt werden.

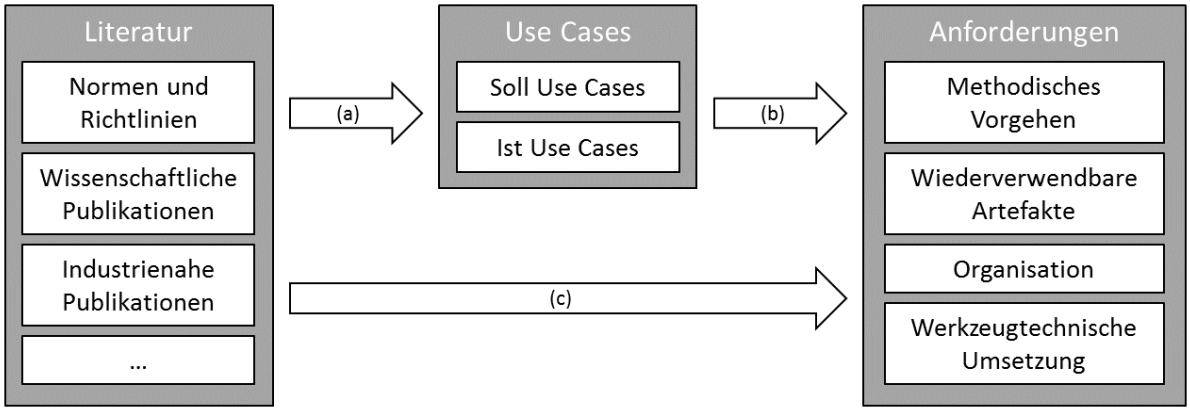

Abbildung 4-1: Vorgehen zur Ableitung von Anforderungen

Das in Abbildung 4-1 dargestellte Vorgehen zur Gewinnung von Anforderungen ist an [CoC08] und [PoRu11] angelehnt. Eher prozessuale Beschreibungen möglicher wiederverwendungsspezifischer Vorgehensmodelle werden herangezogen, um so genannte Use-Cases zu formulieren. Dieser Weg wird durch Pfeil (a) verdeutlicht und nebst der Beschreibung der resultierenden Use-Cases in Kapitel 4.3.1 thematisiert. Sowohl die Beschreibung einer idealen (Soll-Use-Cases) wie auch einer defizitären Anwendung (Ist-Use-Cases) ist möglich [CoC08]. Die Use-Cases erlauben eine prozessuale Spezifikation der Tätigkeiten und machen eine darauf basierende Ableitung von Anforderungen transparent, was durch Pfeil (b) symbolisiert wird. Anforderungen, die aus Ist-Use-Cases abgeleitet werden, dienen folglich der Vermeidung des, in diesem Ist-Use-Case beschriebenen, defizitären Vorgehens. Anforderungen, welche aus Soll-Use-Cases abgeleitet werden, beschreiben im Gegensatz dazu die Ermöglichung des beschriebenen idealen Vorgehens. Die aus den Use-Cases abgeleiteten Anforderungen werden durch Anforderungen ergänzt, die von Autoren direkt postuliert oder umgesetzt werden, aber keinen prozessualen Charakter aufweisen. Pfeil (c) veranschaulicht diese Vorgehensweise. Die Erarbeitung und Gruppierung der Anforderungen wird in Kapitel 4.3.2 detailliert beschrieben.

4.3.1. Use-Cases für Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen

Use-Cases lassen sich nach [Coc08] besonders dann gewinnbringend anwenden, wenn das gewünschte oder zu vermeidende Verhalten eines Systems oder die Interaktion dessen mit Akteuren verschiedener Rollen zu beschreiben ist [Coc08, S. 15f.]. Obwohl im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept und kein System im Sinne eines real manifestierten Produktes zu entwickeln ist, lässt sich der Ansatz der Use-Cases übertragen, da auch ein Wiederverwendungskonzept Anforderungen bezüglich der Ausführbarkeit durch Anwender und der daraus resultierenden Interaktion zwischen diesen erfüllen muss. Um eine homogene Anforderungsbasis zu erhalten, werden die Use-Cases im Anschluss in Anforderungen transformiert[12] und teilweise mit Anforderungen aus der Literatur zusammengeführt.

Tabelle 4-12: Auswahl von Rollen nach [Coc08] und [VDI 6600-1] für die Use-Case Spezifikation

Rolle / Akteur	Erläuterung
Fach-spezialist (Team-mitglied)	*Der Fachspezialist erfüllt die inhaltlichen Aufgaben, welche im Rahmen von internen oder externen Projekten zu erfüllen sind. Darüber hinaus kann der Fachspezialist als Erfahrungs-träger für spezifische Themenfelder innerhalb der Engineering-Organisation angenommen werden. Der Fachspezialist entstammt meist eines der am Engineering beteiligten Gewerke.*
Projektleiter	*Der Projektleiter ist verantwortlich für interne wie auch externe Projekte. Interne Projekte dienen der Weiterentwicklung der Engineering-Organisation, wohingegen ein externes Projekt das Engineering einer kundenindividuellen Anlage umfasst. In der Regel verfügt der Projektleiter über eine fundierte fachliche Ausbildung in Kombination mit einer administrativen Zusatzqualifikation.*
Entscheider	*Repräsentiert eine führende Rolle innerhalb der Engineering-Organisation und hat die Berechtigung, Entscheidungen mit Auswirkungen auf kurz- und mittelfristige Projekte sowie die zukünftige Strategie der Organisation zu treffen.*
Engineering-Organisation	*Die Engineering-Organisation tritt gemäß der Definition (vgl. Glossar) im Engineering als planende und ausführende Instanz auf, deren Ziel es ist, die Kundenanforderungen hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität zu erfüllen. Es ist davon auszugehen, dass Entscheider, Fachspezialist und Projektleiter bei der Engineering-Organisation angestellt sind oder in einem ähnlichen Vertragsverhältnis stehen.*
(Externer) Kunde	*Der Kunde ist in diesem Zusammenhang als Auftraggeber des Engineerings einer individuellen Anlage zu verstehen. Dabei kann es sich um den zukünftigen Anlagenbetreiber wie auch einen unterbeauftragten Auftragnehmer handeln, der das Engineering überwacht und steuert.*

Nach [Coc08] spielen auch die in Betracht gezogenen Akteure und Stakeholder eine erhebliche Rolle. Im Rahmen dieser Arbeit kann dabei nicht auf konkrete unternehmensspezifische Rollenbeschreibungen zurückgegriffen werden, da die Use-Cases sowohl gewerke- und domänenübergreifend anwendbar aber auch auf verschiedene Organisationen zu projizieren sein sollen. Aufgrund dessen werden die verwendeten Rollen an die Definition nach [VDI 6600-1] angelehnt, die primär Anforderungen an sowie Aufgaben von Projektingenieuren umfasst, nicht aber anhand gewerkspezifischer Tätigkeitsbereiche ausgeprägt ist. Die Differenzierung zwischen Teammitglied und Fachspezialist wird im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit berücksichtigt, da diese Trennung als sehr organisationsspezifisch anzunehmen ist [VDI 6600-1, S. 10f.]. Die Auswahl der Rollen ist in Tabelle 4-12 ersichtlich und wird ergänzt durch die Rolle „Engineering-Organisation“, da auch diese als Stakeholder hinsichtlich der Wiederverwendung angesehen werden muss.

[12] Nach [Coc08] ist dieser Schritt nicht zwingend erforderlich, da Anforderungen und Use-Cases auch koexistieren können, um das geforderte Verhalten eines Systems zu spezifizieren [Coc08, S. 153].

Unter Verwendung der erläuterten Rollen als Stakeholder und Akteure konnten sechs Use-Cases identifiziert und ausformuliert werden, die übersichtsartig Tabelle 4-13 zu entnehmen sind. Die Reihenfolge bzw. die Ziffern der Use-Cases haben dabei keinerlei semantische Aussagekraft. Die detaillierte Beschreibung der Use-Cases umfasst die Quellen, Stakeholder, Akteure, Schritte des Vorgehens inklusive möglicher Variationen, Vor- und Nachbedingungen sowie den resultierenden Anforderungen und kann Anhang A entnommen werden. Hier finden sich zwei Ist-Use-Cases, welche ein defizitäres Vorgehen beschreiben, sowie vier Soll-Use-Cases, welche ein hinsichtlich der Wiederverwendung förderliches Vorgehen skizzieren.

Tabelle 4-13: Übersicht der Use-Cases für systematische interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering

Use-Case	
Ist-Use-Case 1:	*Wiederverwendung wird unsystematisch betrieben*
Ist-Use-Case 2:	*Wiederverwendung wird basierend auf feingranularen gewerkspezifischen Einheiten betrieben*
Soll-Use-Case 3:	*Anforderungen an wiederverwendbare Einheiten aufbereiten*
Soll-Use-Case 4:	*Wiederverwendbare Einheiten systematisch und interdisziplinär entwickeln*
Soll-Use-Case 5:	*Ändern / Erneuern wiederverwendbarer Einheiten*
Soll-Use-Case 6:	*Nutzen der wiederverwendbaren Einheiten im Engineering automatisierter Anlagen*

Die erarbeiteten Use-Cases decken die vorgehensspezifischen Forderungen und Schilderungen der wissenschaftlichen Ansätze aus Kapitel 4.1 ab. Eine Zuordnung zwischen wissenschaftlichen Wiederverwendungskonzepten und den daraus abgeleiteten Use-Cases kann Tabelle 4-14 entnommen werden. Hier wird deutlich, dass einige Autoren lediglich ein aus deren Sicht optimales Vorgehen hinsichtlich der Wiederverwendung beschreiben (z.B. Ł. Hady, Kapitel 4.1.1), während andere Autoren auch die Defizite unsystematischer Wiederverwendung klar benennen und alternative Ansätze vorschlagen (z.B. C. Maga, Kapitel 4.1.7). Detaillierte Verweise, auf welchen Publikationen die Use-Cases abgestützt sind, können der jeweiligen Beschreibung in Anhang A entnommen werden.

Tabelle 4-14: Wiederverwendungskonzepte und erarbeitete Use-Cases

Konzept nach: / **Use-Case:**	Ist-Use-Case 1	Ist-Use-Case 2	Soll-Use-Case 3	Soll-Use-Case 4	Soll-Use-Case 5	Soll-Use-Case 6
Hady et al. (→ 4.1.1)				x	x	x
Uzuner et al. (→ 4.1.2)		x				x
Bramsiepe et al. (→ 4.1.3)				x	x	
Rottke et al. (→ 4.1.4)						x
Obst et al. (→ 4.1.5)		x				
MOVA (→ 4.1.6)		x	x			x
Maga et al. (→ 4.1.7)	x	x	x	x	x	x
Mahler (→ 4.1.8)				x		x
Fuchs et al. (→ 4.1.9)	x	x		x		
Himmler et al. (→ 4.1.10)	x			x		

x Use-Case wird vom jeweiligen Autor beschrieben oder gefordert

Gerade die Soll-Use-Cases umfassen, trotz der recht geringen Anzahl, die relevanten Aspekte eines wiederverwendungsbasierten Engineerings. Die Soll-Use-Cases sind nebst den Assoziationen zu den relevanten Akteuren in Abbildung 4-2 ersichtlich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Entscheider und Fachspezialist gruppiert abgebildet, da sie in verschiedener Ausprägung an allen Soll-Use-Cases beteiligt sind. Der Projektleiter hingegen weist keine Aktivität in Use-Case 5 auf, weil davon auszugehen ist, dass die Aktualisierung und Überprüfung der Basis von wiederverwendbaren Einheiten einen kontinuierlichen Prozess darstellt, der nicht in Form von Projekten organisiert ist.

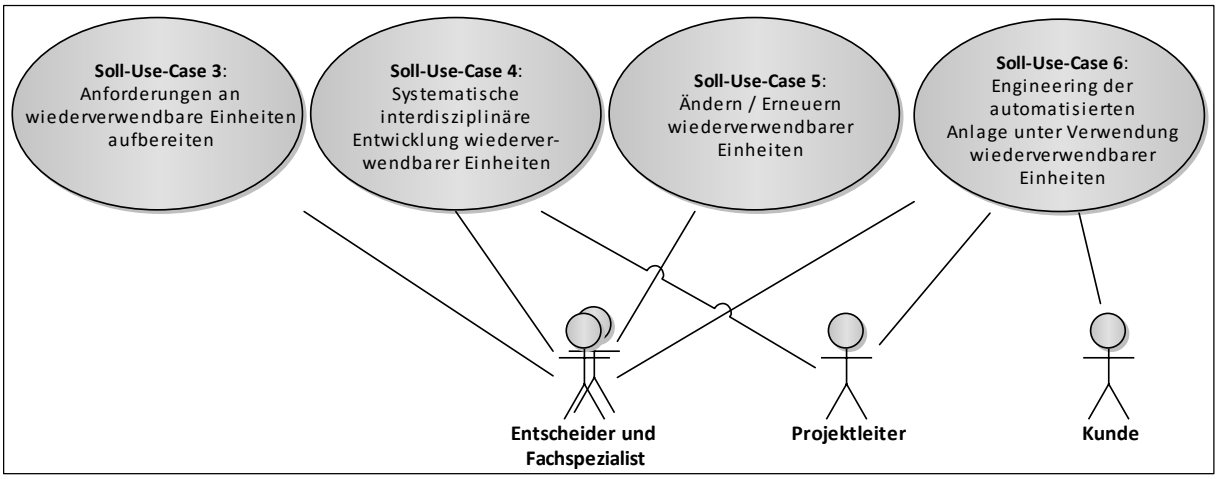

Abbildung 4-2: Soll-Use-Cases und deren Akteure für interdisziplinäre systematische Wiederverwendung nach [JAC98]

Auf eine Dekomposition und hierarchische Strukturierung der Use-Cases [JAC98, S. 170FF.] kann in dieser Arbeit verzichtet werden, da die Ableitung der Anforderungen eine detaillierte Aufarbeitung der adressierten Aspekte ermöglicht (aus Use-Case 4 resultieren beispielsweise acht Anforderungen). Die Ableitung und Gruppierung der Anforderungen wird im nachfolgenden Abschnitt thematisiert.

4.3.2. Anforderungen an interdisziplinäre systematische Wiederverwendung im Engineering

Gemäß des in Abbildung 4-1 beschriebenen Vorgehens werden die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Anforderungen an ein interdisziplinäres systematisches Wiederverwendungskonzept sowohl direkt aus der Literatur wie auch aus den zuvor formulierten Use-Cases gewonnen. Hierbei muss nach der Art der Use-Cases differenziert werden. Anforderungen, die aus Ist-Use-Cases erarbeitet wurden, vermeiden das beschriebene defizitäre Vorgehen. Dem entgegen stehen diejenigen Anforderungen, welche aus den Soll-Use-Cases abgeleitet wurden. Diese Anforderungen spezifizieren, was benötigt wird, um ein Wiederverwendungskonzept zu dem beschriebenen idealen Vorgehen zu befähigen. Aufgrund der vorgenommenen Konsolidierung kann der Fall auftreten, dass eine Anforderung sowohl aus einem Ist-Use-Case wie auch aus einem Soll-Use-Case abgeleitet wird, wie es beispielsweise bei Anforderung M-1 der Fall ist.

Eine Sammlung aller im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Anforderungen in ausführlich spezifizierter Form nach [PAR10, S. 45FF.] kann Anhang B entnommen werden. Diese ausführliche Spezifikation enthält neben der Beschreibung, der Begründung und der Dokumentation der Bezüge zwischen den verschiedenen Anforderungen jeweils ein Erfüllungskriterium, anhand dessen eine

Bewertung der Wiederverwendungskonzepte hinsichtlich der Anforderungen möglich ist. Tabelle 4-15 zeigt eine Übersicht der Anforderungen, strukturiert in vier Gruppen. Diese Gruppen dienen der Übersichtlichkeit, sind jedoch aufgrund der Wechselwirkungen und Bezüge nicht als trennscharfe und eindeutige Kategorisierung zu verstehen. So hat nahezu jede Anforderung, die das methodische Vorgehen betrifft, beispielsweise auch Auswirkungen auf die werkzeugtechnische Umsetzung. Innerhalb der alphanumerischen Kennung der Anforderungen steht „M-*“ für Anforderungen hinsichtlich des methodischen Vorgehens, „E-*“ für Anforderungen an die wiederverwendbaren Einheiten, „O-*“ die organisatorischen Anforderungen und „W-*“ für Anforderungen an eine werkzeugtechnische Umsetzung. Die Reihenfolge bzw. die Ziffern der Anforderungen haben dabei keinerlei semantische Aussagekraft. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass es sich bei den aufgeführten Anforderungen nur um solche handelt, welche einen direkten Bezug zur Wiederverwendung aufweisen. Anforderungen generellen Charakters, welche beispielsweise das Engineering an sich betreffen, werden im Laufe dieser Arbeit nur implizit berücksichtigt. Ein Beispiel dessen kann eine Anforderung sein, welche die technische Umsetzung von Standards im Engineering betrifft, ohne aber einen Bezug zur Wiederverwendung aufzuweisen.

Anforderungen, welche das methodische Vorgehen thematisieren, stellen die umfänglichste Gruppe der identifizierten Anforderungen dar. Diese Verteilung resultiert zum einen daraus, dass einige dieser Anforderungen auch Auswirkungen auf andere Gruppen aufweisen, wobei primär die konzeptionellen Aspekte im Zentrum dieser Arbeit stehen. Zum anderen verdeutlicht diese Gewichtung, dass die grundlegenden Herausforderungen hinsichtlich Wiederverwendung im Engineering auf konzeptioneller Ebene gesehen werden und primär auch dort zu lösen sind. Die Anforderungen umfassen hier beispielsweise die interdisziplinäre Zusammenarbeit (Anforderung M-2), die Definition wiederverwendbarer Einheiten (Anforderung M-9), die Überprüfung der Eignung (Anforderung M-3), die Schritte zur Aufbereitung (Anforderung M-4) oder auch die Pflege und Aktualisierung der wiederverwendbaren Einheiten (Anforderung M-8).

Die wiederverwendbaren Einheiten werden in der darauffolgenden Gruppe der Anforderungen spezifiziert. Hier spiegelt sich auch die Forderung nach der interdisziplinären Zusammenarbeit wider, indem Anforderung E-1 (in Kombination mit Anforderung M-9) die Dekomposition der Anlage in funktionale und gewerkeübergreifend abgestimmte Einheiten thematisiert. Herauszuheben ist auch die Forderung nach Berücksichtigung gewerkeübergreifender Beziehungen (Anforderung E-2) sowie die explizite Modellierung variabler Anteile (Anforderung E-3). Wie bereits Tabelle 4-11 zeigt, stellt insbesondere die explizite Berücksichtigung der Variabilität eine Anforderung dar, der bisher nur wenige Ansätze im Kontext des Engineering automatisierter Anlagen gerecht werden.

Tabelle 4-15: Übersicht der Anforderungen für systematische interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering

Anforderungen an das methodische Vorgehen		
	Anforderung M-1:	*Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen*
	Anforderung M-2:	*Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren*
	Anforderung M-3:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können*
	Anforderung M-4:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können*
	Anforderung M-5:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen*
	Anforderung M-6:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein*
	Anforderung M-7:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können*
	Anforderung M-8:	*Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen*
	Anforderung M-9:	*Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung*
Anforderungen an wiederverwendbare Einheiten		
	Anforderung E-1:	*Die Dekomposition muss sich an domänenspezifischen Normen orientieren*
	Anforderung E-2:	*Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden*
	Anforderung E-3:	*Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden*
	Anforderung E-4:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten*
Organisatorische Anforderungen		
	Anforderung O-1:	*Die Integration der Wiederverwendung in die Prozesse der Engineering-Organisation muss ermöglicht werden*
Anforderungen an die werkzeugtechnische Umsetzung		
	Anforderung W-1:	*Das Wiederverwendungskonzept muss sich in bestehende Werkzeuge der Engineering-Organisation integrieren lassen*
	Anforderung W-2:	*Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein*

Die Gruppe der organisatorisch geprägten Anforderungen scheint unter anderem in Tabelle 4-15 stark unterrepräsentiert zu sein. Dem ist jedoch nicht so, da insbesondere der Großteil der konzeptionellen Anforderungen einen erheblichen Einfluss auf die Organisation hat, hier aber konzeptionelle Fragestellungen im Vordergrund stehen. Die Forderung nach der Integrierbarkeit in die Prozesse der Engineering-Organisation (Anforderung O-1) weist eine große Relevanz hinsichtlich der Überführbarkeit des wissenschaftlichen Konzeptes in eine mögliche industrielle Anwendung auf und ist demzufolge nicht zu vernachlässigen. Ähnlich der zuvor beschriebenen Auswirkung einer mangelnden Integrierbarkeit kann auch eine Inkompatibilität mit gängigen Engineering-Werkzeugen (Anforderung W-1) zu einer fehlenden Akzeptanz seitens der Anwender und somit einem Scheitern des Konzeptes führen. Die Forderung nach einer bidirektionalen Nachvollziehbarkeit der Wiederverwendung (Anforderung W-2) hat den Ursprung nicht nur in Fragen der Haftung, sondern ermöglich auch erst eine Aktualisierung der wiederverwendbaren Einheiten, nachdem mögliche Fehler in der Anwendung detektiert wurden (vgl. Anforderung M-8).

Ebenso wie die Use-Cases sind auch die Anforderungen derart spezifiziert, dass sie in verschiedenen Domänen und Gewerken Gültigkeit besitzen. Jedoch ist zu erwarten, dass in alternativen Domänen auch unterschiedliche Anforderungen als besonders wichtig erachtet werden. Aufgrund dessen sowie der Tatsache, dass die Erfüllung der Anforderungen nicht durch mangelnde finanzielle Ressourcen priorisiert und abgestuft werden muss, wird im Nachfolgenden auf eine Gewichtung der Anforderungen verzichtet. In Konsequenz werden die Anforderungen für den weiteren Verlauf der Arbeit mit derselben Priorität behandelt, schlagen sich aber aufgrund deren Charakters (Gruppierung Tabelle 4-15) in verschiedenen Aspekten des zu erarbeitenden Konzeptes nieder.

4.4. Überprüfung der Anforderungserfüllung bestehender Wiederverwendungskonzepte

Die Grundlage des vorliegenden Kapitels stellt die Beschreibung und Einordnung der Wiederverwendungskonzepte für das Engineering automatisierter Anlagen dar, wobei Wiederverwendungsansätze gänzlich verschiedenen Charakters angeführt wurden. Auf der einen Seite stehen stark spezialisierte Konzepte für einzelne Gewerke, die detaillierte Teilaufgaben innerhalb des Engineerings thematisieren und diesbezügliche Ansätze vorschlagen. So wird beispielsweise in Kapitel 4.1.2 ein Ansatz beschrieben, welcher die Erstellung der R&I-Fließschemata basierend auf definierten variablen Lösungen beschleunigt und optimiert. Auf der anderen Seite stehen Ansätze, die Wiederverwendung auf Ebene der disziplinenübergreifenden Zusammenarbeit verankern, aufgrund der Breite detaillierte Aufgaben der Gewerke jedoch nicht thematisieren, wie beispielsweise in Kapitel 4.1.7 beschrieben. Diese Bandbreite bestehender Wiederverwendungskonzepte wurde genutzt, um 6 Use-Cases und 16 Anforderungen für eine systematische interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering abzuleiten. Während Tabelle 4-14 den Zusammenhang der Wiederverwendungskonzepte sowie der darauf abgeleiteten Use-Cases verdeutlicht (entsprechend Pfeil (a) in Abbildung 4-1), zeigt Tabelle 4-16 den Zusammenhang zwischen den Wiederverwendungskonzepten und Use-Cases sowie der daraus abgeleiteten Anforderungen. Dabei indiziert ein grau hinterlegtes Feld, dass die jeweilige Anforderung aus dem entsprechenden Use-Case (entsprechend Pfeil (b) in Abbildung 4-1) oder Wiederverwendungskonzept eines Autors (entsprechend Pfeil (c) in Abbildung 4-1) abgeleitet wurde. Weitere Quellen, die nicht im Rahmen der Wiederverwendungskonzepte in Kapitel 4.1 referenziert wurden, die entsprechenden Anforderungen aber stützen, können den detaillierten Beschreibungen der Anforderungen in Anhang B entnommen werden. Ein Sonderfall stellt Anforderung O-1 dar, die nicht von Autoren der vorherig beschriebenen Wiederverwendungskonzepte, sondern lediglich von der Richtlinie [VDI/VDE 3695-3] gefordert wird.

Neben der Darstellung der Zusammenhänge gibt Tabelle 4-16 auch Aufschluss darüber, inwiefern die erarbeiteten Anforderungen von dem jeweiligen Wiederverwendungskonzept erfüllt werden. Basis dieser Bewertung ist das Erfüllungskriterium, welches der ausführlichen Beschreibung einer jeden Anforderung in Anhang B entnommen werden kann. Um die Repräsentativität der Bewertung sicherzustellen geschieht diese unter Bezugnahme auf die theoretische Beschreibung der Konzepte ohne Berücksichtigung der jeweiligen Fallbeispiele. Dies ist notwendig, da Umfang und Charakter der verschiedenen Fallbeispiele stark divergieren und eine Vergleichbarkeit auf dieser Basis erschweren. Für die Bewertung wird eine einfache, dreistufige Metrik verwendet. Die Abstufung reicht von der Nichterfüllung der Anforderung, über „bedingt erfüllt“, bis hin zur vollen Erfüllung der Anforderung auf

konzeptioneller Ebene. Die Bewertung „bedingt erfüllt“ wird vergeben, wenn die Erfüllung der Anforderung nicht ausgeschlossen ist, in den analysierten Arbeiten konzeptionell aber nicht explizit thematisiert wird. Die Bewertung der Wiederverwendungskonzepte basiert auf den jeweiligen, in Kapitel 4.1 referenzierten, Quellen.

Tabelle 4-16: Quellen der Anforderungen und Überprüfung der Anforderungserfüllung

		Anforderung															
		Methodisches Vorgehen									Wiederverwendbare Einheit				Organisation	Werkzeug	
		Anforderung M-1	Anforderung M-2	Anforderung M-3	Anforderung M-4	Anforderung M-5	Anforderung M-6	Anforderung M-7	Anforderung M-8	Anforderung M-9	Anforderung E-1	Anforderung E-2	Anforderung E-3	Anforderung E-4	Anforderung O-1	Anforderung W-1	Anforderung W-2
Konzept	Hady et al. (→ 4.1.1)	●	◐	○	○	○	○	◐	○	○	●	◐	○	●	◐	◐	○
	Uzuner et al. (→ 4.1.2)	●	◐	○	○	◐	●	◐	○	◐	●	○	●	○	◐	●	○
	Bramsiepe et al. (→ 4.1.3)	●	◐	○	○	○	○	●	○	◐	◐	○	○	◐	●	◐	○
	Rottke et al. (→ 4.1.4)	●	◐	◐	○	○	○	○	○	●	◐	○	○	◐	○	●	○
	Obst et al. (→ 4.1.5)	◐	○	◐	●	◐	○	◐	○	◐	◐	○	○	○	◐	◐	○
	MOVA (→ 4.1.6)	●	◐	○	○	○	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	●	◐	○	○
	Maga et al. (→ 4.1.7)	●	●	○	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	●	●	●	◐	◐	◐
	Mahler (→ 4.1.8)	●	◐	◐	●	○	◐	●	◐	◐	◐	◐	○	●	●	◐	○
	Fuchs et al. (→ 4.1.9)	●	●	○	◐	○	○	○	○	◐	○	◐	◐	○	○	○	○
	Himmler et al. (→ 4.1.10)	●	◐	○	●	○	◐	◐	○	●	○	○	◐	○	◐	●	○
Use-Case	Ist-Use-Case 1	■	■			■						■	■				■
	Ist-Use-Case 2		■				■										
	Soll-Use-Case 3	■		■							■		■				
	Soll-Use-Case 4	■	■		■	■				■	■	■	■				
	Soll-Use-Case 5					■			■								■
	Soll-Use-Case 6	■	■				■	■		■			■	■			■

■ Anforderung resultiert aus Wiederverwendungskonzept / Use-Case
● Anforderung voll erfüllt (Konzeptionelle Umsetzung der Anforderung explizit beschrieben)
◐ Anforderung bedingt erfüllt (Konzeptionelle Umsetzung der Anforderung nicht beschrieben, aber möglich)
○ Anforderung nicht erfüllt (Ansatz steht der konzeptionellen Umsetzung der Anforderung entgegen)

Wie die obere Hälfte von Tabelle 4-16 zeigt, existieren sowohl Anforderungen, die von nahezu allen Wiederverwendungskonzepten erfüllt werden, als auch Anforderungen, die keines der Konzepte voll erfüllt. Dieser Umstand kann als Absicherung angesehen werden, dass die erarbeiteten Anforderungen nicht zu tief angesetzt wurden. So wird Anforderung M-1 von nahezu allen Konzepten voll erfüllt, was jedoch primär der Auswahl der Konzepte geschuldet ist, da wissenschaftlichen Konzepten für die Wiederverwendung in der Regel auch ein systematisches Vorgehen zu Grunde liegen sollte. Wenn auch nicht ebenso deutlich, aber dennoch stark ausgeprägt, ist dies bei Anforderung M-2 der Fall. Hier

bezieht der Großteil der Konzepte auch benachbarte Fachdisziplinen mit ein, wobei der Umfang dieser teils stark divergiert. Diese Informationen können der Spalte „Abgedeckte Gewerke“ der kumulierten Übersicht in Tabelle 4-11 entnommen werden. Auch die Forderung nach einer Orientierung an domänenspezifischen Richtlinien (Anforderung E-1) wird vom Großteil der Ansätze erfüllt, was sich durch die große Relevanz, welche die Dekomposition eines Systems für die Umsetzung eines systematischen Wiederverwendungskonzeptes aufweist, begründen lässt. Hierbei wird allerdings deutlich, dass diese eher in Konzepten berücksichtigt werden, die der Verfahrenstechnik entstammen (vgl. Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4). Auf der anderen Seite fällt auf, dass diese Konzepte hinsichtlich der expliziten Modellierung der Variabilität (Anforderung E-3) oder auch der Berücksichtigung gewerkeübergreifender Beziehungen (Anforderung E-2) Schwächen aufweisen. Eine adäquate Berücksichtigung dieser beiden Aspekte ist lediglich bei Maga et al. (Kapitel 4.1.7) gegeben. Obgleich Anforderung O-1 von keinem der referenzierten Autoren direkt postuliert wurde, erfüllen einige Wiederverwendungskonzepte diese organisatorische Anforderung.

Die teilweise nicht oder nur partiell erfüllten Anforderungen zeigen, dass trotz der Fülle bereits existierender Ansätze noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich systematischer Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen besteht. Hierbei sollte vor der Entwicklung neuer Ansätze und Techniken aber die Integration und geeignete Verknüpfung verschiedener existierender Ansätze untersucht werden. Unter Nutzung von Konzepten anderer Wissenschaftsgebiete werden daher die erarbeiteten Anforderungen im weiteren Verlauf der Arbeit in einem Wiederverwendungskonzept umgesetzt. Das nachfolgende Kapitel zeigt die zentralen Grundgedanken des erarbeiteten Wiederverwendungskonzeptes auf.

5. Grundgedanken des Wiederverwendungskonzeptes

Aufbauend auf dem zuvor erläuterten Stand der Wissenschaft sowie den daraus abgeleiteten Anforderungen werden nachfolgend die Grundgedanken des interdisziplinären systematischen Wiederverwendungskonzepts vorgestellt, das im Rahmen dieser Arbeit beschrieben wird. Die Betrachtung dieser zentralen Aspekte leitet über zu den nachfolgenden Kapiteln, in welchen die konzipierten wiederverwendbaren Einheiten sowie das Wiederverwendungskonzept detailliert beschrieben werden.

5.1. Trennung zwischen projektunabhängigen und projektabhängigen Tätigkeiten

Das Prinzip der dezidierten Trennung zwischen projektunabhängigen und projektabhängigen Tätigkeiten stellt die strukturelle Grundlage des Wiederverwendungskonzeptes dar. Die projektunabhängigen Tätigkeiten umfassen die Entwicklung wiederverwendbarer Artefakte oder Einheiten und die projektabhängigen Tätigkeiten das meist kundenindividuelle Engineering des Systems unter Nutzung dieser Artefakte oder Einheiten. Dieses Prinzip ist bereits in vielen Bereichen der Entwicklung technischer Systeme verbreitet und stellt eine Grundlage aller systematischen Wiederverwendungsansätze (vgl. Kapitel 3.2) dar. So erfordert beispielsweise die Entwicklung eines Baukastens, unabhängig davon, ob dieser für die mechanische Konstruktion oder die Erstellung der Automatisierungssoftware entwickelt wird, ebenso projektunabhängige Aufwände, wie es auch bei der Entwicklung einer Produktlinie der Fall ist. Führt man diesen Gedanken weiter, so kann bereits die Erstellung von Richtlinien, die Normteilreihen (z.B. Zylinderschrauben in [DIN EN ISO 4762]) oder standardisierte Vorgehensmodelle definieren (z.B. [NA 35]), als grundlegende Form der projektunabhängigen Tätigkeit angesehen werden, um nachfolgende projektabhängige Tätigkeiten zu optimieren [SZF+14*].

Die größte Verbreitung dieser Differenzierung ist aber nach wie vor im Bereich des Software-Engineerings zu sehen, wie es in [PBL05; CLNO12] für Software-Produktlinien erläutert wird. Auch [CABA91; FRIS94] zeigen, dass der Mehrwert von im Voraus entwickelten und meist in Bibliotheken gesammelten wiederverwendbaren Einheiten bereits früh erkannt wurde.[13] Es finden sich aber auch für den Bereich des Engineerings automatisierter Anlagen verschiedene wissenschaftliche Arbeiten, wie beispielsweise in Kapitel 4.1.7 beschrieben, welche diese Differenzierung explizit [MAG12; HLO+14] oder implizit [FLK+14B] aufgreifen. Auch in Richtlinien wie der [VDI/VDE 3695-3] ist diese Differenzierung vorgesehen. Motivation ist es auch hier, einen Teil der Aufwände, die im Rahmen des Engineerings anfallen, vor die Auftragserteilung zu verschieben, um bei Auftragserteilung eine schnelle Projektabwicklung zu ermöglichen. Gerade im Engineering kann diese Zeitreduktion langfristig dazu führen, dass Aufträge durch eine Engineering-Organisation eher gewonnen werden können, da eine kürzere Time-to-Market realisiert werden kann und dies für viele Anlagenbetreiber ein entscheidendes Kriterium bei der Vergabe eines Auftrages ist [BRSC12; FFV12A].

Das nachfolgend vorgestellte Wiederverwendungskonzept greift diese Differenzierung explizit auf und besteht folglich aus einem projektunabhängigen Teil (Kapitel 7) und einem projektabhängigen Teil

[13] Die frühe Berücksichtigung der Wiederverwendung im Software-Engineering kann als Hauptursache angesehen werden, dass diese Domäne auch hinsichtlich des Variantenmanagements weiter fortgeschritten ist, als es in anderen Domänen der Fall ist. Weitere Informationen können Kapitel 5.3 entnommen werden.

(Kapitel 8). Dabei umfasst der projektunabhängige Teil die systematische Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten und der projektabhängige Teil die Konzeptbausteine, welche das kundenindividuelle Engineering der Anlage unter Verwendung der wiederverwendbaren Einheiten ermöglichen. Diese Teile des Konzepts sind grundsätzlich zeitlich voneinander entkoppelt, da die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten nicht zwingend mit der Auftragserteilung für ein Anlagenbauprojekt korreliert. Jedoch bestehen wechselseitige Beziehungen, da zum Beispiel neue Erkenntnisse aus abgeschlossenen Projekten für die Wiederverwendung aufbereitet werden können.

5.2. Konsequente Funktionsorientierung über die Gewerkegrenzen

Die Funktionsorientierung stellt, in den projektunabhängigen wie auch den projektabhängigen Anteilen des Konzeptes, die zu realisierenden Funktion in den Vordergrund der Tätigkeiten. Diese Betrachtung ist in der Produktentwicklung [FGP+13], aber auch in gewissen Bereichen der Anlagenplanung, wie der Fertigungstechnik oder auch der Montagetechnik, bereits weit verbreitet [BESÄ10]. Ergänzt wird diese Funktionsorientierung durch grundlegende Arbeiten zur Funktionenanalyse nach [AKI94], die im Rahmen des Wiederverwendungskonzeptes genutzt werden, um den systematischen Umgang mit den Funktionen hinsichtlich Definition und Dekomposition sicherzustellen. Voraussetzung der Umsetzung dieser funktionalen Betrachtung im Engineering ist eine Analyse der Anlagenfunktionalität sowie eine darauf basierende eindeutige Definition der Funktionen der Anlage. Während dies im Bereich der Fertigungstechnik durch die stärkere Homogenität der beteiligten Gewerke erleichtert wird, kann der recht inhomogene Ausbildungshintergrund der beteiligten Gewerke in der Prozessindustrie (z.B. Chemie, Verfahrenstechnik, Maschinenbau, etc.) zu teils differierenden funktionalen Definitionen führen. Diese Diversifizierung im Engineering verfahrenstechnischer Anlagen (vgl. Kapitel 2) erfordert umso mehr eine gewerkeübergreifend abgestimmte Definition der Funktionen, da die gewerkspezifischen Auffassungen bezüglich der Granularität und Ausprägung der Funktionen stark voneinander abweichen können.

Im Bereich der Prozessindustrie bietet es sich an, die gewerkeübergreifende Definition der Funktionen anhand des verfahrenstechnischen Prozesses bzw. der Dokumente und Modelle vorzunehmen, welche diesen repräsentieren [SZF+14*]. Grund hierfür ist, dass die Verfahrenstechnik als führendes Gewerk den verfahrenstechnischen Prozess zu einem sehr frühen Stadium des Engineerings entwickelt und die daraus resultierenden Gestaltungsspielräume bezogen auf die Gesamtanlage weiter gefasst sind [FAY09] als dies bei nachgelagerten Fachdisziplinen der Fall ist (vgl. Kapitel 2.2). Somit wird die Definition zwar anhand der Ergebnisse der Verfahrenstechnik ausgerichtet, ermöglicht es jedoch, eine zwingend notwendige Abstimmung zwischen den einzelnen, nachfolgenden Gewerken zu initiieren, um auch deren Sichtweisen integrieren zu können. Daher stellt die funktionsorientierte Dekomposition der Anlage eine supradisziplinäre Definition der wiederverwendbaren Einheiten dar, die unberührt davon, ob einzelne Fachdisziplinen eine davon abweichende feingranulare Dekomposition vornehmen, als Basis der inter- wie auch intradisziplinären Tätigkeiten des Wiederverwendungskonzeptes dient (vgl. Anforderung M-9). Folglich kann eine anhand der Verfahrenstechnik definierte Funktion mit Variabilität hinsichtlich der automatisierungstechnischen Funktionen oder Lösungen versehen werden. Als strukturgebend innerhalb eines systematischen Abstimmungsprozesses wird für die funktionale Dekomposition die verbreitete Richtlinie [DIN EN 61512-1] angesehen (vgl. Kapitel 2.3). Während Abbildung 2-3 eine 1:1-Zuordnung zwischen Produkt- und Funktionsaspekt aufweist, wird bereits in

[KOL98] festgestellt, dass sich Funktions- und Gestaltstrukturen [KOL98, S. 71FF.] nicht zwingend entsprechen müssen. In Konsequenz kann die Funktionsorientierung als strukturgebend angesehen werden. Auf untergeordneten Hierarchieebenen ist ein abweichender Strukturierungsansatz möglich.

Darüber hinaus bietet die funktionale Definition das Potential, die wiederverwendbaren Einheiten in übergeordneten abstrakten Funktionen zu bündeln und somit die Anzahl der vorzuhaltenden Einheiten zu reduzieren [SFJ14*]. Ein Beispiel dafür stellt die Bündelung von Tanks unterschiedlicher Bauformen zu einer Funktion „Medium speichern“ mit verschiedenen variablen Ausprägungen (z.B. hinsichtlich Funktion, Ausstattung oder Bauform) dar. Dies führt zu der funktionalen Definition von Produktlinien wiederverwendbarer Einheiten. Weitere Informationen können Kapitel 7.3 entnommen werden.

5.3. Explizite Modellierung von Variabilität

Die explizite Modellierung von Variabilität ist insbesondere in softwarenahen Domänen verbreitet [GMM+13*] und bringt eine Vielzahl von Vorteilen mit sich. So ermöglicht eine explizite Modellierung von Variabilität, wie sie in Kapitel 3.3.3 generell beschriebenen ist, die wiederverwendbaren Einheiten oder Produktlinien gemäß der Kundenanforderungen systematisch zu konfigurieren und somit anzupassen. Während einige Wiederverwendungsansätze für das Engineering automatisierter Anlagen lediglich definierte Varianten berücksichtigen (Kapitel 4.1.1, 4.1.3 oder 4.1.4), existieren auch Ansätze, die insbesondere Variabilität innerhalb wiederverwendbarer Artefakte vorsehen (Kapitel 4.1.2, 4.1.7 oder 4.1.9). Jedoch werden entweder ungeeignete Modelle (z.B. Entscheidungsbäume in [UZU13], Kapitel 4.1.2) verwendet oder aber es wird eine geeignete Modellierung nicht explizit thematisiert (z.B. in [MAG12], Kapitel 4.1.7). Das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Wiederverwendungskonzept sieht die explizite Modellierung der Variabilität wiederverwendbarer Einheiten vor und adressiert damit Anforderung E-3. Das Konzept umfasst außerdem eine Identifikation der Variabilitätssubjekte und -objekte und unterstützt somit einen Fachspezialisten bei der Modellierung der Variationspunkte. Folglich sollen keine statischen wiederverwendbaren Einheiten, sondern für jede wiederverwendbare Einheit eine Produktlinie definiert werden. Wie bereits Tabelle 3-1 zeigt, wird so eine funktionsorientierte Betrachtung sowie eine Handhabung komplexer Strukturen möglich.

Jedoch ist nicht jeder Modellierungsansatz auch gleichermaßen geeignet, die Variabilität im Engineering automatisierter Anlagen abzubilden. Bei den entscheidungsbasierten Ansätzen wird jeder Variationspunkt für sich betrachtet. Abhängig von der Variabilität des Produktes und der damit einhergehenden Anzahl der zu treffenden Entscheidungen sowie zu berücksichtigenden Relationen stößt dieser Ansatz schnell an seine Grenzen hinsichtlich Nachvollziehbarkeit der getroffenen und der zu treffenden Design-Entscheidungen [MAJA10A]. In Anhang C findet sich dazu eine exemplarische Gegenüberstellung eines entscheidungsbasierten Modells nach [WSS10] (vgl. Kapitel 4.1.2) sowie einer entsprechenden Darstellung in Form eines Merkmalmodells, die basierend auf [WSS10] erstellt wurde. Bereits der quantitative Vergleich der zu modellierenden Elemente zur Repräsentation derselben Variabilität offenbart den Nachteil der entscheidungsbasierten Ansätze gegenüber der merkmalbasierten Variabilitätsmodellierung. Darüber hinaus kann die implizite temporale Abfolge der Entscheidungen zu einem verzerrten Bild der Kundenwünsche führen, da zuvor getroffene Entscheidungen bereits nachgelagerte Entscheidungsspielräume einschränken. Eine ausführliche Gegenüberstellung des merkmalbasierten und des entscheidungsbasierten Modellierungsansatzes kann [CGR+12] entnommen werden. Aufgrund der suboptimalen Eigenschaften von

entscheidungsbasierten Modellierungsansätzen bei der Modellierung großer und komplexer Systeme wird für die Modellierung der Variabilität des Problemraums in dieser Arbeit ein merkmalbasierter Ansatz vorgesehen.

Für die Modellierung der Variabilität innerhalb der Lösungsbestandteile existieren verschiedene Ansätze (vgl. Kapitel 3.3.3). Es kommt dem Vorgehen innerhalb des Engineerings grundsätzlich am nächsten, hierfür einen kompositionellen Modellierungsansatz (vgl. Kapitel 3.3) zu wählen, da so das stückweise Entstehen der Anlage bei der Modellierung nachgebildet werden kann. Jedoch stellt die kompositionelle Modellierung erhebliche Anforderungen an die Werkzeugumgebung im Engineering und erschwert folglich eine prototypische Umsetzung der Konzepte in gängigen Engineering-Werkzeugen.[14] Aufgrund dessen wird nachfolgend ein annotativer Ansatz gewählt, der es erlaubt, die Variabilität in sogenannten Familienmodellen [BEU03, S. 102FF.] explizit abzubilden, welche der wiederverwendbaren Einheit zugeordnet werden. Dieser Ansatz erfordert zwar eine präskriptive Definition der Variabilität einer möglichen wiederverwendbaren Einheit, ermöglicht aber, die Variabilität innerhalb dieser Einheit zu beschreiben, ohne als Voraussetzung tiefgreifende Änderungen an den Engineering-Werkzeugen oder deren Datenmodellen vornehmen zu müssen. Diese Umsetzbarkeit stellt eine wichtige Grundlage dar, um die Akzeptanz seitens potentieller Engineering-Organisationen sicherzustellen und die Anwendbarkeit des Wiederverwendungskonzeptes im industriellen Umfeld nachweisen zu können. Die Wahl dieses Ansatzes verhindert jedoch nicht, dass das Wiederverwendungskonzept auch mit alternativen Modellierungsansätzen angewendet werden kann.

Unabhängig von der Art des Modellierungsansatzes ist es jedoch essentiell, dass intra- wie auch interdisziplinäre Relationen (vgl. Anforderung E-2) ebenso berücksichtigt werden, wie auch variabilitätsbezogene Relationen, welche die kombinatorische Menge möglicher Konfigurationen und folglich die Anzahl möglicher Varianten reduzieren [MAJA11; SFJ14*; SZF+14*; SFJ15*]. In Abbildung 5-1 ist eine solche schrittweise Konfiguration abstrakt repräsentiert, bei der die Variationspunkte in Problem- und Lösungsraum sequenziell gebunden werden. Sowohl Merkmal- aus auch Familienmodelle ermöglichen diese stufenweise Konfiguration. Zu beachten ist, dass gerade im Zug der Konfiguration anhand technischer Gesichtspunkte Elemente der Lösung selektiert werden können und ggf. auch müssen, die nicht durch Elemente im Problemraum vorselektiert wurden. Dies kann beispielsweise beim Material von Rohrleitungen der Fall sein, das abhängig von der mechanischen Belastung ausgewählt werden muss.

[14] Es ist möglicherweise der relativen Neuheit dieser Ansätze [SBB+10] geschuldet (diese sind beispielsweise in [MAJA10A] noch nicht berücksichtigt), dass die Unterstützung dieser seitens der Engineering-Werkzeuge bisher nicht gegeben ist.

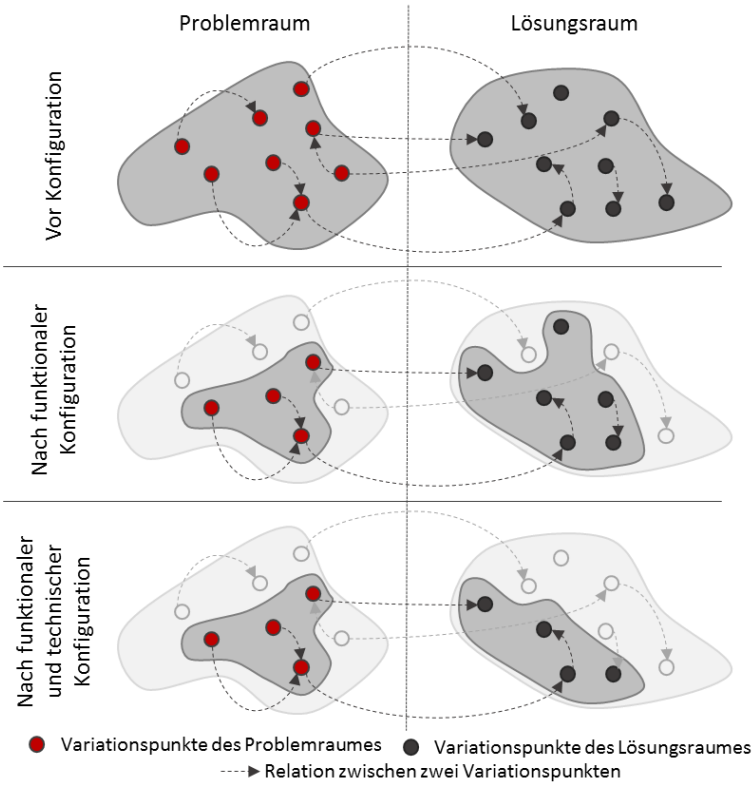

Abbildung 5-1: Konfiguration und deren Auswirkungen auf Variationspunkte des Problem- und Lösungsraumes[15]

Eine geeignete Definition der Granularität der variablen wiederverwendbaren Einheiten sowie deren variabler Anteile wird in Kapitel 6.1 ausführlich beschrieben. Da sich der Kontext der wiederverwendbaren Einheiten sowie die diesen Einheiten inhärente Variabilität gegenseitig beeinflussen [VSK+07, S. 108], wird darüber hinaus die Möglichkeit vorgesehen, zu berücksichtigende Variabilität im Kontext durch Schnittstellen zu modellieren. Dieser Ansatz ermöglicht es einem Fachspezialisten im Rahmen der projektabhängigen Tätigkeiten, verschiedene variable wiederverwendbare Einheiten auf Konsistenz zu prüfen.

[15] Die Relationen sind monodirektional, vom Problem- in den Lösungsraum reichend, veranschaulicht, weil dies dem kausalen Vorgehen im Engineering entspricht. Dies stellt jedoch lediglich eine Konvention dar.

5.4. Schrittweise Integration in bestehende Prozesse

Wie schon zuvor beschrieben, ist die Projektorientierung eines der prägendsten Charakteristika des Engineerings automatisierter Anlagen und beeinflusst folglich auch die Engineering-Organisation sowie deren Handeln. Da jedes Projekt für sich erfolgreich sein muss, wird eine Engineering-Organisation ein neues Wiederverwendungskonzept in der Regel nicht ad hoc einführen können. Ein solches Vorgehen würde ein nicht zu kalkulierendes Risiko bergen und den direkten Projekterfolg gefährden. Um Anforderung O-1 zu erfüllen, sieht das Wiederverwendungskonzept eine schrittweise Integration in die Prozesse der Engineering-Organisation vor. Es ist keine notwendige Voraussetzung für die Umsetzung des Konzeptes, von Beginn an wiederverwendbare Einheiten für das gesamte funktionale Spektrum der Anlage zu entwickeln und vorzuhalten. Die Anzahl der wiederverwendbaren Einheiten kann schrittweise gesteigert werden. Zu Beginn kann das Konzept somit an einzelnen Funktionen erprobt und bei Erfolg weiter ausgedehnt werden. Hierbei sollten vorzugsweise häufig verwendete Funktionen herangezogen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dies die Vorteile der Wiederverwendung zunächst abschwächt, da die neu entwickelten Anteile dann die Projektdurchlaufzeit verlängern können. Mit einem zunehmenden Anteil an Funktionen, welche mittels wiederverwendbarer Einheiten realisiert werden können, nehmen auch die positiven Auswirkungen der Wiederverwendung zu. Diese Kausalität wird auch in [BrSc12, S. 585] (vgl. Kapitel 4.1.3) festgestellt. Unberührt von der Anzahl wiederverwendbarer Einheiten bzw. der möglichen Abdeckung der Funktionalität der Anlage mittels wiederverwendbarer Artefakte, entspricht dies mindestens Zielzustand C nach [VDI/VDE 3695-3] (vgl. Tabelle 3-2), wobei die adäquate Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes auch das Erreichen höherer Zielzustände ermöglicht bzw. begünstigt [SFJ14*].

5.5. Zwischenfazit

Das vorliegende Kapitel beschreibt die zentralen Grundgedanken des in dieser Arbeit beschriebenen Wiederverwendungskonzeptes. Die Grundgedanken umfassen zum einen organisatorische Aspekte, wie die Differenzierung der Tätigkeiten in projektabhängige und -unabhängige Anteile oder die schrittweise Integration in die Prozesse einer Engineering-Organisation. Zum anderen umfassen die Grundgedanken inhaltliche Aspekte, wie die Funktionsorientierung, welche das systematische Wiederverwendungskonzept und insbesondere die diesbezügliche gewerkeübergreifende Zusammenarbeit prägen. Da somit die wiederverwendbaren Einheiten komplexer werden und die Anpassbarkeit mittels Variabilität sichergestellt werden soll, sieht das Konzept eine explizite Modellierung dieser Einheiten vor, um die Vorteile der Variabilität bestmöglich auszuschöpfen und die gestiegene Komplexität zu beherrschen.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die wiederverwendbaren Einheiten sowie das Wiederverwendungskonzept in detaillierter Form und beinhalten somit die konzeptionelle Umsetzung der zuvor erläuterten Grundgedanken.

6. Definition wiederverwendbarer Einheiten

Das vorliegende Kapitel dient der Definition der wiederverwendbaren Einheiten, die im Rahmen des Wiederverwendungskonzeptes entwickelt und verwendet werden. Es umfasst eine Charakterisierung der wiederverwendbaren Einheiten hinsichtlich Struktur, Inhalt und Beschreibung, nicht aber deren Entwicklung. Die Entwicklung der Einheiten ist Inhalt von Kapitel 7. Im Gegensatz zu [LIGR11] oder [UBJ+12] handelt es sich bei den wiederverwendbaren Einheiten um Sammlungen von Objekten, welche die Planung einer automatisierten Anlage optimieren, und nicht um autonom funktionsfähige Module, wie diese im modularen Anlagenbau verwendet werden.[16]

6.1. Granularität der wiederverwendbaren Einheiten

Wie die vielfältigen Wiederverwendungsansätze zeigen, stellt die geeignete Granularität der wiederverwendbaren Artefakte oder Einheiten ein entscheidendes Kriterium für den Erfolg oder Misserfolg eines systematischen Wiederverwendungsansatzes dar. So ermöglichen feingranulare Einheiten lediglich eine Reduktion des Aufwands einer spezifischen Aufgabe (z.B. der Erstellung der Automatisierungssoftware), während zu große wiederverwendbare Einheiten entweder erhebliche Anpassungsaufwände nach sich ziehen oder nur in wenigen kundenindividuellen Projekten angewendet werden können. [MJG11B] beschreibt dies als ein Spannungsfeld zwischen der Flexibilität und der hohen Wiederverwendbarkeit kleiner Einheiten auf der einen und der Effizienz und Robustheit großer Einheiten auf der anderen Seite [MJG11B, S. 9146].

Aufgrund der Tatsache, dass eine automatisierte Anlage in der Regel kundenindividuell geplant wird (vgl. Kapitel 2), ist davon auszugehen, dass zwei Anlagen gleichen Typs, also dasselbe Verfahren ausführend, dennoch nicht identisch sein werden. Die Gründe hierfür sind meistens detaillierte Kundenanforderungen bezüglich zu verwendender Geräte oder des zu realisierenden Anlagenlayouts. Eine gesamte Anlage als wiederverwendbare Einheit zu definieren scheint daher suboptimal.[17] Verwendet man jedoch eine standardisierte Strukturierung nach [DIN EN ISO 10628] – oder eine für die chargenorientierte Fahrweise nach [DIN EN 61512-1] spezialisierte Strukturierung – so ermöglicht dies die Definition wiederverwendbarer Einheiten auf einer darunter liegenden Ebene (vgl. Kapitel 2.3). Unabhängig von der Wahl der Strukturierung wird Anforderung E-1 erfüllt. Da die Funktionsorientierung im Vordergrund des Wiederverwendungskonzeptes stehen soll, werden die wiederverwendbaren Einheiten nicht anhand des „Produktaspektes“, sondern anhand des „Funktionsaspektes“ (vgl. Abbildung 2-3) definiert. In der Prozessindustrie kann dies basierend auf dem Grundfließschema nach [DIN EN ISO 10628] vorgenommen werden. Wie [UZU13] zeigt, ist dieses Vorgehen auch aus Sicht der verfahrenstechnischen bzw. der apparatetechnischen Planung vorteilhaft [UZU13, S. 55]. Jedoch existieren für die prozesstechnische Industrie keine standardisierten Kataloge, welche das gesamte Spektrum möglicher Verfahrensabschnitte oder Grundoperationen abdecken. Es obliegt also der

[16] Es wäre zwar grundsätzlich möglich, das vorgestellte Wiederverwendungskonzept auch für die Planung modularer Anlagen anzuwenden, dies liegt jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und wird daher nicht weiter beleuchtet. Die modulare Planung automatisierter Anlagen kann aber als evolutionärer Zwischenschritt hin zur Planung modularer Anlagen angesehen werden.

[17] In Einzelfällen, beispielsweise bei einfachen, kleinen oder wenig variierenden Anlagen (z.B. Pumpeinheiten), kann es sinnvoll sein, ganze Anlagen als wiederverwendbare Einheiten zu definieren. Die Anwendbarkeit des systematischen Wiederverwendungskonzeptes bleibt davon unberührt. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird dieser Sonderfall nachfolgend jedoch nicht bei jeder Thematisierung der Dekomposition erneut angebracht.

Engineering-Organisation, eigene Sammlungen benötigter Verfahrensabschnitte oder Grundoperationen zu erstellen (vgl. Kapitel 7.3).[18] Tabelle 6-1 stellt den Zusammenhang zwischen Definition und interner Strukturierung der wiederverwendbaren Einheiten sowie den Anlagencharakteristika her und kann somit als Entscheidungsgrundlage bezüglich der Dekomposition der Anlage dienen.[19] Hinsichtlich der Strukturierung der wiederverwendbaren Einheiten wird zwischen Problem- und Lösungsraum differenziert, um Anforderung M-9 zu adressieren. Dies ermöglicht insbesondere auch eine abweichende Dekomposition von Funktions- und Lösungsstruktur.

Tabelle 6-1: Definition und Strukturierung der wiederverwendbaren Einheiten

Definition anhand von	Strukturierung des Problemraumes	Strukturierung des Lösungsraumes	Anwendungsfeld und Anlagencharakteristika
Verfahren	- Verfahrensabschnitt - Grundoperation - PCE-Aufgabe	- Anlageteil - Technische Einrichtung*	Einfache Anlage mit eher überschaubaren Verfahren (z.B. Pumpstationen).
Verfahrens-abschnitt	- Grundoperation - PCE-Aufgabe	- Technische Einrichtung*	Prozesstechnische Anlagen mit mittleren bis komplexen Verfahren; Strukturierung der Anlage entsprechend der Verfahrensabschnitte ist vorteilhaft für die Dekomposition (z.B. Meerwasserentsalzungsanlagen).
Grund-operation	- Ggf. untergeordnete Grundoperationen - PCE-Aufgabe	- Technische Einrichtung*	Verfahrenstechnische Anlagen mit eher komplexen Verfahren, deren Verfahrensabschnitte weiter dekomponiert werden müssen und ggf. eine hohe Varianz aufweisen (z.B. Medikamentenherstellung).
Baustruktur	- Verfahrensabschnitt - Grundoperation - PCE-Aufgabe	- Anlageteil - Technische Einrichtung*	In Sonderfällen, bei stark verteilten Anlagen mit strengen Restriktionen hinsichtlich Bauraum oder Verteilung (z.B. Pumpspeicherkraftwerk). In der Regel ist die Funktionsstruktur entsprechend der Baustruktur zu orientieren.

* *Technische Einrichtungen umfassen, basierend auf [DIN EN ISO 10628], Apparate und Maschinen, Armaturen, Mess-, Steuer- und Regelgeräte, aber auch Software-Bausteine.*

Die linke Seite der Abbildung 6-1 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt eines Grundfließschemas, das ein simplifiziertes Verfahren beschreibt, welches aus drei Grundoperationen besteht. Dabei sind Grundoperation A und B entlang des Hauptflusses angeordnet, welcher in Anlehnung an [DIN EN ISO 10628] gekennzeichnet ist. Eine Dekomposition entsprechend des Hauptflusses unter der Maßgabe, dass jede wiederverwendbare Einheit einen Verfahrensabschnitt repräsentieren soll, führt folglich zu „Wiederverwendbare Einheit 1“, welche aus den Grundoperationen A und C besteht, und „Wiederverwendbare Einheit 2“, welche die Grundoperation B umfasst. Diese Dekomposition entspricht dem Funktionsaspekt, wie er in der Mitte von Abbildung 6-1 dargestellt ist, und repräsentiert den Problemraum. Diese funktionale Definition stellt die Grundlage zur Erfüllung von Anforderung M-9 dar.

Die Definition der wiederverwendbaren Einheiten wird im weiteren Verlauf der Arbeit anhand der Verfahrensabschnitte sowie deren Dekomposition anhand der Grundoperationen nach [DIN EN ISO 10628] vorgenommen. Auch alle Elemente, welche die wiederverwendbare Einheit umfasst, müssen adäquat dekomponiert und strukturiert werden (vgl. Tabelle 6-1). Diese

[18] Es gab in der Deutschen Demokratischen Republik im Rahmen der Normen zu [TGL 25000] oder auch in [HAR84] das Bestreben, die verfahrenstechnischen Grundoperationen zu standardisieren (z.B. Trennen, Vereinigen, Zerteilen, Agglomerieren, Ändern der Enthalpie [TGL 25000]), doch diese sind nicht als vollumfänglich anzusehen. Selbiges gilt auch für auf die Konstruktion ausgerichtete Ansätze, wie sie beispielsweise [KOKA98] für Grundoperationen zum Umsetzen von Stoffen repräsentiert [KOKA98, S. 16FF.].

[19] Unabhängig davon gelten die Schilderungen und Argumentationen ebenso, wenn die Anlage anhand [DIN EN 61512-1], also in Prozessabschnitte, Prozessoperationen sowie Prozessschritte, dekomponiert wird.

Dekomposition ist eine unerlässliche Voraussetzung für die Interdisziplinarität des Wiederverwendungskonzeptes, insbesondere aber auch für die explizite Definition variabler Anteile. Am Beispiel der Apparatetechnik sowie kleiner Ausschnitte der Prozessleittechnik zeigt die rechte Seite von Abbildung 6-1 eine Dekomposition des R&I-Fließschemas, welches aus Sicht der Verfahrenstechnik den Lösungsraum repräsentiert. Grundoperation A wird hier durch den Behälter, Grundoperation B durch die Filtereinheit mit Druckerhöhung und Grundoperation C durch die Dosiereinrichtung realisiert. Die punktierten Umrahmungen repräsentieren Anteile der Einheit, die als Strukturierung der wiederverwendbaren Einheit auf feingranularer Ebene definiert werden können.

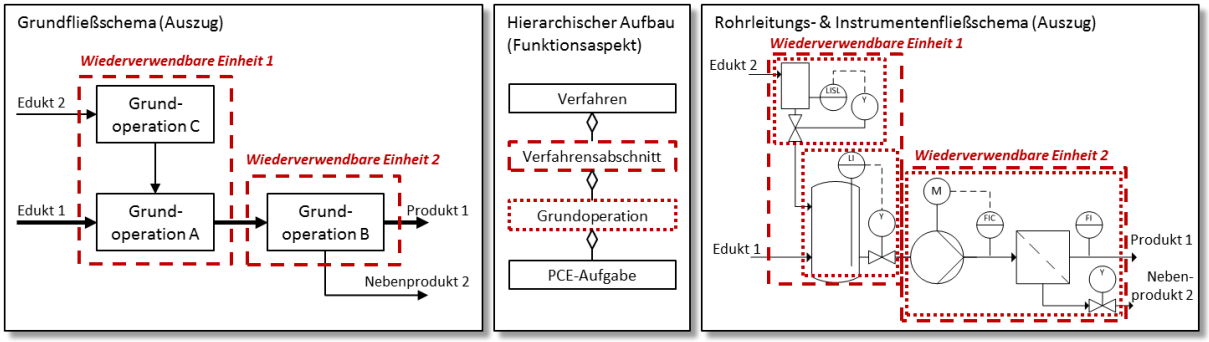

Abbildung 6-1: Definition der wiederverwendbaren Einheiten basierend auf dem Grundfließschema

Aufgrund des wenig funktionalen Charakters des R&I-Fließschemas sind die Grenzen zwischen Funktions- und Produktaspekt nicht eindeutig zu definieren. Ein Modellierungsansatz, der diese differenzierte Betrachtung ermöglicht, ist die „Formalisierte Prozessbeschreibung“ nach [VDI/VDE 3682-1; VDI/VDE 3682-2]. Dieses Beschreibungsmittel sieht die grafische Modellierung von Prozessen als Netz von *Produkten*, *Informationen*, *Energien*, *Prozessoperatoren* sowie *Technischen Ressourcen* vor und ermöglicht eine Dekomposition komplexer Prozesse. Die Objektmodelle mit Attributen (differenziert in Kennzeichnung und Merkmale) und Relationen aller Elemente können [VDI/VDE 3682-2] entnommen werden.[20] Die exemplarische Modellierung der in Abbildung 6-1 dargestellten Fließschemata kann Abbildung 6-2 entnommen werden. Hierbei wird zwischen den *Prozessoperatoren* (entspricht Funktionsaspekt) und den assoziierten *Technischen Ressourcen* (entspricht Produktaspekt) differenziert (vgl. Kapitel 2.3). Diese Differenzierung ermöglicht eine funktionsorientierte Definition der wiederverwendbaren Einheiten, indem die mit den *Prozessoperatoren* assoziierten Objekte analysiert werden.[21] Die Zuordnung der verschiedenen Objekte zu den jeweiligen wiederverwendbaren Einheiten kann mittels *Systemgrenzen* vorgenommen werden. Um die Analogie zum zu Grunde liegenden exemplarischen Grundfließschema zu gewährleisten, wird auf die Modellierung von Energien, Informationen sowie die Dekomposition der Prozessoperatoren verzichtet (bspw. der Dekomposition von O_B in Druckerhöhung und Filterung).

[20] Auch [CHR15] führt die Vorteile der Verknüpfung einer Modellierung des Prozesses inklusive der Assoziationen zu den verwendeten *Technischen Ressourcen* an [CHR15, S. 120]. Eine weitreichende, grundlegende Auseinandersetzung mit der Formalisierten Prozessbeschreibung kann darüber hinaus [ULR09] entnommen werden.

[21] In Sonderfällen, wie unter anderem in Tabelle 6-1 ersichtlich, in denen beispielsweise aufgrund eines restriktiven Bauraumes die Definition der wiederverwendbaren Einheiten anhand der *Technischen Ressourcen* vorgenommen werden muss, kann dies bei einer Modellierung nach der Formalisierten Prozessbeschreibung geschehen, indem von der *Technischen Ressource* ausgehend, die damit verbundenen *Prozessoperatoren* identifiziert und der wiederverwendbaren Einheit zugeordnet werden.

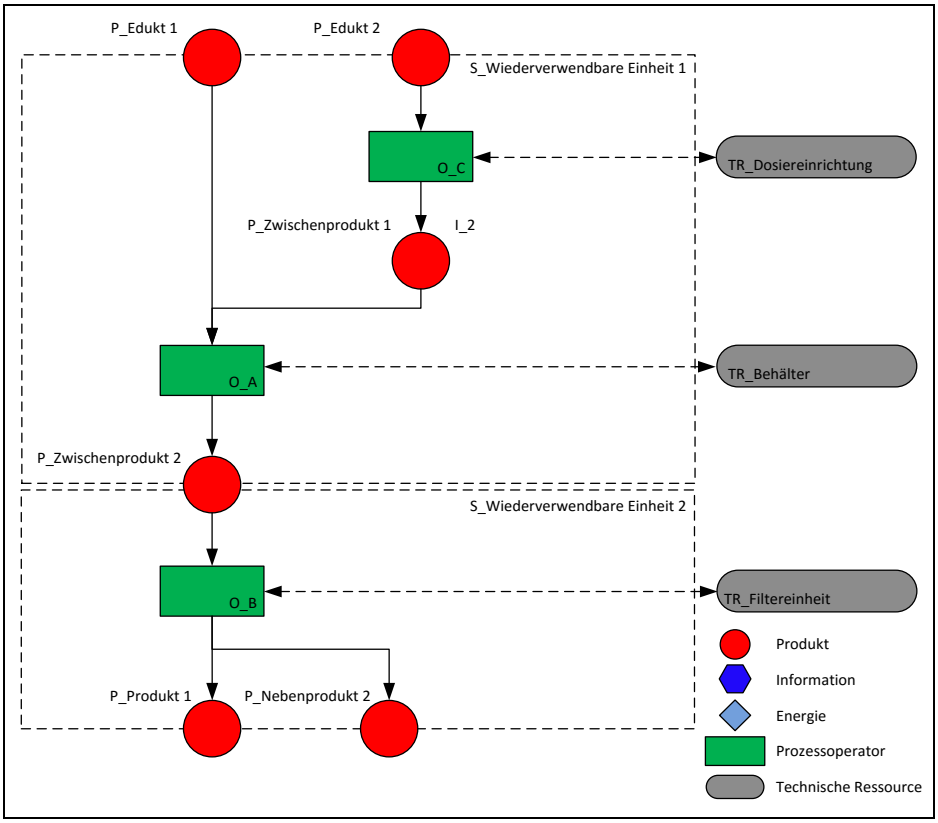

Abbildung 6-2: Exemplarische Modellierung mittels der Formalisierten Prozessbeschreibung

Unabhängig von der Modellierung ermöglicht es die beschriebene Dekomposition, bestehende, erprobte und akzeptierte, feingranulare und gegebenenfalls gewerkspezifische Wiederverwendungsansätze zu integrieren. So können beispielsweise die PCE-Aufgaben mittels standardisierter Softwarebausteine realisiert werden. Die Nutzung bewährter Lösungen erhöht die Akzeptanz des Konzeptes und ermöglicht es, den Aufwand für die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit zu reduzieren. Weitreichende Schilderungen zur konzeptionellen Umsetzung sowie zur Integration in bestehende Prozesse finden sich in den Kapiteln 7 und 8.

6.2. Definition der Funktionalität wiederverwendbarer Einheiten

Basierend auf den Schilderungen des vorigen Abschnitts 6.1 kann die Dekomposition eines Verfahrens bzw. einer Anlage vorgenommen werden, um eine Definition der wiederverwendbaren Einheiten unter funktionalen Gesichtspunkten zu erreichen. Jedoch ermöglicht die Definition der Einheiten basierend auf den Verfahrensabschnitten (vgl. Abbildung 6-1) nicht selbstverständlicher Weise auch die Integration weiterer Gewerke. Nachfolgend werden sämtliche spezifischen Funktionen der wiederverwendbaren Einheit von abstrakten, gewerkeübergreifenden Funktionen abgeleitet. Wie bereits geschildert, ermöglicht dies nicht nur eine gewerkeübergreifende Strukturierung der Einheiten, sondern auch eine Abstraktion der Funktionen und folglich eine Bündelung funktional ähnlicher wiederverwendbarer Einheiten.

Nachfolgend wird der oft zitierte Funktionszusammenhang nach [PBF+05] oder auch [AKI94] verwendet, um die Funktionen adäquat zu strukturieren. Wendet man diese Funktionsdefinition auf automatisierte Anlagen an, so ist die übergeordnete Gesamtfunktion einer Anlage, einen verfahrenstechnischen Prozess sicher auszuführen. In Konsequenz ist ein Verfahrensabschnitt einer Hauptfunktion der Anlage gleichzusetzen. Diesen Hauptfunktionen sind alle Teilfunktionen unterzuordnen, die wiederum Grundoperationen und PCE-Aufgaben repräsentieren. Abbildung 6-3 zeigt am Beispiel der in Abbildung 6-1 gekennzeichneten „Wiederverwendbaren Einheit 1“ die abweichenden Funktionen innerhalb dieser Einheit, die einen Verfahrensabschnitt repräsentiert. Die dargestellte Funktion „Medium bereitstellen“ beinhaltet die abstrakten Funktionen „Medium speichern“ und „Zusatzmedium dosieren“. Sämtliche Funktionen können in verschiedenen Ausprägungen detailliert werden, wie es exemplarisch für die Funktion „Meerwasser bereitstellen“ aufgezeigt wird. Um die Desinfektion des Meerwassers (vgl. Kapitel 10.1.1) sicherzustellen, wird als Zusatzstoff Hypochlorit vorgesehen. Hierbei sind mehrere alternative Ausprägungen möglich, die jedoch alle derselben abstrakten Funktionsstruktur untergeordnet werden können. Der rechte Teil von Abbildung 6-3 zeigt, dass den (Teil-)Funktionen auch feingranulare und gewerkspezifische Komponenten bzw. Lösungsbestandteile assoziiert werden können.

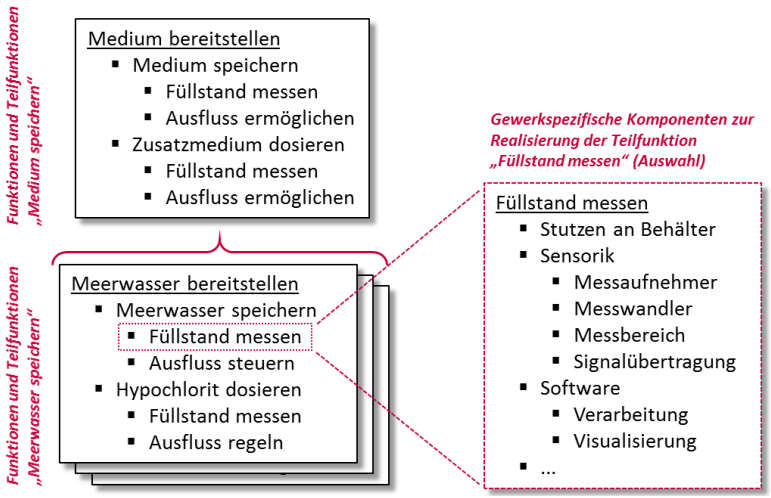

Abbildung 6-3: Funktionsstrukturen am Beispiel „Wiederverwendbare Einheit 1: Medium bereitstellen“

Wie das beschriebene Beispiel zeigt, ermöglicht die funktionale Strukturierung der wiederverwendbaren Einheiten zum einen die geeignete Abstraktion, um die Anzahl der wiederverwendbaren Einheiten zu reduzieren, und zum anderen die Möglichkeit, gewerkspezifische Anteile übergeordneten Funktionen zuzuordnen. Ein mögliches Vorgehen zur Definition der Funktionalität wird in Kapitel 7.3 beschrieben.

6.3. Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten

Wie bereits in Kapitel 3.3 thematisiert, stellt Variabilität innerhalb wiederverwendbarer Einheiten eine Möglichkeit dar, um deren Wiederverwendbarkeit zu steigern, indem die Einheiten systematisch an verschiedene Rahmenbedingungen, also einen jeweils abweichenden Kontext, angepasst werden können. Um Anforderung E-3 zu adressieren sowie die im vorigen Abschnitt aufgezeigte Vielfalt der verschiedenen funktionalen und technischen Ausprägungen der wiederverwendbaren Einheiten handhaben zu können, werden die wiederverwendbaren Einheiten durch formale Variabilitätsmodelle ergänzt (vgl. Kapitel 5.3). Diese Modelle decken sowohl den Problem- als auch den Lösungsraum ab und ermöglichen eine Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten gemäß der jeweiligen projektspezifischen Anforderungen. Diese Modelle können entsprechend der Komplexität des Systems umfangreicher oder einfacher gestaltet werden, sollten sich aber immer nach der abzubildenden Variabilität richten. Abbildung 6-4 zeigt das Zusammenspiel der verschiedenen Variabilitätsmodelle sowie die daraus abgeleiteten Konfigurationsmodelle anhand des Beispiels „Wiederverwendbare Einheit 1: Meerwasser bereitstellen“. Dabei repräsentiert die obere Hälfte der Abbildung diejenigen Tätigkeiten, welche während der Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit von Relevanz sind, und die untere Hälfte der Abbildung die Schritte der Konfiguration, welche im Rahmen des Engineering der automatisierten Anlage vollzogen werden müssen. Dies bedeutet, dass die Variabilitätsmodelle für Problem- und Lösungsraum inklusive der Relationen sowie die Engineering-Objekte in geeigneter Form für das Engineering bereitgestellt werden müssen. Mögliche technische Umsetzungen dessen werden in Kapitel 7.7 diskutiert.

Nachfolgend wird in Kapitel 6.3.1 die Modellierung der Variabilität des Problemraumes und in Kapitel 6.3.2 die Variabilität des Lösungsraumes detailliert thematisiert. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 6.3.3 die Relationen, welche innerhalb dieser Variabilitätsmodelle, aber gerade auch zwischen diesen Modellen definiert werden können (Abbildung 6-4, (a)), um die in Kapitel 6.3.4 beschriebene Konfiguration zu unterstützen (Abbildung 6-4, (c)/(d)).

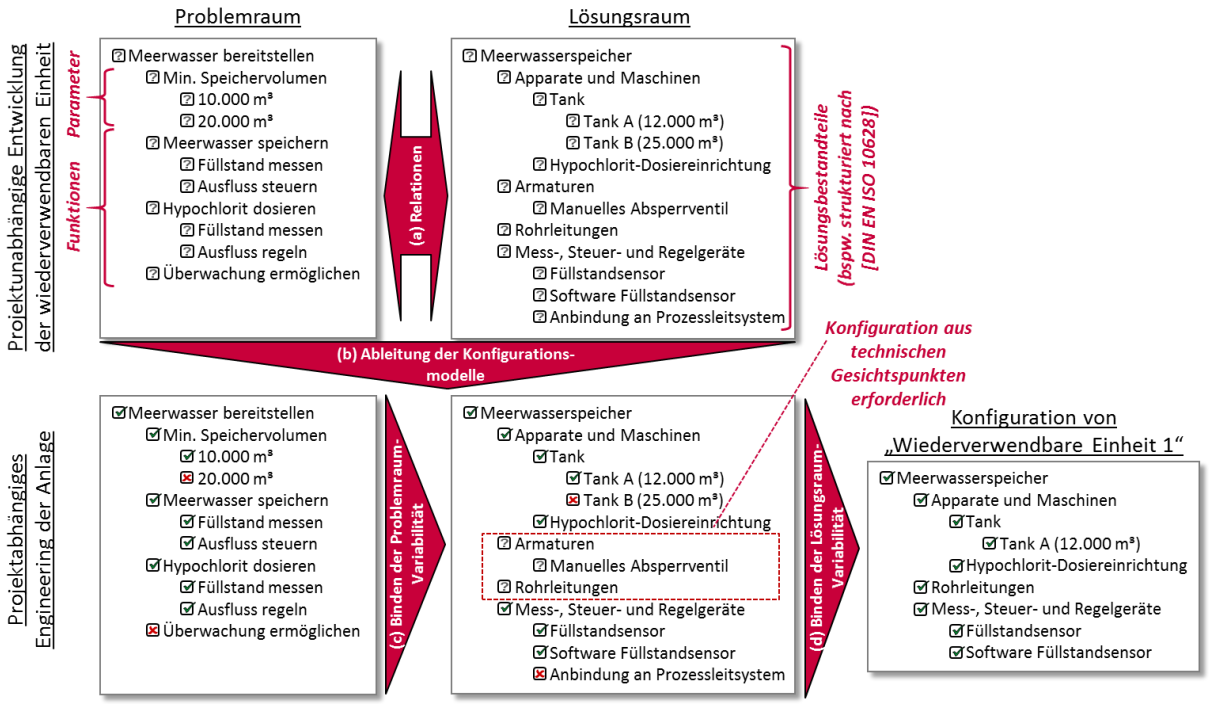

Abbildung 6-4: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten und deren Konfiguration[22]

6.3.1. Variabilität wiederverwendbarer Einheiten im Problemraum

Die im vorigen Kapitel 6.2 geschilderten Funktionsstrukturen können aufgrund des implementierungsunabhängigen Charakters dem Problemraum zugeschrieben werden und weisen aus verschiedenen Gründen Variabilität auf: Zum einen führt Variabilität in den Anforderungen dazu, dass diese Variabilität in der Regel auch in den Funktionen repräsentiert werden muss und somit die wiederverwendbare Einheit verschiedene Ausprägungen der Funktionalität bereitstellt (z.B. verschiedene Kombinationen optionaler Funktionen). Zum anderen bedarf die in Abbildung 6-3 dargestellte Vielfalt der Ausprägungen einer Kontrolle und systematischen Konfiguration (z.B. die optionalen Teilfunktionen „Ausfluss regeln“ oder „Füllstand messen“).

Die Variabilität der wiederverwendbaren Einheiten im Problemraum wird nachfolgend mittels Merkmalmodellen abgebildet (vgl. Kapitel 5.3). Merkmalmodelle gehen zurück auf [CzEI05] und können nach [ReWe07] hierarchisch aufgebaut werden. So wird es ermöglicht, nicht nur die Abbildung der zuvor beschriebenen Strukturen, sondern auch die hierarchische Kombination verschiedener wiederverwendbarer Einheiten vorzunehmen. Diese Strukturierung wird genutzt, um das Merkmalmodell entsprechend des jeweiligen Anwendungsfalles anpassen zu können. In Abbildung 6-4 ist ein Vorschlag einer Strukturierung für die Belange des Anlagenengineerings dargestellt, der zwischen Parametern (bzw. Merkmalen) und Funktionen differenziert.

Im Gegensatz zum Software-Engineering ist eine Verwendung spezifischer Funktionsmodelle, wie sie beispielsweise in [SPES_XT12] vorgeschlagen werden, im Engineering automatisierter Anlagen wenig sinnvoll, da in einem solchen Funktionsmodell abgebildete Information nicht über die in einem

[22] Zum Zwecke der besseren Lesbarkeit wird in Abbildung 6-4 keine Abstraktion der Funktionen vorgenommen, also „Meerwasser bereitstellen“, anstelle von „Medium bereitstellen“ verwendet.

Grundfließschema oder einem Modell der Formalisierten Prozessbeschreibung hinaus geht. Da die Fließschemata bereits eine vergleichsweise hohe Bekanntheit im Engineering automatisierter Anlagen aufweisen, wird auf gesonderte Funktionsmodelle verzichtet, was jedoch zur Folge hat, dass ein Teil des Merkmalmodells genutzt werden muss, um die Funktionen sowie deren Variabilität abzubilden (vgl. Abbildung 6-4). Diese Funktionen sind gemäß der Schilderungen in Kapitel 5.2 zwischen den beteiligten Gewerken abzustimmen. Neben den Parametern und Funktionen ermöglichen es die Modelle darüber hinaus, Relationen zwischen den verschiedenen Modellbestandteilen abzubilden; diese werden in Kapitel 6.3.3 thematisiert.

6.3.2. Variabilität wiederverwendbarer Einheiten im Lösungsraum

Um das Engineering einer automatisierten Anlage effizienter gestalten zu können, bedarf die wiederverwendbare Einheit, wie in der rechten Hälfte von Abbildung 6-1 ersichtlich, neben den Funktionen auch Anteile der Lösung. Auch die Variabilität innerhalb dieser Lösungsbestandteile muss explizit modelliert werden, um eine systematische Anpassung an die Kundenanforderungen bzw. den Kontext der Einheit zu ermöglichen. Die Variabilität im Lösungsraum kann zum einen aus der Variabilität im Problemraum, zum anderen aus Rahmenbedingungen hinsichtlich der Implementierung resultieren, wenn beispielsweise die identische Funktion auf alternative Art und Weise realisiert werden soll. Das Wiederverwendungskonzept sieht hierbei die Verwendung von Echtgeräten (i.S.v. herstellerspezifischen Ausführungen) nicht explizit vor, da der Gerätetyp im Vordergrund stehen sollte. Jedoch steht es der Anwendung des Konzeptes nicht entgegen, wenn eine Engineering-Organisation aus gewichtigen Gründen[23] die Verwendung von Echtgeräten in den wiederverwendbaren Einheiten fordern würde.

Wie bereits in Kapitel 5.3 erörtert, wird mit den Familienmodellen nachfolgend einer annotativer Ansatz gewählt, um die Variabilität im Lösungsraum zu modellieren. Ein beispielhaftes Modell ist Abbildung 6-4 zu entnehmen. Auch diese Familienmodelle können, ähnlich der hierarchischen Merkmalmodelle nach [ReWe07], hierarchisch strukturiert werden. Die Strukturierung der Familienmodelle kann ebenfalls entsprechend des jeweiligen Anwendungsfalles angepasst werden, beispielsweise anhand domänenspezifischer Normen (wie in Abbildung 6-4 geschehen), werkzeugtechnischer Strukturen oder auch anhand der Systemarchitektur. Dies erleichtert die Assoziation von Elementen des Familienmodells zu den Engineering-Objekten innerhalb des Engineering-Werkzeuges (vgl. Kapitel 9).

Es hat sich, insbesondere bei den Familienmodellen, als vorteilhaft erwiesen, die Modellierungstiefe mindestens so weitreichend zu wählen, wie Variabilität innerhalb der Lösung auftritt. So können Baugruppen oder Bauteile, die keine Variabilität aufweisen, als unterste Modellebene angesehen werden, da eine weitere Detaillierung auf darunterliegende Modellebenen keinen variabilitätsbezogenen Mehrwert liefert, jedoch die Modellkomplexität steigern würde. Dieser Ansatz ermöglicht es im Gegensatz zu [FLK+14b], die gewerkspezifischen Lösungsanteile zu bündeln und hinsichtlich Logik und Variabilität in Relation zueinander zu setzen (vgl. Kapitel 6.3.3). Ähnlich der abweichenden Funktions- und Produktstruktur (vgl. Abbildung 3-1) ist jedoch anzumerken, dass

[23] In Gesprächen mit Industrievertretern und Projektpartnern wurde deutlich, dass dies in der Regel nur bei hochspezialisierten Geräten oder bei Kunden, die über Vorzugslieferanten verfügen, der Fall ist.

lediglich in sehr einfachen Fällen eine identische Struktur zwischen Merkmalmodell und Familienmodell als möglich oder auch als sinnvoll zu erachten ist. So bedarf beispielsweise bereits die Realisierung der sehr begrenzten Funktion „Füllstand messen“, welche in Abbildung 6-4 vorgesehen ist, eine Vielzahl an Lösungsbestandteilen („Tank“, „Füllstandsensor“, „Software Füllstandsensor“, etc.), wohingegen beispielsweise die Funktion „Hypochlorit dosieren“ mittels eines Lösungsbestandteiles „Hypochlorit-Dosiereinrichtung“ realisiert werden kann, welcher alle weiteren invariablen Elemente subsummiert.

6.3.3. Relationen innerhalb wiederverwendbarer Einheiten

Grundlage der Berücksichtigung von Variabilität im vorgestellten Wiederverwendungskonzept ist die Ableitung der Konfigurationsmodelle aus den zuvor beschrieben Variabilitätsmodellen für Problem- und Lösungsraum (Abbildung 6-4, (b)). Um die Funktionsorientierung in den Vordergrund der Tätigkeiten zu stellen (vgl. Anforderung M-9), ist es unerlässlich, die Relationen zwischen der Variabilität des Problemraumes (also der Anforderungen und Funktionen) und der Variabilität des Lösungsraumes zu modellieren (Abbildung 6-4, (a)). So wird ermöglicht, eine wiederverwendbare Einheit basierend auf den Funktionen und Parametern im Merkmalmodell weitgehend zu spezifizieren, ohne durch technische oder irrelevante Restriktionen behindert zu werden (Abbildung 6-4, (c), vgl. Kapitel 6.3.4). Darüber hinaus können somit verschiedene gewerkspezifische Anteile der Lösung in Relation zueinander sowie zu den Merkmalen des Problemraumes gesetzt werden. Außerdem kann bisher meist implizites Wissen abgebildet werden, indem auch innerhalb der verschiedenen Variabilitätsmodelle Relationen genutzt werden, um logische oder variabilitätsbezogene Zusammenhänge zu definieren und damit explizit zu machen [VBH+09, S. 189F.]. Des Weiteren können Relationen berücksichtigt werden, die aus dem Engineering bzw. der objektorientierten Planung während des Engineerings resultieren [SZF+15*] und eine erhebliche Vielfalt aufweisen. Mittels dieser Relationen werden primär die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Lösungsbestandteilen definiert oder dokumentiert. Im Fall einer automatisierten Anlage kann dies die mechanischen Verbindungen verschiedener Rohre ebenso umfassen wie den Informationsfluss zwischen zwei automatisierungstechnischen Komponenten. Eine ausführliche Übersicht zu berücksichtigender Relationen im Engineering sowie den automatisierten Anlagen selbst kann [ZFB15] und [MAJA10B; MAG12] entnommen werden. Im Gegensatz zu [MAJA10B] berücksichtigt [ZFB15] dabei aber den Aspekt der Variabilität nicht. Aufgrund der zentralen Bedeutung für das nachfolgende Wiederverwendungskonzept werden in der vorliegenden Arbeit insbesondere die Relationen thematisiert, welche die logischen und variabilitätsbezogenen Zusammenhänge innerhalb der wiederverwendbaren Einheit definieren.

Das Beispiel aus Abbildung 6-4 aufgreifend, zeigt Abbildung 6-5 beispielhafte Zusammenhänge innerhalb des Merkmalmodells und Relationen zwischen den Variabilitätsmodellen. Diese Relationen müssen während der projektunabhängigen Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit definiert werden und sind im Rahmen dieser Arbeit an [BEU03] unter Bezugnahme zu [KCH+90@] definiert. Diese betrachteten Relationen sind unabhängig davon, welchem Gewerk die adressierten Elemente entstammen.

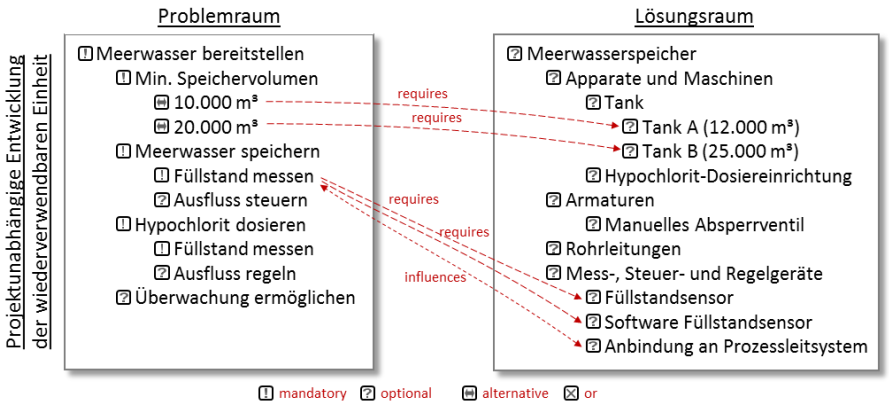

Abbildung 6-5: Beispielhafte Relationen innerhalb wiederverwendbarer Einheiten[24]

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Zusammenhänge, basierend auf [Beu03], unter Bezugnahme des Beispiels aus Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 erläutert. Hierbei müssen einerseits die variabilitätsbezogenen Zusammenhänge unmittelbar in Verbindung stehender Elemente des Problem- oder Lösungsraumes berücksichtigt werden, welche in Tabelle 6-2 angeführt werden. Andererseits gilt es, die Relationen zu definieren, welche es ermöglichen, weiterführendes Wissen hinsichtlich zulässiger Konfigurationen explizit abzubilden. Diese bereits in Kapitel 3.3.3 erwähnten Relationen können innerhalb eines Modells, aber auch zwischen verschiedenen Modellen einer wiederverwendbaren Einheit, vorgesehen werden und sind in Tabelle 6-3 erläutert.

Tabelle 6-2: Unmittelbare Zusammenhänge innerhalb wiederverwendbarer Einheiten nach [Beu03]

Zusammenhang	Erläuterung nach [BEU03]	Beispiel nach Abbildung 6-5
mandatory	Element ist verpflichtender Bestandteil der Konfiguration und kann nicht deselektiert werden.	Die Funktion „Füllstand messen“ ist verpflichtend erforderlich für die Verwendung der wiederverwendbaren Einheit „Meerwasser bereitstellen“.
optional	Element ist optionaler Bestandteil der Konfiguration und kann selektiert werden, wenn das übergeordnete Element selektiert ist.	„Ausfluss regeln“ stellt eine optionale Teilfunktion der übergeordneten Funktion „Hypochlorit dosieren“ dar.
alternative	Aus der Gruppe alternativer Elemente muss exakt ein Element selektiert werden.	Im Problemraum kann ein minimales Speichervolumen von entweder „10.000 m³“ oder „20.000 m³“ selektiert werden.
or	Aus der Gruppe der Elemente muss mindestens eines der Elemente selektiert werden, wenn das übergeordnete Element selektiert ist.	Es stehen verschiedene Arten der Visualisierung der Funktion „Hypochlorit dosieren“ zur Auswahl, es muss aber mindestens eine davon selektiert werden (nicht abgebildet).

[24] Symbolik angelehnt an *pure::variants*. Die beispielhaften Modelle wurden gemäß der Konvention erstellt, dass alle Elemente des Lösungsraumes als optional deklariert werden. Dies stellt lediglich eine mögliche Konvention dar, die sich jedoch beim Umgang mit umfangreichen Familienmodellen als geeignet erwiesen hat.

Tabelle 6-3: Relationen innerhalb wiederverwendbarer Einheiten nach [Beu03]

Relation	Erläuterung nach [BEU03]	Beispiel nach Abbildung 6-5
requires	Das Element erfordert die Selektion des verbundenen Elements für eine valide Konfiguration.	Die Funktion „Füllstand messen“ erfordert die Selektion von „Füllstandsensor“ und „Software Füllstandsensor“.
conflicts	Das Element kann nicht selektiert werden, wenn das verbundene Element selektiert ist.	Die Funktion „Füllstand regeln“ kann nicht selektiert werden, wenn die Funktion „Durchfluss regeln“ selektiert ist (nicht abgebildet). Entspricht einer flexibleren Umsetzung von „alternative“.
influences	Zwei Elemente beeinflussen sich gegenseitig, können aber koexistieren.	Die Funktion „Füllstand messen“ beeinflusst die Informationen, welche im Rahmen der Umsetzung von „Anbindung an PLS“ übertragen werden müssen. Bedarf in der Regel der individuellen Betrachtung durch Entwickler.

Die in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 beschriebenen Zusammenhänge und Relationen stellen eine Grundmenge erprobter Typen dar, welche sich in anderen Domänen bewährt haben [SRC+12]. Diese können je nach Anwendungsfall oder Werkzeugunterstützung ergänzt werden. Auf Basis dieser grundlegenden Zusammenhänge, welche innerhalb, aber auch zwischen den Variabilitätsmodellen definiert werden können, kann eine mehrstufige Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten gemäß projektabhängiger Anforderungen vorgenommen werden, die im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

6.3.4. Konfiguration wiederverwendbarer Einheiten

Das Vorgehen des Engineerings unter Verwendung wiederverwendbarer Einheiten wird ausführlich in Kapitel 8 beschrieben. An dieser Stelle wird daher lediglich auf die Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten eingegangen, die während des projektabhängigen Engineerings vorzunehmen ist (Abbildung 6-4, untere Hälfte), um die Variabilität in den Entwicklungsartefakten zu binden. Diese funktionsorientierte Konfiguration wird erst aufgrund der Relationen ermöglicht, welche im vorigen Abschnitt beschrieben wurden. Wie auch Abbildung 5-1 in abstrakter Form zeigt, schränkt bereits die funktionale Konfiguration, welcher die Variationspunkte des Problemraums zu Grunde liegen, aufgrund der Relationen die Variabilität des Lösungsraumes ein. So wird beispielsweise das Element des Familienmodells „Tank B (25.000 m³)“ bereits aufgrund der Konfiguration des Problemraumes deselektiert. Diese Einschränkung erleichtert die darauf folgende Konfiguration der technischen Lösung basierend auf dem Familienmodell, also den Variationspunkten des Lösungsraumes. In Abbildung 6-4 ist die verbleibende, technisch orientierte Variabilität im Lösungsraum anhand der im Beispiel nicht funktional konfigurierbaren Armaturen und Rohrleitungen ersichtlich, deren Variabilität im Rahmen der funktionalen Konfiguration nicht gebunden wurde (Abbildung 6-4, (c)). Diese Variabilität muss in einem nachfolgenden Schritt auf Basis des Familienmodells gebunden werden, um eine eindeutige Konfiguration der wiederverwendbaren Einheit erhalten zu können (Abbildung 6-4, (d)). Das ist insbesondere dann der Fall, wenn technische Komponenten selektiert werden müssen, die keinen direkten Einfluss auf die zu realisierende Funktion aufweisen. Dabei kann es sich um Nebenaggregate, Rohrleitungen oder die Wahl einer möglichen Software-/Hardware-Plattform handeln. Eine abstrakte Repräsentation dessen ist dem unteren Drittel

der Abbildung 5-1 zu entnehmen. Es ist anzumerken, dass im Rahmen dieses Wiederverwendungskonzeptes lediglich vollständig gebundene Konfigurationen [BSR10, S. 621FF.] berücksichtigt werden. Die Betrachtung partiell gebundener Variabilitätsmodelle während der Entwicklung oder auch der Laufzeit eines Systems stellt ein aktuelles Forschungsfeld dar [MARE13], liegt aber nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

6.4. Formales Modell und Bestandteile der wiederverwendbaren Einheiten

Ergänzend zu den vorigen Abschnitten, welche die Bestandteile der wiederverwendbaren Einheiten im Einzelnen beschreiben, subsummiert dieser Abschnitt die Beschreibung der wiederverwendbaren Einheiten in Form eines formalen Modells. Das in Abbildung 6-6 dargestellte formale Modell baut auf [SZF+15*] auf und liegt den wiederverwendbaren Einheiten im Rahmen des vorgestellten Konzeptes zugrunde. Es wird davon ausgegangen, dass das Engineering objektorientiert vorgenommen wird, also die Engineering-Dokumente lediglich Repräsentanten der Engineering-Objekte sind, die innerhalb der softwarebasierten Werkzeuge erstellt und bearbeitet werden. So können Modelle verwendet werden, die hinsichtlich der Eindeutigkeit und semantischen Aussagekraft weit über die traditionellen Dokumente hinausgehen.[25]

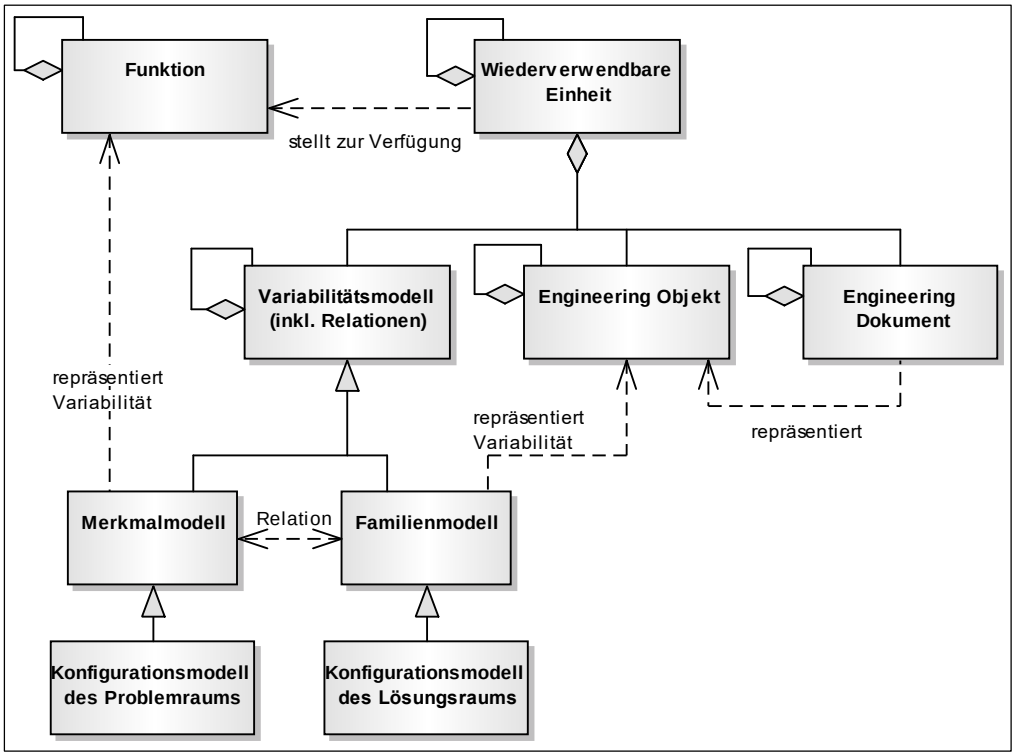

Abbildung 6-6: Formales Modell der wiederverwendbaren Einheiten

Im Sinne der Interdisziplinarität wird nicht differenziert, welchen Fachdisziplinen die Engineering-Objekte originär zugeordnet werden [HSF+13*]. Die Bündelung der verschiedenen gegebenenfalls gewerkspezifischen Anteile erfolgt, indem die Engineering-Objekte (bzw. deren Repräsentanz im Familienmodell) der entsprechenden Funktion im Merkmalmodell zugeordnet werden sowie

[25] Ein CAEX-basierter Ansatz der modellbasierten Planung kann beispielsweise [SSE08] entnommen werden.

insbesondere innerhalb der Variabilitätsmodelle mittels Relationen in Bezug zueinander gesetzt werden. Wie in den vorigen Abschnitten beschrieben werden zwei Arten von Variabilitätsmodellen verwendet. Das Merkmalmodell repräsentiert dabei die Variabilität innerhalb der Funktion, welche von der wiederverwendbaren Einheit bereitgestellt wird. Das Familienmodell hingegen repräsentiert die Variabilität innerhalb der Engineering-Objekte und zwischen diesen. Neben den Zusammenhängen und Relationen innerhalb der jeweiligen Modelle sind diese, als Grundlage einer mehrstufigen Konfiguration, mittels Relationen in Bezug zueinander gesetzt (vgl. Kapitel 6.3.3). Relationen innerhalb der Engineering-Objekte sind ebenfalls möglich, stehen aber aufgrund der starken Abhängigkeit der verwendeten Werkzeuge nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, können aber beispielsweise mittels Relationen im Familienmodell repräsentiert werden.

Zusammenfassend ermöglicht es die vorgestellte Struktur der wiederverwendbaren Einheiten, Lösungsbestandteile beschiedener Fachdisziplinen gemeinsam zur Wiederverwendung bereit zu stellen. Die Variabilitätsmodelle sorgen dafür, dass eine explizite Modellierung der Problemraum- sowie der Lösungsraumvariabilität vorgenommen werden kann. Im Sinne der Funktionsorientierung geschieht sowohl die Selektion als auch die erste Stufe der Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten anhand der Merkmalmodelle und der darin repräsentierten Funktionen. Basierend darauf kann in einer zweiten Stufe die Konfiguration anhand lösungsorientierter Gesichtspunkte vorgenommen werden. Dieses Vorgehen entspricht einer schrittweisen Begrenzung des Lösungsraumes, wie sie auch in [HAB12, S. 244F.] beschrieben wird.

7. Projektunabhängiger Anteil des Wiederverwendungskonzeptes

Entsprechend der zuvor beschriebenen Trennung zwischen projektunabhängigen und projektabhängigen Tätigkeiten beschreibt das vorliegende Kapitel die projektunabhängigen Tätigkeiten, im Rahmen derer die wiederverwendbaren Einheiten den Entwicklungsgegenstand darstellen. Die Konzeptbausteine, welche die Verwendung der wiederverwendbaren Einheiten im Engineering der Anlage ermöglichen, werden im nachfolgenden Kapitel 8 thematisiert. Abbildung 7-1 zeigt die Schritte, welche das systematische Vorgehen umfasst, um wiederverwendbare Einheiten funktionsorientiert und unter Berücksichtigung von Variabilität zu entwickeln. Hierbei wird entsprechend des Vorgehensmodells nach [VDI 2221] der Weg von den Anforderungen über die Funktionen hin zu möglichen Lösungen beschrieben. Dabei ist herauszustellen, dass Iterationen und Rücksprünge an jeder Stelle des Konzeptes vorgenommen werden können, wenn Änderungen oder Abweichungen gegenüber des vorgesehenen Entwicklungsstandes festgestellt werden. Da dieses Konzept auch administrative Tätigkeiten umfasst, genügt eine Klassifikation der entsprechenden Tätigkeiten in problem- oder lösungsorientiert nicht, sodass die Deklaration als „Neutrale Tätigkeit“ ergänzt wurde.

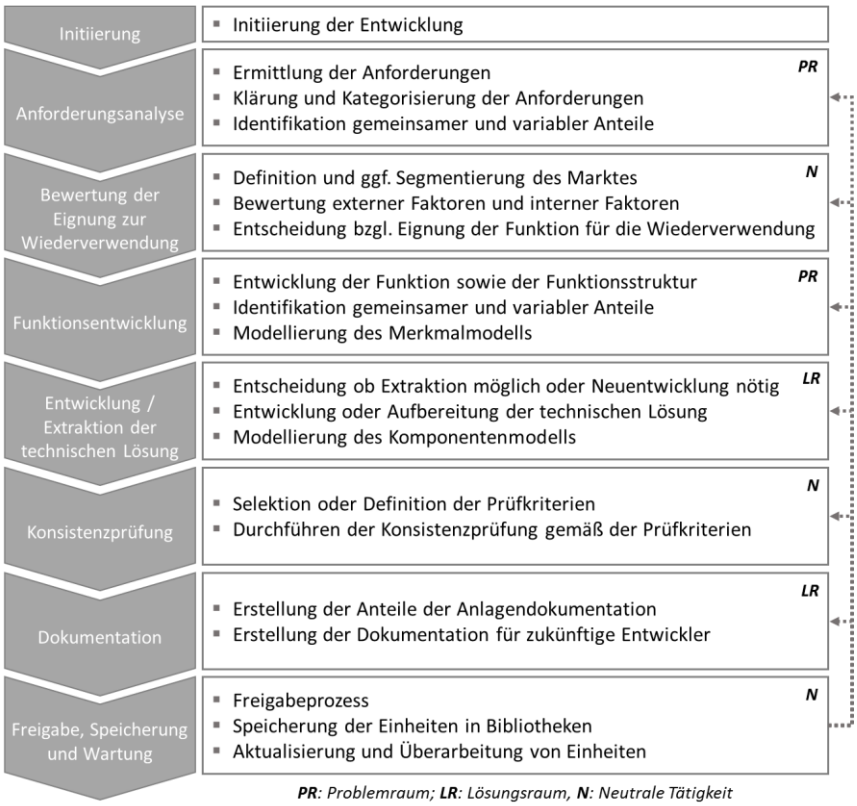

Abbildung 7-1: Projektunabhängiger Anteil des Wiederverwendungskonzeptes

Der projektunabhängige Anteil des Wiederverwendungskonzeptes wird durch einen organisations-internen Auftrag zur Entwicklung einer wiederverwendbaren Einheit initiiert. Dieser Auftrag kann aus strategisch orientierten, internen Abteilungen (Geschäftsführung, Marketingabteilung, etc.) stammen oder aus kurzfristigen Entwicklungen resultieren, wie beispielsweise Kundenprojekten, die einen hohen Bedarf für eine Funktion rechtfertigen. Nachfolgend wird unabhängig davon angenommen, dass die

Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten ohne zeitliche Restriktionen oder inhaltliche Bezüge zu unmittelbaren Kundenprojekten vollzogen wird. Die wiederverwendbare Einheit steht also erst nach abgeschlossener Entwicklung, Überprüfung und in Folge erteilter Freigabe für eine Verwendung in Kundenprojekten zur Verfügung.

Die nachfolgende Beschreibung des Wiederverwendungskonzeptes dient der Dokumentation des Konzeptes, frei von organisationsspezifischen Rahmenbedingungen. Es wird vorausgesetzt, dass die kritischen Entscheidungen durch Vertreter aller beteiligten Gewerke getragen werden und insbesondere die übergreifenden Tätigkeiten in enger Zusammenarbeit oder wenigstens Absprache der beteiligten Gewerke durchgeführt werden. Das Konzept muss von der Engineering-Organisation entsprechend der Rahmenbedingungen angepasst, und die Rollen der Akteure müssen definiert werden. Ein Leitfaden, der dieses Konzept repräsentiert und eine beispielhafte Anpassung an verschiedene Bereiche innerhalb der Siemens AG ermöglicht, kann [SPES_XT15C] entnommen werden.

7.1. Ermittlung der Anforderungen

Die Klärung und notwendige Präzisierung von Anforderungen stellen zentrale Grundlagen des methodischen Konstruierens dar. So ist die damit einhergehende Erstellung der „Anforderungsliste“ in allen Prozessmodellen der [VDI 2221] als erster Schritt vorgesehen. Dies manifestiert sich auch darin, dass eine Vielzahl weiterführender VDI-Richtlinien[26] diese Konvention aufgreifen. Um dieser zentralen Bedeutung Rechnung zu tragen, stellt auch im Rahmen des vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes die Erarbeitung der Anforderungen an die wiederverwendbare Einheit den ersten Schritt dar, welcher unbedingt in enger Zusammenarbeit zwischen Vertretern aller beteiligter Fachdisziplinen zu geschehen hat.

Hinsichtlich der Definition und des Umgangs mit Anforderungen existiert eine Vielzahl an Ansätzen aus verschiedenen Fachbereichen. Nachfolgend wird als Grundlage der anforderungsbezogenen Tätigkeiten [PoRu11] herangezogen. Aufgrund der Tatsache, dass die in diesem Schritt zu erarbeitenden Anforderungen nicht an ein zu entwickelndes Produkt, sondern an eine variable wiederverwendbare Einheit gestellt werden, sind die Ansätze nach [PoRu11] hinsichtlich der Belange der Wiederverwendung anzupassen bzw. zu ergänzen. Die Kategorisierung in „Funktionale Anforderungen“, „Qualitätsanforderungen“ und „Randbedingungen“[27] [PoRu11, S. 16f.] wird hierbei als Basis herangezogen:

<u>Funktionale Anforderungen</u> beschreiben die Funktion, die von einem System oder Produkt zur Verfügung gestellt werden soll. In Bezug auf das Engineering automatisierter Anlagen spezifiziert eine funktionale Anforderung folglich einen zu realisierenden Verfahrensabschnitt sowie die für dessen sichere Ausführung notwendigen Teilfunktionen, wie beispielsweise PCE-Aufgaben. Im Gegensatz zu [Eck15] wird nachfolgend differenziert zwischen der Anforderung (z.B. „Der Anlageteil soll Meerwasser fördern“), welche eine Funktion spezifiziert und der Funktion (z.B. „Meerwasser fördern“) selbst, welche diese Anforderung realisiert.

[26] z.B. „Entwickeln von Lösungsprinzipien“ nach [VDI 2222-1], „Entwerfen technischer Produkte“ nach [VDI 2223], „Entwicklung mechatronischer Produkte“ nach [VDI 2206]

[27] Diese Differenzierung stellt eine Möglichkeit dar, Anforderungen zu kategorisieren. Aufgrund der Bedeutung der zitierten Quelle, wird diese hier übernommen und nicht weiter diskutiert. Eine weiterführende Auseinandersetzung mit funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen im Kontext automatisierter Anlagen kann [Eck15] entnommen werden.

Qualitätsanforderungen beschreiben die Merkmale, welche das zu entwickelnde System aufzuweisen hat. Diese Gruppe der Anforderungen kann sich auf die Leistung, die Verfügbarkeit oder auch die Zuverlässigkeit beziehen.

Randbedingungen schränken den Lösungsraum[28] der Entwicklung ein und sind von den Entwicklern, bzw. den Akteuren des Engineerings, nicht zu beeinflussen. Folglich bestimmen die Randbedingungen, in welcher Art und Weise die vorgenannten Anforderungen in Funktionen, insbesondere aber auch in eine Lösung überführt werden können. Die Randbedingungen sind folglich dem Kontext der wiederverwendbaren Einheiten zuzuordnen.

Diese Kategorisierung greift jedoch die Charakteristika wiederverwendbarer Einheiten nur unzureichend auf: Nachfolgend können Anforderungen aller beschriebener Typen Variabilität aufweisen, also verschiedene Ausprägungen der wiederverwendbaren Einheit spezifizieren bzw. fordern. Im Sinne eines wiederverwendungsorientierten Vorgehens genügt dies aber nicht vollständig, um Anforderungen an wiederverwendbare Einheiten zu definieren. Neben den bereits angeführten, auf [PoRu11] basierenden, Kategorien von Anforderungen werden im Rahmen dieses Konzeptes nachfolgend auch Anforderungen berücksichtigt, die auf die Wiederverwendbarkeit der Einheiten an sich fokussiert sind. So wird ermöglicht, im Rahmen der Anforderungserhebung explizit trennen zu können, zwischen den Anforderungen, welche die wiederverwendbare Einheit in einem System (bzw. eine Lösung) erfüllen soll, und denjenigen Anforderungen, die hinsichtlich der Wiederverwendung der Einheit gestellt werden. Letztgenannte sind für die spätere Lösung nicht mehr von Relevanz, spezifizieren aber den Prozess der Wiederverwendung. Diese Gruppe der Anforderungen soll nachfolgend als „Administrative Anforderungen“ bezeichnet werden. Aufgrund des abweichenden Charakters deren wird davon abgesehen, diese unter den Randbedingungen zu subsummieren.

Administrative Anforderungen beschreiben demnach die Art und Weise, wie wiederverwendbare Einheiten gestaltet werden sollen, um besonders geeignet für die Wiederverwendung zu sein. Diese Anforderungen können organisationsintern standardisierte Strukturen oder aber die Modellierung der Variabilität betreffen.

Auch bei den Quellen der Anforderungen schlägt sich die beschriebene Differenzierung nieder. So sind die funktionalen Anforderungen, Qualitätsanforderungen und Randbedingungen eher an diejenigen Anforderungen angelehnt, die typischer Weise auch an Anlagen und Anlageteile gestellt werden, wohingegen die Administrativen Anforderungen der Engineering-Organisation selbst entstammen und der Definition des Umgangs mit der wiederverwendbaren Einheit dienen. Das Vorgehen hinsichtlich der Erarbeitung der Anforderungen ist in Abbildung 7-2 dargestellt. Sämtliche Kategorien von Anforderungen können in Teilen in organisationsinternen Katalogen abgelegt sein und somit die Erarbeitung der Anforderungen erleichtern.

Basierend auf der internen Beauftragung zur Realisierung einer Funktion als wiederverwendbare Einheit werden in einem ersten Schritt die Funktionalen Anforderungen, Qualitätsanforderungen sowie die Randbedingungen definiert. Grundlage dafür können auch Erfahrungen vorangegangener Engineering-Projekte sein. Diese Anforderungen umfassen auch Informationen bezüglich der

[28] Ergänzend ist dieser Definition hinzuzufügen, dass Randbedingungen Problem- wie auch Lösungsraum (nach der Definition aus Kapitel 3.3.3) gleichermaßen einschränken können.

erforderlichen Schnittstellen und können bereits Variabilität beinhalten (z.B. „Es soll eine Förderrate von 10.000 m³/d oder 20.000 m³/d realisiert werden können“). Zwar umfasst dieser Schritt die Aufgaben des Anforderungsmanagements nach [KGW14], jedoch weicht das Vorgehen aufgrund der Ausrichtung auf die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten ab, da hier die Anforderungen der Organisation einen höheren Stellenwert aufweisen. Die bereits gewonnenen Anforderungen werden daraufhin durch die Administrativen Anforderungen ergänzt, welche die organisationsinternen, wiederverwendungsspezifischen Konventionen repräsentieren (z.B. „Die Variabilität soll mittels Merkmalmodellen abgebildet werden“). Die Administrativen Anforderungen beinhalten in der Regel keine Variabilität.

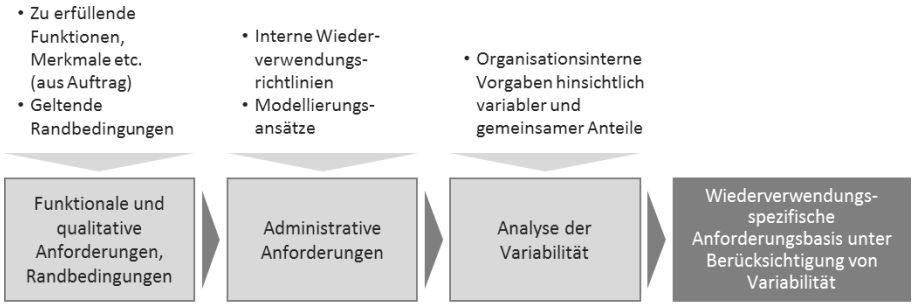

Abbildung 7-2: Anforderungsgewinnung für wiederverwendbare Einheiten

Auf Basis dieser Anforderungen sollte bereits zu diesem frühen Zeitpunkt der Entwicklung Variabilität identifiziert werden, sodass diese auch in den nachfolgenden Schritten explizit berücksichtigt werden kann. Neben der frühen expliziten Berücksichtigung der variablen Anteile ermöglicht dies aber primär, gemeinsame Anteile aller Varianten einer wiederverwendbaren Einheit zu identifizieren und somit nachfolgenden Entwicklungsaufwand zu reduzieren. Dieses Bestreben existiert auch im Bereich des Software-Engineerings, sodass dort Techniken entwickelt wurden, die es ermöglichen, diese gemeinsamen Anteile systematisch zu extrahieren. Nachfolgend wird ein mögliches Vorgehen beschrieben, das angelehnt ist an [CHW98] und grundsätzlich in allen nachfolgenden Schritten angewendet werden kann, um gemeinsame und variable Anteile zu identifizieren. Die dazu notwendigen Schritte sind in Abbildung 7-3 dargestellt. Die Grundlage dieser Analyse stellt die Definition des Betrachtungsumfanges dar. Der Betrachtungsumfang ist in der Regel eindeutig durch die interne Auftragserteilung zur Entwicklung einer wiederverwendbaren Einheit definiert, beschränkt sich zu diesem frühen Stadium jedoch auf die Anforderungen an die Einheit. In diesen sind nun die variablen Anteile zu identifizieren. Dabei umfasst die Variabilität Bandbreiten geforderter Parameter ebenso wie alternative funktionale oder technische Ausprägungen. Auf Basis dessen sind die als variabel identifizierten Anteile kritisch zu hinterfragen. Als Leitsatz sollte hierbei dienen, welche Variation dazu führt, dass mögliche zukünftige Kundenwünsche effizienter erfüllt werden können, und umfasst somit auch mögliche Erleichterungen des Engineerings. Variabilität, die darüber hinausgeht, ist zu reduzieren oder zu entfernen, was dazu führt, dass die gemeinsamen Anteile aller Varianten einer wiederverwendbaren Einheit zunehmen. In Folge dessen sind die variabel verbleibenden Anteile explizit zu kennzeichnen. Eine solche Veränderung hat jedoch in Rücksprache mit dem organisationsinternen Auftraggeber zu geschehen.

Als Ergebnis dieses Schrittes liegt eine valide und umfassende Anforderungsbasis für die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit vor, die bereits Variationspunkte innerhalb der Anforderungen

beinhaltet. In welcher Form diese Anforderungen dokumentiert werden, hängt maßgeblich von den verwendeten Engineering-Werkzeugen ab. Die Kennzeichnung variabilitätsbehafteter Anforderungen kann mittels für das Requirements-Engineering spezialisierter Werkzeuge ermöglicht werden. Werkzeugtechnische Ansätze werden in Kapitel 9 diskutiert. Unabhängig von der Dokumentation stellen die Anforderungen eine Grundlage dafür dar, den Entwicklungsaufwand zumindest abschätzen zu können, um nachfolgend eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Funktionen bzw. zu entwickelnden wiederverwendbaren Einheiten vornehmen zu können.

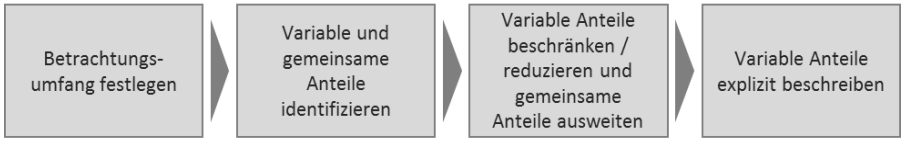

Abbildung 7-3: Identifikation variabler und gemeinsamer Anteile nach [CHW98]

7.2. Analyse und Bewertung der Eignung zur Wiederverwendung

Ähnlich der Produktentwicklung erfordert auch die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten einen gegebenenfalls erheblichen Aufwand an materiellen wie auch immateriellen Ressourcen. Da Unternehmen in der Regel Gewinn erwirtschaften sollen, indem Produkte erarbeitet und Leistungen erbracht werden (z.B. das Engineering einer Anlage), die zu einem höheren Preis veräußert werden können, als die Selbstkosten des Unternehmens betragen [ENG06, S. 38], muss gerade auch bei der Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten für das Engineering eine effiziente Allokation der Ressourcen gewährleistet werden können [AND14, S. 42FF.; GRS+15, S. 29F.]. Diese Ressourcenschonung kann nur sichergestellt werden, wenn lediglich die Entwicklung derjenigen Einheiten vorgenommen wird, die sich als vorteilhaft hinsichtlich des zukünftigen Aufwandes auszeichnen. Da eine solche Entscheidung abhängig von einer Vielzahl an Faktoren ist, wird nachfolgend ein dreistufiger, qualitativer Bewertungsansatz beschrieben, der im Rahmen des Wiederverwendungskonzeptes genutzt werden kann, um die Eignung von Funktionen hinsichtlich einer Realisierung als wiederverwendbare Einheit zu überprüfen. Im Engineering ist nicht davon auszugehen, dass auf eine umfängliche Datengrundlage der abgesetzten Varianten zurückgegriffen werden kann, wie es bei anderen Ansätzen, wie beispielsweise [BWE+14] der Fall ist, der „Weiße Ware“ betrachtet. Aufgrund der nur schwierig zu quantifizierenden Datenlage, insbesondere zu diesem frühen Stadium der Entwicklung in welchem diese Bewertung vorgenommen wird, ist daher eine qualitative Analyse der Eignung als geeigneter anzusehen [HEHU13, S. 120]. Ergebnis des Ansatzes ist eine matrixbasierte Darstellung, ähnlich der BCG-Matrix nach [HEN73; BCG+13, S. 224FF.]. Der auf die Wiederverwendbarkeit fokussierte Ansatz berücksichtigt eine Definition des Marktes [HEHU13, S. 47FF.; GRS+15, S. 29F.][29] und umfasst die Überprüfung interner wie auch externer Faktoren, wie es auch bei der Technologie-Portfolio-Matrix nach [PFDÖ90; BCG+13, S. 262FF.] der Fall ist. [GRS+15] stellt bezüglich derartiger Bewertungen heraus, dass diese aufgrund von Veränderungen in Markt oder Unternehmen in regelmäßigen Abständen wiederholt werden sollten [GRS+15, S. 29F.].

[29] Entgegen der Produktentwicklung geht es im Falle des hier vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes darum, Funktionen hinsichtlich deren Eignung als wiederverwendbare Einheit bereitgestellt zu werden, zu untersuchen. Dies impliziert folglich, dass in der Regel kein Markt im Sinne der Produktentwicklung herangezogen werden kann, sondern es viel mehr darum geht abzuschätzen, in welchem Umfeld die Engineering-Organisation das Engineering einer automatisierter Anlage anbietet bzw. wie einzelne Funktionen von Kunden nachgefragt werden.

Die vorigen Schilderungen machen bereits deutlich, dass eine solche Analyse eine weitreichende Erfahrung hinsichtlich des Marktes wie auch ein detailliertes Wissen bezüglich der Engineering-Organisation sowie der Anlagen und deren Funktionen erfordert. Folglich wird es als vorteilhaft angesehen, dass eine solche Bewertung von speziell zusammengestellten Teams durchgeführt wird, die sowohl Vertreter mit strategischem und kaufmännischem wie auch technischem Hintergrund aufweisen. Es ist das Ziel dieses Bewertungsansatzes, alle für die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit relevanten Aspekte des Ingenieurwissens [VDI 5610-1, S. 19] in Betracht zu ziehen, um eine valide Informationsbasis sicherzustellen. Der dreistufige Bewertungsansatz ist in Abbildung 7-4 ersichtlich.

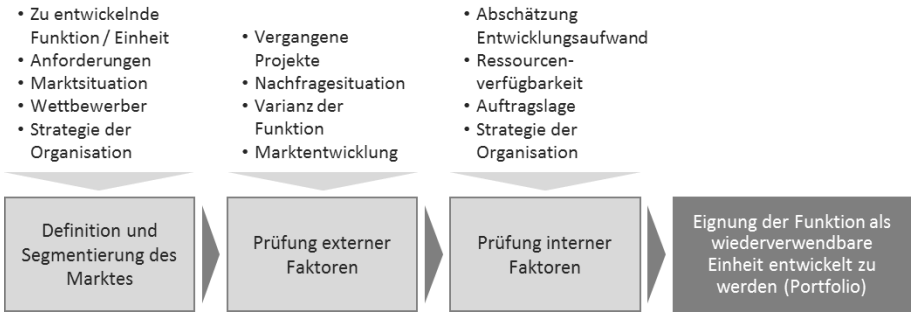

Abbildung 7-4: Dreistufiger Bewertungsansatz bezüglich der Eignung zur Wiederverwendung[30]

Grundlage dieses Bewertungsansatzes ist die Funktion, welche als wiederverwendbare Einheit entwickelt werden soll, sowie die vorgesehenen Anforderungen, welche diese Einheit spezifizieren. Basierend auf diesen Informationen ist die Marktsituation sowie die Strategie der Organisation[31] dahingehend zu analysieren, welcher Markt (z.B. „Anlagen für die Trinkwassergewinnung“ oder aber „Meerwasserentsalzungsanlagen“) adressiert werden soll. Hierbei ist im Besonderen die Art der Funktion zu berücksichtigen. Während eine wenig spezialisierte Funktion (z.B. „Flüssiges Medium fördern“) in verschiedensten Anlagen und folglich auch Märkten zu verwenden ist, ist der Einsatz einer spezialisierten Funktion (z.B. „Wasser und Salz trennen“) auf einen enger gefassten Markt begrenzt. Folglich hat diese Definition des Marktes erhebliche Auswirkungen auf die nachfolgenden Schritte der Bewertungen, die jedoch auch von weiteren Faktoren, wie die zu erwartenden Nachfrage, abhängt.

Entsprechend des stark projektgetriebenen Charakters des Engineerings, der als „Market-Pull“ [SWA00, S. 445; DIS12, S. 48FF.] bezeichnet werden kann, erfolgt auch im Rahmen des dreistufigen Bewertungsansatzes die Analyse der externen Faktoren vor der Prüfung der internen. Grundlage dieser ersten Prüfung sind Aufzeichnungen und Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten, die eine retrospektive Bewertung der bisherigen Marktdurchdringung einer Funktion ermöglichen. Auf Basis dessen kann wiederum eine Abschätzung vorgenommen werden, inwiefern sich die Funktion als wiederverwendbare Einheit eignet. Basierend auf vorliegenden Nachfragen, der kaufmännischen Einschätzung sowie der generellen Marktentwicklung kann darüber hinaus auch eine Abschätzung der

[30] Aufgrund der besseren Lesbarkeit wird auf eine explizite Nennung des Plurals in dieser Abbildung verzichtet. Der Bewertungsansatz kann gleichwohl aber für einzelne Einheiten, variable Einheiten als auch sinnvolle Gruppen von Einheiten vorgenommen werden.

[31] Im Engineering sind grundsätzlich alle drei nach [POR99] definierten Strategien, also die umfassende Kostenführerschaft, die Differenzierung wie auch die Konzentration auf Schwerpunkte [POR99, S. 70FF.] anzutreffen. Folglich kann weder der Bewertungsansatz noch das Wiederverwendungskonzept als Ganzes spezifisch an eine dieser Strategien angepasst werden.

zukünftigen Entwicklung[32] vorgenommen werden, um somit ein mögliches Marktpotential abschätzen zu können. Hierbei ist es unerlässlich, auch die potentielle Variabilität der Funktion zu berücksichtigen, um zum einen abzuschätzen, ob eine Realisierung der gesamten Variabilität in einer wiederverwendbaren Einheit als wirtschaftlich sinnvoll zu erachten ist, und zum anderen, ob die Variabilität Auswirkungen auf die mögliche Verwendung der wiederverwendbaren Einheit in zukünftigen Kundenprojekten aufweist.

Die Überprüfung der externen Faktoren kann bereits in Form eines Portfolios dargestellt werden. Ein solches Portfolio ist in Abbildung 7-5 dargestellt, wobei die bisherige Durchdringung des Marktes auf der Abszisse und das abgeschätzte Marktpotential auf der Ordinate angetragen sind. Die Einteilung hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit oberhalb der Abszisse ist exemplarischer Natur und kann an die spezifischen Anforderungen der Engineering-Organisation angepasst werden. Der Bereich unterhalb der Abszisse (Marktpotential primär bestimmt durch negatives Marktwachstum) kann nur schwer mittels eines standardisierten Vorgehens bewertet werden, da die Entwicklung einer wiederverwendbaren Einheit für schrumpfende Märkte unter Umständen sinnvoll sein kann, dies aber einer weiteren Überprüfung bedarf. Das Ergebnis dieser Analyse gilt ausschließlich für den zu Grunde gelegten, definierten Markt.

Nachdem die externen Faktoren überprüft worden sind und bestenfalls die Eignung zur Wiederverwendung belegt wurde, gilt es darüber hinaus, auch die internen Faktoren zu prüfen, die frei nach [PFDÖ90] als die Fähigkeit der Engineering-Organisation, die Entwicklung zu vollziehen, bezeichnet werden können. Grundlage dessen ist die Überprüfung, ob die Funktion der organisationseigenen Strategie zuträglich ist. Die Fähigkeit der Organisation, die Entwicklung durchzuführen, resultiert nach [PFDÖ90] aus dem Verhältnis von Ressourcenverfügbarkeit zu abgeschätztem Entwicklungsaufwand. Hierbei muss in jedem Fall auch die Unsicherheit der Entwicklung neuer Technologien berücksichtigt werden, sodass die Entwicklung einer wiederverwendbarer Einheit unter Verwendung bewährter Technologien im Verhältnis einem geringeren Risiko obliegt als die Verwendung unbekannter Technologien. Die Freigabe der erforderlichen Ressourcen kann durch argumentative Nutzung der Ergebnisse des vorigen Prüfungsschrittes positiv beeinflusst werden. Ebenso ist als förderlich anzusehen, wenn aktuelle Kundenanfragen oder -aufträge die Nachfrage des Marktes auch in das Unternehmen tragen. Aus dieser Bewertung lässt sich ableiten, inwiefern die Engineering-Organisation fähig ist, die Entwicklung zu vollziehen.

Das Ergebnis des beschriebenen, dreistufigen Bewertungsansatzes kann in Form eines Portfolios dargestellt werden, wie es Abbildung 7-6 zeigt. Eine solche Darstellung repräsentiert die Bewertung einer oder mehrerer Funktionen vor dem Hintergrund der vorgenommenen Definition des Marktes aus der Sicht einer Engineering-Organisation. Im dargestellten Portfolio sind die geprüften externen Faktoren kumuliert auf der Ordinate und die internen Faktoren auf der Abszisse angetragen. Funktionen, die eine geringe Eignung zur Wiederverwendung (Ordinate) aufweisen, bergen das Risiko, dass diese zwar entwickelt, später aber nicht angewendet werden, sodass die Amortisation der initialen Aufwände der Entwicklung nur schwerlich zu erreichen ist. Funktionen hingegen, bei denen die Bewertung eine eher geringe Fähigkeit der Engineering-Organisation zur Entwicklung dieser Funktion (Abszisse) ausweist, bergen das Risiko, dass die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit höhere

[32] Dieser Schritt kann durch entsprechende Szenario-Techniken (siehe auch [WIL06; BCG+13, S. 398FF.; SIGA02, S. 70FF.]) unterstützt werden.

Aufwände erfordert als vorab kalkuliert wurden. Auf Basis dieser Bewertung kann eine relative Abschätzung der Eignung verschiedener Funktionen vorgenommen werden, von einer Engineering-Organisation als wiederverwendbare Einheit entwickelt zu werden. Die Bewertung ermöglicht es, begrenzte Ressourcen bestmöglich zu allokieren [AND14, S. 42FF.] und Fehlentwicklungen zu vermeiden.

Abbildung 7-5: Grafische Repräsentation der Analyse der externen Faktoren

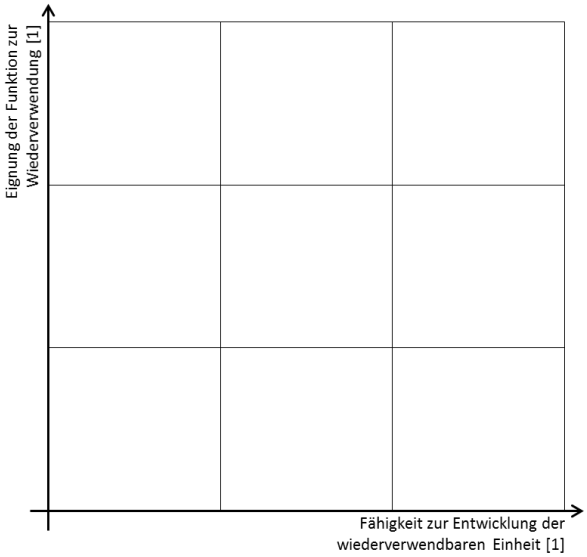

Abbildung 7-6: Grafische Repräsentation des Ergebnisses des dreistufigen Bewertungsansatzes

7.3. Entwicklung der Funktionen und Funktionsstruktur

Ist eine Weiterführung der Entwicklung als durchführbar und wirtschaftlich wie auch technisch sinnvoll bewertet worden, stellt es den nachfolgenden Schritt des Wiederverwendungskonzeptes dar, die Anforderungen in detaillierte Funktionsstruktur(en) zu überführen. Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben wurde, repräsentieren die Funktionen die Verfahrensabschnitte und Grundoperationen sowie die assoziierten PCE-Aufgaben. Im Rahmen dieses Schrittes entsteht in Form eines sukzessiven Detaillierungsprozesses auch das Merkmalmodell (vgl. Kapitel 6.3.1), welches die Funktionen, Parameter und Schnittstellen des Problemraumes sowie die darin vorgesehene Variabilität repräsentiert.

Wie Abbildung 7-7 zeigt, wird die Modellierung des Merkmalmodells parallel zu den inhaltlich orientierten Tätigkeiten vorgenommen. Grundlage der Erstellung des Merkmalmodells ist die Erarbeitung einer adäquat formulierten Definition der Funktion sowie der Funktionsstruktur. Hierbei ist anzumerken, dass die Definition der Funktion bei zunehmender Erfahrung der Organisation in diesem Schritt an Relevanz verliert, da davon auszugehen ist, dass diese bereits Teil des internen Auftrages zur Entwicklung einer wiederverwendbaren Einheit ist. Nachdem die Funktion in eine adäquat formulierte Funktionsbezeichnung aus Subjekt und Verb überführt ist, wie sie in [AKI94] beschrieben wird, kann die Dekomposition dieser Funktion vorgenommen und somit die funktionale Detaillierung der Funktion vollzogen werden.

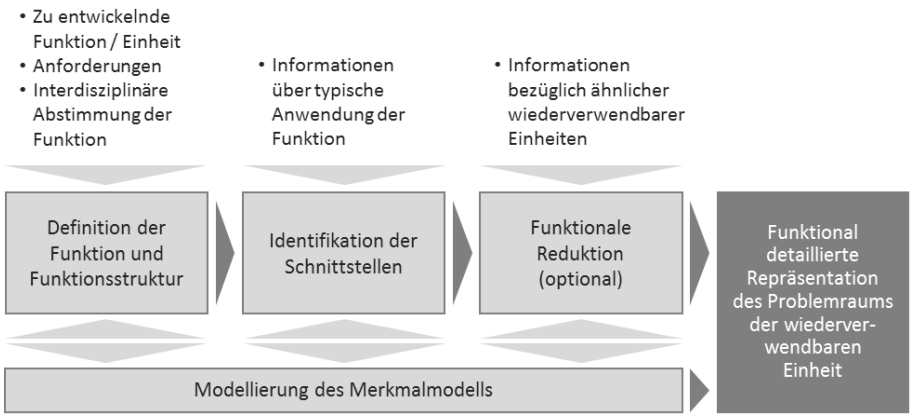

Abbildung 7-7: Entwicklung der Funktionsstruktur

Da die Arbeit mit Funktionen, wie bereits in Kapitel 6.2 erläutert, immer auch die Festlegung eines adäquaten Abstraktionsgrades erfordert, wird die Anlehnung der Funktion an den Verfahrensabschnitten und Grundoperationen als Konvention festgelegt (z.B. „Meerwasser speichern“ oder „Hypochlorit dosieren“). Diese Konvention ermöglicht es, ausreichend genau zu spezifizieren, welchen Zweck die jeweilige Funktion erfüllt.[33] Dieser Schritt kommt einer Überführung der Anforderungen in Funktionen gleich, wie sie auch in [VDI 2221] proklamiert wird. Hierbei kann das Grundfließschema als domänenspezifische Ausprägung der Funktionsstruktur angesehen werden. Beide Ausprägungen erlauben schon eine Identifikation der Verbindungen, sowohl innerhalb einer Funktion als auch zwischen verschiedenen zukünftigen Funktionen. Folglich kann auf dieser Basis im nachfolgenden Schritt die explizite Aufarbeitung der Schnittstellen vorgenommen werden.[34] Zu diesem Stadium der Entwicklung sind die Schnittstellen als Dokumentation des Bedarfes einer zu realisierenden Schnittstelle zu verstehen, sodass diese im weiteren Verlauf des Vorgehens detailliert werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die Verbindung zweier Verfahrensabschnitte, an welcher im Rahmen dieses Schrittes lediglich die Art des Mediums und eventuell erforderliche Volumenströme definiert sind und eine Detaillierung hinsichtlich Querschnitt, Material und Verschraubung der Rohrleitung erst zu einem späteren Zeitpunkt getroffen wird. Neben diesen verfahrenstechnischen Parametern kann die Schnittstellenspezifikation aber auch den Bedarf einer Informationsübertragung dokumentieren und betrifft somit auch die automatisierungstechnische Planung.

Die vorgesehenen Schnittstellen sind dahingehend zu kennzeichnen, ob diese verpflichtend verbunden werden müssen oder aber im Rahmen des Engineerings der Anlage unverbunden bleiben dürfen. Bei Verwendung der Formalisierten Prozessbeschreibung kann diese Information mittels des „Beziehungsherstellenden Bestandteils der Merkmale“ modelliert werden [VDI/VDE 3682-2, S. 6FF.]. Diese Gruppe von Merkmalen kann jedem Objekt hinterlegt werden und ermöglicht eine Umsetzung des Prüfungsansatzes, der in [SZF+15*] skizziert und in Kapitel 8.4 beschrieben ist.

---

[33] Die Erarbeitung dieses Schrittes macht die Veränderung eines interdisziplinären Vorgehens deutlich: Die Erstellung des Grundfließschema (wie auch des Verfahrensfließschema) stellt bei einem konventionellen Vorgehen (vgl. Kapitel 2.2) eine zentrale Tätigkeit der Verfahrenstechnik dar, wohingegen dies im Sinne eines interdisziplinären Vorgehens eine abgestimmte und funktionsorientierte Tätigkeit ist, die von allen beteiligten Gewerken geprägt wird.

[34] Die Identifikation der Schnittstellen wird bei einer Modellierung mittels der Formalisierten Prozessbeschreibung (vgl. Abbildung 6-2) erleichtert, da die explizite Modellierung von Produkt-, Energie- und Informationsflüssen in Kombination mit der Assoziation zu *Technischen Ressourcen* bei Betrachtung einzelner *Prozessoperatoren* (welche folglich Verfahrensabschnitten oder Grundoperationen entsprechen) die Notwendigkeit der Schnittstellen verdeutlicht. Dies ist bei den Fließschemata nach [DIN EN ISO 10628] nicht zwingend sichergestellt, da beispielsweise Informationsflüsse auch mittels der Symbolik an PCE-Aufgaben definiert werden können.

Die beschriebene Möglichkeit der schrittweisen Konkretisierung spiegelt sich auch in der Modellierung der Merkmalmodelle wider. Hier können Funktionen und Merkmale definiert werden, die nachfolgend durch untergeordnete Elemente weiter detailliert werden können. So können bereits zu einem sehr frühen Stadium variable Elemente sichtbar gemacht werden. Es ist jedoch zwingend darauf zu achten, dass die modellierten Relationen unabhängig von der Implementierung definiert werden [BEU03, S. 88], um somit das Merkmalmodell möglichst beständig gegen Änderungen oder Überarbeitungen des Familienmodells zu gestalten. Diese Entkopplung der Strukturen kommt den Ansätzen der Modularisierung gleich, die in Kapitel 3.1.3 diskutiert werden.

Obwohl die Funktionsorientierung bereits einer Abstraktion der zu verwendenden Echtgeräte gleich kommt, kann das beschriebene Vorgehen dennoch dazu führen, dass eine Vielzahl unterschiedlicher, aber auf abstrakter Ebene ähnlicher Verfahrensabschnitte als wiederverwendbare Einheit entwickelt werden. Diese Vielzahl kann erforderlich sein, um verschiedene Kundenwünsche zu erfüllen, führt aber zu einem nicht zwingend notwendigen Anstieg der Zahl von wiederverwendbaren Einheiten. Um dem entgegenzuwirken, wird nachfolgend ein optionaler Schritt beschrieben, der die „Funktionale Reduktion“ [HJS+15*], also das Zurückführen eines Verfahrensabschnittes auf die zu Grunde liegende, abstrakte Funktion umfasst. Dieser Schritt kann als eine Ausprägung der Kategorisierung von Funktionen nach [STO97] angesehen werden. So kann eine wiederverwendbare Einheit, die dazu entwickelt wurde, um die Funktion „Meerwasser speichern“ zu realisieren gegebenenfalls auch verwendet werden, um Süßwasser zu speichern, sodass eine geeignete Abstraktion zu „Wasser speichern“ oder aber auch zu „Medium speichern“[35] führen kann. Somit können nicht nur verschiedene Ausprägungen (z.B. optionale Zusatzfunktionen wie „Medium heizen“ oder „Medium rühren“) gebündelt, sondern auch alternative Anwendungsszenarien eingeschlossen werden. Diese Bündelung ermöglicht es einerseits, verschiedenartig ausgeprägte wiederverwendbare Einheiten zu gruppieren, die im Kern dieselbe Funktion erfüllen, führt aber in Konsequenz dazu, dass die Agglomeration der Informationen eine Komplexitätssteigerung der wiederverwendbaren Einheiten zur Folge hat. Die Steigerung der Komplexität ist jedoch mittels einer geeigneten Modellierung, wie sie in Kapitel 6.3 ausführlich beschrieben wird, sowie einer geeigneten Werkzeugunterstützung (vgl. Kapitel 9) zu kompensieren. Liegen bereits wiederverwendbare Einheiten für ähnliche Funktionen vor, so muss überprüft werden, inwiefern eine Kombination der neu zu entwickelnden Einheit mit bestehenden Einheiten möglich ist.

Das Ergebnis dieses Schrittes stellt eine interdisziplinär abgestimmte Funktionsstruktur dar, die dokumentierte Schnittstellen aufweist und deren Variabilität in Form von Merkmalmodellen dokumentiert ist.

[35] In diesem Falle ist jedoch unbedingt zu spezifizieren, welchen Restriktionen das zu speichernde Medium unterliegt. Unabhängig vom Abstraktionsgrad kann dies notwendig sein, um mögliche Informationen zu dokumentieren, die über die Definition der Funktion hinausgehen; im Fall des Meerwassers also beispielsweise der Salzgehalt, korrosive Eigenschaften oder auch die Temperatur.

7.4. Entwicklung der technischen Lösung

Basierend auf den zuvor entwickelten Ergebnissen des Problemraumes wird im nachfolgenden Schritt die technische Lösung erarbeitet. Grundsätzlich ist es das Bestreben einer Engineering-Organisation, die Aufwände auch bei der Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten zu reduzieren, indem bereits entwickelte Ergebnisse verwendet werden (vgl. Kapitel 3.2.1). Darum wird, abhängig davon, inwiefern die Engineering-Organisation bereits Erfahrung bezüglich der Entwicklung ähnlicher Verfahrensabschnitte aufweist, basierend auf den Funktionen der Funktionsstruktur sowie der Anforderungen entschieden, ob die technische Lösung neu entwickelt (Kapitel 7.4.1) oder aus bestehenden Lösungen extrahiert wird (Kapitel 7.4.2). Diese Entscheidung bedarf neben einem Team von Vertretern der involvierten Fachdisziplinen insbesondere auch der persönlichen Erfahrung, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Datenbasis abgeschlossener Projekte in geeigneter Weise aufgearbeitet ist und somit beispielsweise kein merkmalbasiertes Auffinden der entsprechende Projekte vorgenommen werden kann. Insbesondere ist anzumerken, dass die Entscheidung für eine Extraktion aus bestehenden Lösungen bei einer nachträglichen Feststellung der Nichteignung der identifizierten Lösung jederzeit revidiert werden kann.

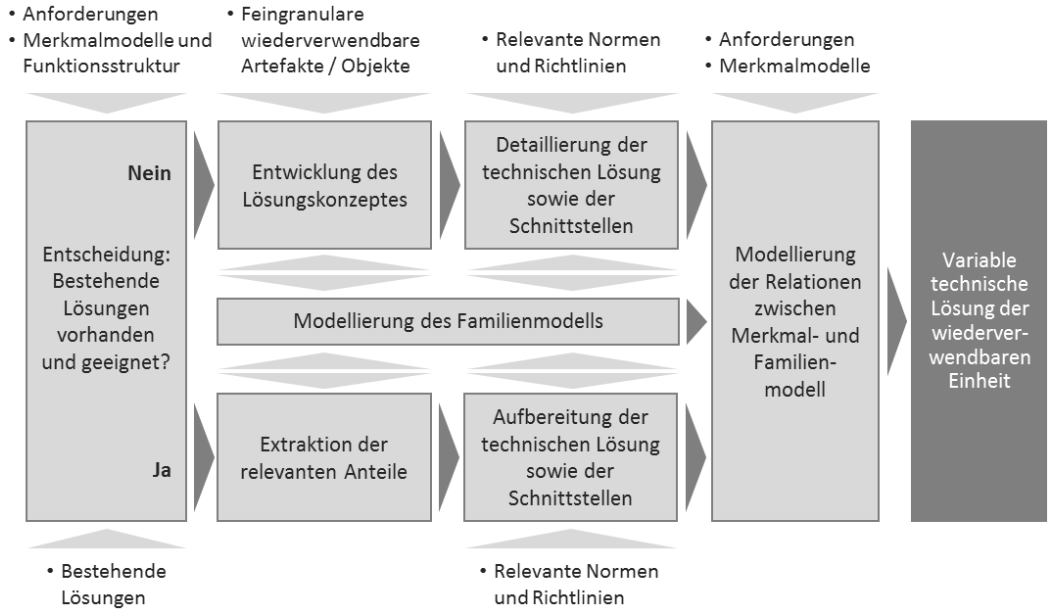

Abbildung 7-8: Entwicklung der technischen Lösung

Die Entwicklung der technischen Lösung ist kombiniert in Abbildung 7-8 dargestellt. Unabhängig davon, ob die technische Lösung neu entwickelt oder aber aus bestehenden Lösungen extrahiert wird, entsteht im Rahmen dieses Schrittes ein zunehmend detailliertes Familienmodell, welches die Elemente der Lösung sowie deren Variabilität repräsentiert (vgl. Kapitel 6.3.2). Da die Erstellung dieses Modells weitgehend unabhängig davon ist, auf welchem Weg die technische Lösung erarbeitet wird, wird die Beschreibung der Modellierung im Rahmen des Kapitels 7.4.1 vorgenommen, ist jedoch gleichermaßen auch im Vorgehen nach Kapitel 7.4.2 anzuwenden.

7.4.1. Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten ohne bestehende Lösung

Liegen für die zu entwickelnde Funktion keine bestehenden Lösungen vor oder werden diese als ungeeignet erachtet, wird die technische Lösung der wiederverwendbaren Einheit weitgehend entlang der üblichen Verfahrensmodelle beispielsweise nach [VDI 2221] entwickelt. Abweichend davon wird jedoch die Variabilität explizit berücksichtigt, die in den Anforderungen sowie den Funktionen enthalten ist und im Merkmalmodell repräsentiert wird. Grundlage dieses Schrittes sollte es sein, die Variabilität erneut kritisch zu hinterfragen, um den Entwicklungsaufwand nicht unnötig zu steigern. Hierbei kann das Vorgehen nach Abbildung 7-3 angewendet werden.

Der systematischen Entwicklung folgend, entsteht im Laufe dieses Schrittes auch das Familienmodell (bzw. die hierarchischen Familienmodelle), welches die Variabilität des Lösungsraumes, aber auch die Relationen innerhalb der technischen Lösung repräsentiert (vgl. Kapitel 6.3.2). Die Struktur dieser Modelle kann entsprechend der jeweiligen domänenspezifischen Anforderungen, die in Form der Administrativen Anforderungen definiert sein sollten, angepasst werden. Dabei kann die Struktur durchaus auch aus der Arbeitsweise der beteiligten Gewerke oder der Datenstruktur der verwendeten Engineering-Werkzeuge resultieren. In Abbildung 6-4 ist das Familienmodell entsprechend der Strukturierung aufgebaut, die in [DIN EN ISO 10628] als Geräteklassifikation vorgeschlagen wird. Da diese lediglich Geräte umfasst, sind Softwareanteile, die der Realisierung der PCE-Aufgaben dienen, den Geräten zugeordnet. Alternativ kann jedoch auch eine Strukturierung gemäß der Baustruktur vorgenommen werden, dies ist allerdings nur in Fällen zu empfehlen, welche nach Tabelle 6-1 eine Strukturierung entlang der Baustruktur nahelegen.

Während [VDI 2221] die Entwicklung der „prinzipiellen Lösung“ vorsieht, stellt im Bereich der Planung verfahrenstechnischer Anlagen das Verfahrensschema [DIN EN ISO 10628] dessen Äquivalent dar und beschreibt somit den notwendigen Reifegrad einer Lösung zu diesem Zeitpunkt. Um dieses aus den Verfahrensabschnitten und Grundoperationen (die auf einem Grundfließschema repräsentiert werden) zu erarbeiten, sind diesen Verfahrenselementen die „erforderlichen Apparate und Maschinen außer Antriebsmaschinen“ [DIN EN ISO 10628, S. 8] zuzuordnen. Hierbei ist anzumerken, dass es sich im Rahmen der Konzepterstellung lediglich um Gerätetypen handeln sollte. Entgegen der verfahrenstechnisch fokussierten Betrachtung der [DIN EN ISO 10628] sind im Sinne eines interdisziplinären Ansatzes bereits die Antriebsmaschinen vorzusehen sowie die notwendigen PCE-Aufgaben zu spezifizieren.[36]

Im Rahmen dieses Schrittes sind die bereits etablierten, disziplinspezifischen und feingranularen wiederverwendbaren Einheiten, die als Bibliotheken in Engineering-Werkzeugen vorliegen, heranzuziehen. Eine Verwendung dieser Einheiten reduziert nicht nur den Aufwand der Entwicklung, sondern steigert auch die Akzeptanz der Anwender, nähert dies doch die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten den sonst üblichen Tätigkeiten im Engineering an.

Das erarbeitete Lösungskonzept in Form eines Verfahrensfließschemas kann unter Berücksichtigung der beschriebenen wiederverwendbaren Einheiten dann in eine technische Lösung überführt werden. Im Bereich der verfahrenstechnischen Anlagen umfasst diese sowohl Inhalte, die in einem dokumentenbasierten Vorgehen in Form eines R&I-Fließschemas, sowie den damit assoziierten

[36] Dies ist gemäß [DIN EN ISO 10628] zulässig, wird dort jedoch als „Zusatzinformation“ deklariert.

Dokumenten wie Stellen- und Funktionsplänen, beschrieben wären.[37] Aufgrund der Forderung nach einem interdisziplinären Vorgehen (vgl. Anforderung M-2) hat diese Lösung jedoch auch Anteile der automatisierungstechnischen Hardware wie auch Software zu umfassen. Sind die von der Software realisierten Regelkreise auf die wiederverwendbare Einheit beschränkt, so sind diese derjenigen Einheit zuzuordnen; kommt es hingegen zu Regelkreisen, welche über die Grenzen der Einheit hinweg wirken, so kann die Konvention getroffen werden, dass diese derjenigen Einheit zuzuordnen sind, die über den Aktor verfügt, sodass das jeweilige Sensorsignal von anderen Einheiten mittels einer Schnittstelle angefordert werden muss.

Die zunehmende Detaillierung hat sich auch im Familienmodell widerzuspiegeln, das sukzessive verfeinert werden muss, um die Lösung adäquat abzubilden. Bei Betrachtung des beispielhaften Familienmodells in Abbildung 6-4 kann dies exemplarisch bedeuten, dass in einem ersten Schritt die Komponente „Tank“ geplant und nachfolgend gemäß der beiden Ausprägungen detailliert wird. Unabhängig von der Detaillierung können mögliche optionale Elemente (z.B. optionale Durchflussmessung) oder auch alternative Ausprägungen (z.B. elektrischer oder hydraulischer Antrieb eines Ventils) mittels entsprechender Relationen modelliert werden.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den im Rahmen dieses Wiederverwendungskonzeptes entwickelten Einheiten um Teile zukünftiger Anlagen handelt, sind insbesondere bei der Entwicklung der technischen Lösung die Schnittstellen zu berücksichtigen und somit die bereits im funktionsorientierten Teil der Entwicklung definierten Schnittstellen zu detaillieren.[38] Hierbei ist zu differenzieren zwischen Zusicherungen, also Eigenschaften, welche die wiederverwendbare Einheit anderen Anlageteilen an der Schnittstelle zur Verfügung stellt, und Anforderungen an die Schnittstelle, also welche Zusicherungen die wiederverwendbare Einheit von der verbundenen Anlageteilen erfordert, um die Funktion (i.S.v. anforderungsgemäßer Wandlung von Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen) erfüllen zu können.

Den abschließenden Schritt der Entwicklung der technischen Lösung stellt die Modellierung der Relationen zwischen Merkmalmodell und Familienmodell dar.[39] Somit wird eine Assoziation zwischen den Funktionen und Merkmalen sowie den Elementen der Lösung vorgenommen. Eine solche Zuordnung ermöglicht bei einer späteren Verwendung der Einheit (vgl. Kapitel 8.2) eine funktionsorientierte Vorkonfiguration der Einheit, also eine Beschränkung des Lösungsraumes auf Basis der gebundenen Problemraumvariabilität, wie sie in Abbildung 6-4 dargestellt ist.

---

[37] Auf eine Definition von herstellerspezifischen Produkten sollte zu diesem Zeitpunkt jedoch verzichtet werden, um keine unnötigen Abhängigkeiten zu schaffen.

[38] Die Formalisierte Prozessbeschreibung (siehe auch Abbildung 6-2) eignet sich besonders zur Identifikation der statischen Schnittstellendefinition, weil diese anhand der *Systemgrenze* mittels *Produkt*, *Information* und *Energie* beschreiben werden kann. Die Allokation der *Prozessoperatoren* zu den jeweiligen *Technischen Ressourcen* ermöglicht darüber hinaus eine Abschätzung hinsichtlich der prozessorientierten Verbindung dieser *Technischen Ressourcen*. Die Definition möglicher Sequenzen ist anhand dessen jedoch nicht ohne weitere Modelle möglich.

[39] Es kann im Sinne der Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung sinnvoll sein, die Modellierung der Relationen zwischen Problem- und Lösungsraum bereits in einem Prozess der stetigen Verfeinerung parallel zum Entwicklungsstand der technischen Lösung vorzunehmen.

7.4.2. Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten basierend auf bestehenden Lösungen

Die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit basierend auf bestehenden Lösungen erfordert, insbesondere hinsichtlich des Auffindens der heranzuziehenden Lösungen, eine gewisse Erfahrung, die aufgrund der meist nicht auf die Wiederverwendbarkeit fokussierten Art der Ablage abgeschlossener Projekte nur schwer ersetzbar ist. Würde die Suche nach abgeschlossenen Projekte ermöglichen, bereits realisierte Funktionen und verbundene Parameter systematisch aufzufinden, wäre es auch für weniger erfahrene Entwickler möglich, diese Suche durchzuführen. Da diese Unterstützung nicht sichergestellt werden kann, muss dieser Schritt durch die Erfahrung von ehemals Projektbeteiligten ausgeglichen werden.[40]

Basierend auf den Ergebnissen der vorigen Arbeiten, also den Anforderungen und den Funktionen, durchsucht ein erfahrener Entwickler erfolgreich abgeschlossene Projekte, die ähnliche Funktionen beinhalten bzw. realisierten. Hierbei kann anhand der Grundfließschemata vorgegangen werden, welche die realisierten Verfahrensabschnitte (also die Funktionen) repräsentieren, ohne durch die Fülle an gerätespezifischer Informationen den Blick darauf zu verbergen, wie es bei einem R&I-Fließschema der Fall wäre. Dieser Schritt entspricht der Analyse des Systems anhand eines „black box model“, wie es in [OTWO98] beschrieben wird. Werden relevante Anteile identifiziert, so muss die Freigabe eingeholt werden, ob Ergebnisse dieses Projektes in nachfolgenden Projekten verwendet werden dürfen oder ob dieses durch mögliche juristische Restriktionen belegt ist. Wird die Freigabe erteilt, sind die Planungsergebnisse des Projektes unter der Maßgabe zu untersuchen, ob diese zur Erfüllung der jeweiligen Funktion beitragen. Hierbei kann es nötig sein, iterativ vorzugehen, in einem ersten Schritt also die Realisierung des Verfahrensabschnittes zu untersuchen und erst in einem darauffolgenden Schritt die jeweilige Allokation der Lösungsbestandteile auf die Grundoperationen vorzunehmen. Diese Allokation entspricht dem Überführen der Entwicklungsartefakte in eine höhere Abstraktion [BAL09, S. 65] und kommt der Demontage gleich, die im Reverse Engineering von unbekannten Massenprodukten notwendig ist [OTWO98, S. 228]. Für diesen Schritt ist es zwingend erforderlich, dass Vertreter aller beteiligten Fachdisziplinen involviert werden, da ansonsten die Eignung der Lösung nicht verlässlich festgestellt werden kann. Werden Abweichungen gefunden, ist zu entscheiden, ob diese mittels einer Anpassung ausgeglichen werden können oder die Abweichungen dazu führen, dass die identifizierten Lösungsbestandteile als ungeeignet zu deklarieren sind und somit entweder ein anderes Projekt analysiert oder aber die Lösung gemäß Kapitel 7.4.1 neu entwickelt werden muss.

Die als relevant erachteten Lösungsbestandteile müssen gegebenenfalls auf den aktuellen Stand der Technik gebracht und von projektspezifischen Eigenschaften befreit werden. Dabei müssen zumindest die vorgesehenen Echtgeräte durch rollenbasierte Platzhalter bestehender Bibliotheken ersetzt und eine Anpassung der Dokumentation vorgenommen werden. Die Aufbereitung der Schnittstellen, schrittweise Detaillierung des Familienmodells wie auch die Relationierung von Elementen des Merkmalmodells zu den Elementen des Familienmodells wird in gleicher Weise durchgeführt, wie dies in Kapitel 7.4.1 beschrieben ist. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit ist die erarbeitete Lösung als aus

[40] Dies stellt den ersten Schritt dar, welcher vollzogen werden würde, wenn es zu einer unsystematischen Wiederverwendung mittels „Copy, Paste & Modify“ (vgl. Kapitel 3.2.1) kommen würde. Aufgrund der hohen Verbreitung dieses Ansatzes kann nach Gesprächen mit Projektpartnern und Industrievertretern davon ausgegangen werden, dass dieses Vorgehen Akzeptanz seitens der Anwender finden wird. Die konzeptionellen Nachteile dieses Ansatzes (vgl. Kapitel 3.2.1) werden dabei durch das systematische Vorgehen ausgeglichen.

einer bestehenden Lösung abgeleitet zu kennzeichnen, um sicherzustellen, dass bei erkannten Planungsfehlern oder Revisionen alle betroffenen Projekte identifiziert werden können.

7.5. Konsistenzprüfung wiederverwendbarer Einheiten

Im Laufe der vorigen Schritte wird die Entwicklung der Einheiten auf zwei alternativen Wegen beschrieben. Unabhängig davon umfassen die wiederverwendbaren Einheiten Engineering-Objekte und gesonderte Variabilitätsmodelle, was wiederum erfordert, dass die Informationen innerhalb und zwischen diesen Modellen als konsistent angenommen werden können. Auf die Variabilität bezogen, bedeutet dies, dass jedem Variationssubjekt sowie den assoziierten Variationsobjekten auch ein Variationspunkt in den Modellen zugewiesen ist (vgl. Kapitel 3.3). Darum wird nachfolgend, basierend auf [SPES_XT15B] und unter Bezugnahme auf die ausführlichen Betrachtungen hinsichtlich der Merkmalmodelle in [BSR10], eine Konsistenzprüfungstechnik vorgestellt, die in Abbildung 7-9 dargestellt und an die Belange des wiederverwendungsbasierten Engineerings angepasst ist. Diese Technik ist grundsätzlich manuell durchführbar, optimaler Weise jedoch per Software-Werkzeug zu unterstützen.

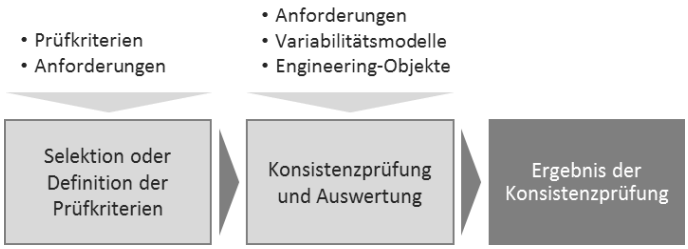

Abbildung 7-9: Konsistenzprüfung für variable wiederverwendbare Einheiten

Die Prüfung sieht dabei zwei Stufen vor: Zum einen die Selektion oder Definition der Prüfkriterien und zum anderen das Durchführen und Auswerten der eigentlichen Konsistenzprüfung. Dabei ist es grundsätzlich möglich, die Prüfkriterien für alle Entwicklungen wiederverwendbarer Einheiten zu definieren, sodass anschließend nur noch eine den Administrativen Anforderungen entsprechende Selektion zu prüfender Kriterien vorgenommen werden muss. Eine exemplarische Auswahl von Prüfkriterien ist in Tabelle 7-1 angeführt. Die Auswahl an Kriterien ist primär auf variabilitätsbezogene Aspekte fokussiert, da davon ausgegangen werden kann, dass verwendete Engineering-Werkzeuge über inhaltsbezogene Konsistenzprüfungsmechanismen verfügen. Das angeführte Kriterium *P-1* ist auf die Prüfung der Kontextvariabilität gegen die Funktionen und Parameter im Merkmalmodell, *P-2* und *P-3* auf die Prüfung der Merkmalmodelle sowie *P-4* und *P-5* auf die Prüfung der Familienmodelle ausgerichtet. Insbesondere hinsichtlich *P-2* ist anzumerken, dass die Berücksichtigung und folglich auch Prüfung partiell gebundener Variabilitätsmodelle ein aktuelles Forschungsfeld darstellt [MARE13], dessen Reife eine Anwendung im Engineering noch nicht erlaubt, sodass dieser Fall nachfolgend nicht weiter berücksichtigt wird. Bei einer Prüfung nach *P-2* werden leere und ungültige Konfigurationen [BSR10, S. 621F.] identifiziert.

Im Rahmen einer manuellen Konsistenzprüfung sind die Prüfkriterien sequenziell abzuarbeiten und die jeweiligen Modelle entsprechend zu prüfen. Werden hierbei Inkonsistenzen oder Fehler aufgedeckt, so sind diese zu dokumentieren und als Ergebnis der Konsistenzprüfung an die entsprechenden Akteure der Entwicklung zu kommunizieren, um eine Nachbesserungen zu initiieren.

Tabelle 7-1: Exemplarische Konsistenzprüfungskriterien für variable wiederverwendbare Einheiten

	Prüfkriterium	Prüfung von
P-1	*Jedes Merkmal, das den Kontext spezifiziert, muss mindestens eine Relation zu einem weiteren Element eines Variabilitätsmodells aufweisen.*	Merkmalmodell (Kontext) gegen Merkmal- oder Familienmodell der Einheit
P-2	*Jedes Merkmalmodell muss mindestens eine valide Konfiguration ergeben.*	Merkmalmodell
P-3	*Jedem Merkmal des Merkmalmodells muss mindestens ein Merkmal untergeordnet oder mindestens eine realisierende Komponente des Familienmodells zugeordnet sein.*	Merkmalmodell (ggf. gegen Familienmodell)
P-4	*Jede optionale Komponente des Familienmodells muss als standardmäßig deselektiert deklariert oder Ziel mindestens einer Relation sein.*	Familienmodell
P-5	*Jede Komponente des Familienmodells muss mindestens ein Engineering-Objekt realisieren.*	Familienmodell

Mit Hilfe dieser Konsistenzprüfungstechnik kann sichergestellt werden, dass bei Verwendung der Einheiten im Engineering keine variabilitätsbezogenen Inkonsistenzen auftreten. Eine Prüfung allgemeiner Planungsfehler, wie beispielsweise der inkorrekten Assoziation zweier Objekte, kann mittels der Definition weiterer Konsistenzprüfungskriterien vorgenommen werden, liegt jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit.

7.6. Erstellung der Dokumentation

Das vorgestellte Wiederverwendungskonzept sieht für die wiederverwendbaren Einheiten vor, dass diese zwei Arten von Dokumentation enthalten. Zum einen sind dies Anteile, welche die Einheit zu einer zukünftigen Anlagendokumentation beisteuern kann. Die Erstellung der Dokumentation ist in der Regel vertraglich gefordert, da ansonsten Genehmigung, Abnahme, Wartung und auch Rückbau der Anlage nicht sicher gewährleitstet werden können. Zudem ist der durchschnittliche Dokumentationsaufwand von „ca. 5 bis 9 Prozent der Investitionssumme (Anlagenneuwert)“ [WESC08] nicht unerheblich und kann beispielsweise durch Wiederverwendung reduziert werden. Zum anderen beinhaltet die umfassende Dokumentation der wiederverwendbaren Einheit auch Anteile, die es zukünftigen Entwicklern ermöglichen sollen, diese Einheit aufzufinden und in konkreten Engineering-Projekten zu verwenden. Die Entstehung beider Anteile ist in Abbildung 7-10 repräsentiert und wird nachfolgend in Kürze beschrieben. Die Berücksichtigung von Datenblättern ist in der genannten Abbildung lediglich für den Sonderfall angeführt, dass Echtgeräte verwendet werden sollen.

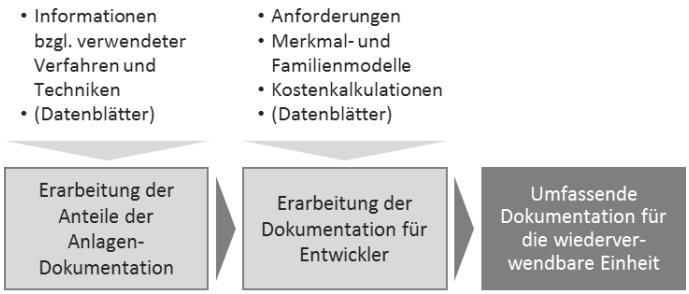

Abbildung 7-10: Erarbeitung der Dokumentation

Die wiederverwendbaren Einheiten auf Basis dieses Wiederverwendungskonzeptes repräsentieren, gemäß der zuvor getroffenen Konvention, Anlageteile, die Verfahrensabschnitte zur Verfügung stellen. Aufgrund dieses nicht unerheblichen Funktionsumfanges der Einheiten ergibt sich die Chance, anlageteilspezifische Teile der zukünftigen Anlagendokumentation bereits präskriptiv zu erstellen. Diese Dokumentation kann grundsätzlich alle Teile der Anlagendokumentation [WESC08, S. 51] umfassen, insbesondere eignen sich dafür jedoch Anteile der Engineering-, Genehmigungs-, Anlagen-, Betriebs- sowie Rückbaudokumentation. Hingegen erscheint eine Definition vorgefertigter Elemente der Projektdokumentation, welche nach [WESC08] alle Dokumente mit Bezug zum Projektmanagement enthält, aufgrund des geringen technischen Bezuges wenig sinnvoll. Somit können den wiederverwendbaren Einheiten Anteile der Fließschemata, Stellenpläne, Sequenzdiagramme, Spezifikationen der Geräte und technische Zeichnungen beigefügt werden. Diese Dokumente können entweder direkt zu den Elementen der Lösung assoziiert (im Falle der Spezifikationen sinnvoll) oder aber als Elemente des Familienmodells abgebildet und zu Elementen des Merkmalmodells relationiert werden (im Falle von Funktionsbeschreibungen oder Sequenzdiagrammen). Eine ausführliche Abhandlung der Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen kann [WESC08] entnommen werden.

Der zweite Teil der Dokumentation ist hinsichtlich der Akzeptanz des Wiederverwendungskonzeptes unerlässlich. Grundlage dieses Anteils der Dokumentation stellen die Merkmal- und Familienmodelle dar, weil diese die funktionale wie auch technische Leistung der wiederverwendbaren Einheit beschreiben. Diese Variabilitätsmodelle besitzen jedoch im Bereich des Engineering noch keine weitreichende Bekanntheit, weshalb den Einheiten darüber hinaus eine übersichtliche Dokumentation beigefügt wird, welche die Funktion der Einheit ebenso wie den Kontext spezifiziert, in welchem die wiederverwendbare Einheit eingesetzt werden kann. Bestandteil der Dokumentation ist folglich nicht nur eine Beschreibung der Einheit selbst, sondern auch der notwendigen Umgebung (vgl. Kontextdefinition nach Abbildung 3-4) sowie möglicher Charakteristika, die nicht in geeigneter Form mittels der Variabilitätsmodelle repräsentiert werden können (z.B. Sequenzen). Darüber hinaus können den Einheiten Informationen bezüglich der Kostenstrukturen hinzugefügt werden, um die Erstellung der frühen Kalkulation zu präzisieren [ROS09]. So können den Komponenten direkt Kosten zugewiesen werden, es kann aber auch mittels der Relationen zwischen Merkmal- und Familienmodell auf die Kosten der Funktionen geschlossen werden. Dabei können sowohl durchschnittliche Beschaffungspreise, aber auch Abschätzungen bezüglich des Engineeringaufwands und den damit verbundenen monetären Aufwendungen berücksichtigt werden.

7.7. Freigabe, Speicherung und Wartung der wiederverwendbaren Einheiten

Nachdem die vorigen Abschnitte die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten, von der Anforderung über das funktionale Konzept und die technische Lösung bis hin zur Dokumentation skizzierten, ist es Gegenstand des vorliegenden Abschnitts, die Verwaltung der wiederverwendbaren Einheiten aufzuzeigen. Wie Abbildung 7-11 zu entnehmen ist, umfasst dies die Punkte Freigabe, Speicherung und Wartung der wiederverwendbaren Einheiten, die im nachfolgenden beschrieben werden.

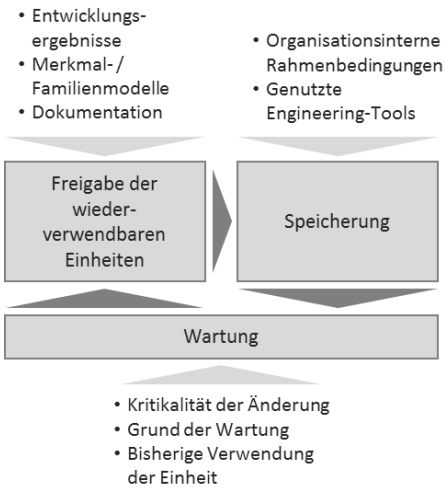

Abbildung 7-11: Freigabe, Speicherung und Wartung der wiederverwendbaren Einheiten

Ziel der Freigabe ist es, dass lediglich wiederverwendbare Einheiten, die eine definierte Qualität aufweisen, auch zur Wiederverwendung freigegeben werden. Diese Überprüfung muss von Vertretern aller beteiligten Fachdisziplinen vorgenommen werden, wobei diese nicht selbst an der Entwicklung der zu prüfenden Einheit beteiligt gewesen sein sollten. Im Rahmen dieser Überprüfung sind zunächst die zur Entwicklung herangezogenen Anforderungen erneut zu prüfen und zu analysieren. Nachfolgend muss analysiert werden, inwiefern die entwickelte wiederverwendbare Einheit diese Anforderungen erfüllt und ob die angefertigten Modelle und Dokumente die Einheit auch adäquat repräsentieren und somit die Auswahl und Konfiguration ermöglichen. Diese Prüfung wird erleichtert, wenn eine Nachvollziehbarkeit von den Anforderungen über die Funktionen bis hin zur Lösung gegeben ist. Es ist insbesondere auch die Konsistenz der verschiedenen Bestandteile, also beispielsweise der verwendeten Hardware und der geplanten Software, zu hinterfragen. Werden hierbei Mängel festgestellt, müssen Verbesserungsmaßnamen definiert und das bearbeitende Team mit der Überarbeitung beauftragt werden. Im Anschluss an die Überarbeitung ist der Freigabeprozess erneut zu durchlaufen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Speicherung von Engineering-Artefakten im Allgemeinen stark von den jeweilig genutzten Werkzeugen und Speichertechnologien der Engineering-Organisation abhängig ist, werden nachfolgend Ausprägungen möglicher Bibliotheken aufgezeigt.

Ein hinsichtlich der Handhabung wiederverwendbarer Einheiten als optimal anzusehender Ansatz sind Bibliotheken, die sämtliche Anteile der wiederverwendbaren Einheiten in einer Datenbank vereinen.[41] Diese Art der Bibliothek ermöglicht es, Beziehungen zwischen den verschiedenen Elementen innerhalb einer Einheit in geeigneter Form abzubilden und Inkonsistenzen, die aus einer dezentralen Datenhaltung resultieren können, zu vermeiden. Bestehende feingranulare wiederverwendbare Engineering-Objekte (vgl. Kapitel 6.4), welche in diesen Bibliotheken enthalten sind, können somit einfach genutzt werden, um zu wiederverwendbaren Einheiten kombiniert zu werden. Die Definition der umfassenderen, interdisziplinären wiederverwendbaren Einheiten innerhalb dieser Bibliotheken kann hierbei auf zweierlei Weise geschehen: Zum einen können die entwickelten Einheiten als Instanzen der Engineering-Objekte gespeichert werden und somit wiederum den Typ der wiederverwendbaren Einheiten darstellen. Alternativ ist es möglich, die wiederverwendbaren Einheiten ähnlich eines Musters abzulegen, das durch die Variabilitätsmodelle konfiguriert werden kann; die eigentliche Instanziierung der wiederverwendbaren Einheiten geschieht dann erst bei deren Verwendung im Rahmen des projektabhängigen Engineerings. Ein sehr weitreichend aufbereitetes akademisches Beispiel einer Bibliothek (bzw. „Domain Repository“ [MAG12, S. 66]), das Elemente für Prozess, Produkt und Ressourcen enthält, kann [MAG12] entnommen werden. Die dort vorgeschlagene Strukturierung inklusive einer „Domain Repository Engine“ [MAG12, S. 86FF.] ist jedoch in Bibliotheken gängiger Engineering-Werkzeuge nicht implementiert, sodass diesbezügliche Änderungen an den Werkzeugen nötig wären.

Steht kein integriertes Planungswerkzeug für die verschiedenen Gewerke zur Verfügung, so können grundsätzlich auch bestehende und gegebenenfalls gewerkspezifische Datenbanken verwendet werden. Diese Verteilung erschwert allerdings die Erstellung der Einheit im Allgemeinen und die Modellierung der Relationen zwischen den verschiedenen Bestandteilen im Besonderen. Die Modellierung dieser Relationen muss dann an alternativer Stelle vorgenommen werden. Dies kann realisiert werden, indem in den Variabilitätsmodellen Relationen abgebildet werden, die über die variabilitätsbezogenen Relationen hinausgehen, was jedoch nicht deren grundsätzlichem Zweck dieser Modelle entspricht und daher zu teils erheblichem Zusatzaufwand führen kann.

Unabhängig davon, in welcher Form die wiederverwendbaren Einheiten gespeichert werden, müssen diese gewartet und gegebenenfalls aktualisiert werden. Die Überarbeitung einer wiederverwendbaren Einheit kann nötig werden, wenn Bestandteile dieser technisch überholt wurden oder aber Planungsfehler identifiziert wurden. Diese Fehler müssen behoben werden, um zu verhindern, dass sich diese auch in zukünftige Projekte fortpflanzen. Hierbei ist jedoch ein situationsabhängiges Handeln erforderlich. Die Abschätzung dieser Situationen muss zwingend von einem interdisziplinären Team vorgenommen werden, das die möglichen Auswirkungen eines solchen Überarbeitungsgrundes abschätzen kann. Unabhängig von der identifizierten Situation ist die Einheit zu sperren und erst nach einer adäquaten Überarbeitung wieder freizugeben. Diese Iteration ist durch die Rückführung von der Wartung hin zur Freigabe in Abbildung 7-11 repräsentiert.

[41] Die beiden im Rahmen dieser Arbeit näher betrachteten Werkzeuge *COMOS* und *Engineering Base* ermöglichen dies für die Gewerke Verfahrenstechnik, Elektrotechnik und Automatisierungstechnik sowie in Teilen der Mechanik, erlauben jedoch keine Integration von Variabilitätsmodellen.

Situation 1: Die betroffene wiederverwendbare Einheit wurde noch nicht verwendet.
In diesem Fall kann die Einheit verhältnismäßig einfach überarbeitet werden. Die entsprechenden Überarbeitungen werden vorgenommen, mit den initialen, an die Einheit gestellten Anforderungen abgeglichen und mögliche Anpassungen an den Engineering-Objekten sowie den assoziierten Modellen und Anteilen der Dokumentation vorgenommen. Anschließend hat die Einheit den Freigabeprozess zu durchlaufen.

Situation 2: Die betroffene wiederverwendbare Einheit wurde bereits verwendet, die Überarbeitung ist aber als unkritisch anzusehen (z.B. Aktualisierung).
Ergibt die Abschätzung, dass die Überarbeitung als unkritisch anzusehen ist, es sich also beispielsweise nur um eine Aktualisierung auf den neuen Stand der Technik handelt, so sind mögliche Anlagenbetreiber, in deren Anlage diese Einheit zur Planung verwendet wurde, nicht zwingend zu informieren. Gegebenenfalls kann diese Information jedoch auf einer freiwilligen Basis weitergegeben und zur Akquise eines Wartungsauftrages genutzt werden.
In jedem Fall sind bei der Überarbeitung aber zwei Versionsstände der Einheit vorzuhalten. Die ursprünglich verwendete und eine neue, überarbeitete Version. Diese beiden Versionen können aufgrund der geringen Kritikalität der Überarbeitung durchaus koexistieren. Es ist jedoch für jede der Einheiten im Einzelnen zu prüfen, ob die Freigabe zur zukünftigen Wiederverwendung erteilt werden kann.

Situation 3: Die betroffene wiederverwendbare Einheit wurde bereits verwendet, die Überarbeitung ist jedoch als kritisch anzusehen (z.B. erheblicher Planungsfehler, Bekanntwerden defekter Bauteile etc.).
Sollte ein Planungsfehler oder die Verwendung eines fehlerhaften Gerätes identifiziert werden, der auf eine wiederverwendbare Einheit zurückzuführen ist, so muss überprüft werden, inwiefern dieser Fehler kritisch für den Betrieb der bereits geplanten und errichteten Anlagen ist. Ein solches Risiko kann mittels einer „Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)“ nach [WER12] systematisch ermittelt werden. Da diese Technik seit vielen Jahren bekannt und anerkannt ist, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen, sondern auf [WER12] verwiesen. Abhängig von der abgeschätzten Kritikalität müssen die entsprechenden Anlagenbetreiber informiert werden.
Die wiederverwendbare Einheit ist für die weitere Verwendung zu sperren und zu überarbeiten. Im Sinne der Nachverfolgbarkeit ist die ursprüngliche Einheit aber dennoch als Planungsstand vorzuhalten, jedoch ohne Freigabe zur Verwendung und mit einem Hinweis hinsichtlich des Fehlers. Die überarbeitete Version ist wiederum freizugeben und kann anschließend erneut zur Wiederverwendung herangezogen werden.

Unabhängig davon, welche der Situationen zutreffend ist, so stellt diese Überarbeitung eine Herausforderung dar, die mit einem erneuten Durchlauf der betroffenen Entwicklungsschritte (vgl. Abbildung 7-1) verbunden sein kann. Folglich müssen die beteiligten Gewerke auch bei der Überarbeitung involviert sein.

8. Projektabhängige Konzeptbausteine des Wiederverwendungskonzeptes

Das Engineering automatisierter Anlagen weist eine Vielzahl verschiedener Ausprägungen und damit einhergehender Vorgehen auf. Abbildung 2-1 zeigt hierbei nur eine Auswahl dokumentierter Vorgehensmodelle, während die jeweils organisationsspezifischen Ausprägungen in der Regel wiederum von den beschriebenen, meist idealisierten Vorgehensmodellen abweichen. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2 angeführten Vorgehensmodelle wurde in [BLO15A%] und [BLO15B%] ein Engineering-Workflow erarbeitet, welcher die zentralen Tätigkeiten umfasst und somit als typisch angesehen werden kann. Diese Arbeit zeigt jedoch sehr deutlich, dass die domänen- und organisationsspezifischen Anpassungen des Vorgehens im Engineering weitreichend sind. Darum wird nachfolgend davon abgesehen, ein weiteres spezifisches Vorgehensmodell für das Engineering automatisierter Anlagen zu definieren. Anstelle dessen werden die in Abbildung 8-1 dargestellten, wiederverwendungsspezifischen Konzeptbausteine beschrieben, welche die Nutzung der wiederverwendbaren Einheiten entlang der planungsbezogenen Tätigkeiten in verschiedenen, existierenden Vorgehensmodellen ermöglichen.

Klärung der Kunden-anforderungen	▪ Aufbereitung der Kundenanforderungen ▪ Abgleich hinsichtlich Überdeckung mit bestehenden wiederverwendbaren Einheiten	***PR***
Funktionaler Entwurf	▪ Entwurf Funktionen und Funktionsstruktur ▪ Verfahrensentwicklung ▪ Funktionale Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten	***PR***
Entwurf der Lösung	▪ Entwicklung der technischen Lösung ▪ Lösungsorientierte Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten	***LR***
Konsistenzprüfung	▪ Prüfung der Konsistenz der Konfiguration ▪ Prüfung der Konsistenz der Gesamtlösung	***PR / LR***
Unterstützung der Angebotserstellung	▪ Unterstützung bei Abschätzung der Durchführbarkeit ▪ Präzisierung der frühen Kalkulation	***PR / N / LR***

***PR**: Problemraum; **LR**: Lösungsraum, **N**: Neutrale Tätigkeit*

Abbildung 8-1: Projektabhängige Konzeptbausteine des Wiederverwendungskonzeptes

In Abbildung 8-2 wird darüber hinaus eine qualitative Zuordnung der Konzeptbausteine vorgenommen, die es einzuschätzen erlaubt, welche Bausteine in welchen typischen Engineering-Phasen nach [VDI/VDE 3695-1] angewendet werden können.[42] So wird es möglich, die Nutzung der Einheiten unabhängig davon zu beschreiben, wie das spezifische Vorgehen oder auch die Organisationsstruktur definiert wird. Die Konzeptbausteine sind derart definiert, dass sie eine Nutzung der wiederverwendbaren Einheiten in allen relevanten Tätigkeiten des Engineerings unterstützen sowie die Kombination der Einheiten mit neu entwickelten Inhalten ermöglichen, was Anforderung M-7 adressiert.

[42] Abbildung 8-2 zeigt, dass die Realisierung und Inbetriebnahme nicht im Fokus dieser Arbeit liegen, da die modulare Planung automatisierter Anlagen und nicht modulare Anlagen thematisiert werden. Im Forschungsfeld der modularen Anlagen kommt insbesondere auch der Montage und Rekonfiguration der modular assemblierten Anlage eine übergeordnete Bedeutung zu.

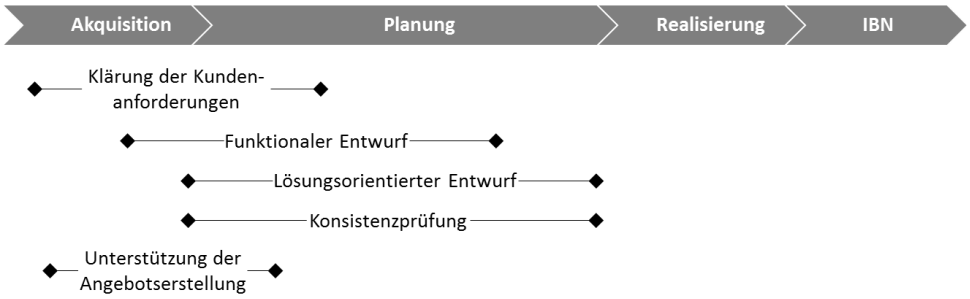

Abbildung 8-2: Anwendbarkeit der Konzeptbausteine entlang des Vorgehensmodells nach [VDI/VDE 3695-1]

8.1. Klärung und Aufbereitung der (Kunden-)Anforderungen

Wie in Kapitel 2.2 geschildert, werden Aufträge für das Engineering automatisierter Anlagen meist in Form eines Bieterverfahrens oder entsprechender Ausschreibungen vergeben. Diese Ausschreibungsunterlagen beinhalten nach [BIHO09] neben einem Grund- oder Verfahrensfließschema in der Regel auch eine textuelle Spezifikation der Anlage bzw. des zu realisierenden Verfahrens.[43] Daraus kann aber nicht geschlossen werden, dass diese Unterlagen auch eindeutige und in geeigneter Form aufbereitete Anforderungen, wie es in [VDI/VDE 3694] als Lastenheft beschrieben wird, umfassen. Um eine Anlage unter Verwendung der wiederverwendbaren Einheiten planen zu können, bedarf es einer Aufbereitung der Anforderungen. Hierzu ist es nötig, die Ausschreibungsunterlagen zu analysieren, strukturierte Anforderungen abzuleiten und in geeigneter Form zu dokumentieren. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 8-3 dargestellt und deckt sich teilweise mit den Schritten des Anforderungsmanagements, wie es für die Produktentwicklung in [KGW14] beschrieben wird.

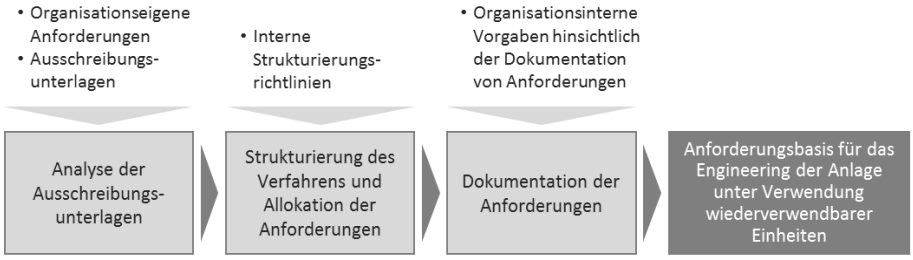

Abbildung 8-3: Klärung und Aufbereitung der Kundenanforderungen

Die Analyse der Ausschreibungsunterlagen hat den Zweck, die Wünsche des Kunden zu extrahieren und in handhabbarer Form bereitzustellen. Hierbei sollte zwischen den Anforderungskategorien, wie sie in Kapitel 7.1 definiert wurden, unterschieden werden. Es ist anzumerken, dass die organisationseigenen Anforderungen nicht der Ausschreibung, sondern den internen Vorgaben zu entnehmen sind. Neben der Extraktion und Klassifikation der Anforderungen an die Anlage ist es darüber hinaus unerlässlich, auch die Beschreibung des geforderten Verfahrens zu analysieren. Diese Beschreibung kann von einer Spezifikation der Edukte und Produkte bis hin zu einer detaillierten Beschreibung des Verfahrens mitsamt der Sequenzen, Abläufe und Zwischenprodukte reichen und muss in geeigneter Form dokumentiert werden. Auch dafür eignet sich die Formalisierte Prozessbeschreibung.

[43] Es wird davon ausgegangen, dass die Ausschreibung von einem Auftraggeber stammt. Sollte diese bereits von der Engineering-Organisation selbst erstellt werden, ermöglicht dies eine Berücksichtigung der Wiederverwendung schon zu diesem sehr frühen Zeitpunkt und ermöglicht eine Steigerung des mit wiederverwendbaren Artefakten zu realisierenden Anteils der Anlage.

Die alleinige Aufbereitung der Anforderungen für die Anlage genügt jedoch nicht, um geeignete wiederverwendbare Einheiten zu identifizieren. Darum müssen im Nachgang die relevanten Anforderungen den entsprechenden Verfahrensabschnitten zugewiesen werden.[44] Diese Allokation wird sowohl zu Anforderungen führen, die lediglich einem Verfahrensabschnitt zugewiesen werden können, als auch zu Anforderungen, die Gültigkeit für mehrere Verfahrensabschnitte besitzen.

Die nachfolgende Dokumentation der Anforderungen kann, wenn nicht bereits entsprechend vorliegend, nach [VDI/VDE 3694] vorgenommen werden, muss aber in jedem Fall den organisationsinternen Vorgaben entsprechen. Diese Art der Dokumentation von Anforderungen ist auch im Bereich der Produktentwicklung gängig [ENG06, S. 66FF.; KGW14, S. 112]. Eine modellbasierte Dokumentation der Anforderungen vereinfacht die nachfolgende werkzeugtechnische Verarbeitung und die Nachvollziehbarkeit [PORU11], ist jedoch nicht Voraussetzung für die Durchführung des beschriebenen Schrittes.

Die strukturierte Anforderungsbasis stellt eine Grundlage dafür dar, in den nachfolgenden Schritten geeignete wiederverwendbare Einheiten zu identifizieren, zu konfigurieren und zu einer Lösung zu integrieren. Aufgrund des problemorientierten Charakters der Anforderungsaufbereitung ist diese den Tätigkeiten des Problemraums zuzuschreiben.

8.2. Funktionaler Entwurf und funktionale Konfiguration der Einheiten

Der funktionale Entwurf kommt der Entwicklung des Verfahrens gleich. Es ist der Inhalt dieses Schrittes, die vorliegenden Anforderungen und Spezifikationen in ein Verfahren zu überführen, bzw. die aus vorhergehenden Schritten vorliegenden Beschreibungen des Verfahrens dahingehend zu detaillieren, dass basierend darauf die technische Ausgestaltung der Anlage vorgenommen werden kann. Diese Detaillierung geschieht entsprechend des im Engineering üblichen schrittweisen Prozesses in mindestens zwei Stufen, die in Grob- und Feinplanung differenziert werden. Im Rahmen dessen wird die Auswahl und Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten vorgenommen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 8-4 dargestellt.

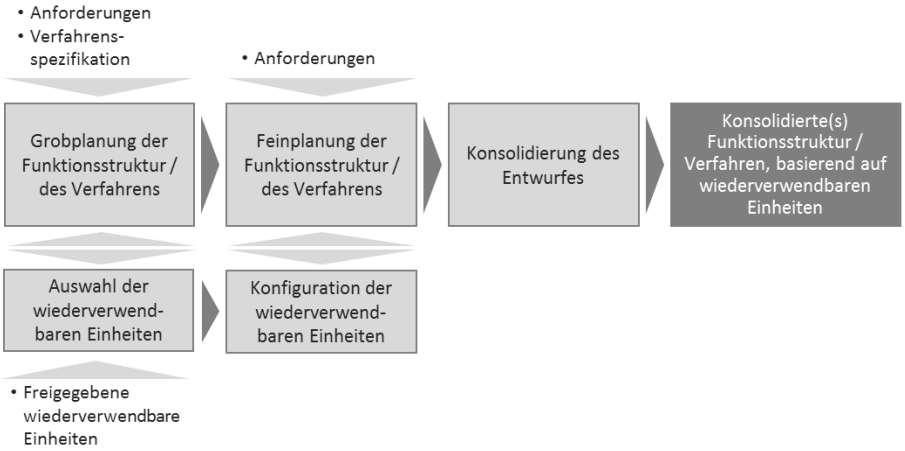

Abbildung 8-4: Funktionaler Entwurf und Konfiguration

[44] Es wird in Konsistenz zu den Beschreibungen in Kapitel 7.3 nachfolgend davon ausgegangen, dass organisationsinterne Vorgaben dies definieren. Jede andere Möglichkeit der Dekomposition eines Verfahrens ist aber ebenso anwendbar.

Abhängig davon, in welcher Detaillierung das Verfahren beschrieben ist, ist die Grobplanung des Verfahrens zu gestalten. Im Nachfolgenden wird davon ausgegangen, dass maximal ein Grundfließschema und eine textuelle Spezifikation der Abläufe vorliegen. Sollten bereits weiterreichende Dokumente verfügbar sein, können einige der nachfolgenden Schritte übersprungen werden. Liegt noch kein Grundfließschema und damit noch kein Entwurf des Verfahrens vor, so muss dieses als Grundlage des vorliegenden Schrittes entwickelt werden. Im Rahmen dessen wird typischer Weise die Dekomposition des Verfahrens in Verfahrensabschnitte vorgenommen. Darum ist es bereits zu diesem frühen Zeitpunkt sinnvoll, die verfügbaren wiederverwendbaren Einheiten mit einzubeziehen: Die Summe der wiederverwendbaren Einheiten umschreibt einen Teil des Lösungsraumes, der effizienter realisiert werden kann als dies bei einer Neuentwicklung der Fall wäre, und muss darum auch bei den frühen, problemorientierten Arbeiten berücksichtigt werden. Als Ergebnis dieser Entwicklung steht ein Grundfließschema bzw. ein Entwurf des Verfahrens, das auch durch *Prozessoperatoren* und *Produkte* mittels der Formalisierten Prozessbeschreibung modelliert werden kann. Eine Assoziation zu *Technischen Ressourcen* ist zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht zielführend und erfolgt erst im Rahmen des technischen Entwurfes (vgl. Kapitel 8.3).

Sollten nicht bereits im Rahmen der Verfahrensentwicklung verfügbare wiederverwendbare Einheiten selektiert worden sein, so muss diese Selektion auf Basis der vorliegenden Informationen vorgenommen werden. Die Auswahl wird anhand eines Abgleiches der Anforderungen und der von den Einheiten zugesicherten Parametern und Funktionen vorgenommen. Aufgrund der Auswirkungen auf die nachfolgenden Fachdisziplinen wird das aber nicht alleinig durch die Verfahrenstechnik, sondern unter Beteiligung der anderen involvierten Gewerke durchgeführt. Hierbei wird die Interdisziplinarität ermöglicht, indem nicht nur verfahrensspezifische Aspekte abgefragt, sondern auch Funktionen herangezogen werden, die mehr als ein Gewerk abdecken. Der Abgleich sollte werkzeugbasiert unterstützt sein. Hierbei muss beachtet werden, dass die Schnittstellenspezifikationen insbesondere hinsichtlich der Funktionen entlang des Hauptprozessflusses konsistent zu halten sind. Zu beachten sind dabei primär Charakteristika des Verfahrens, wie beispielsweise die Ein- und Ausgangsgrößen. Können einzelne Verfahrensabschnitte nicht mittels wiederverwendbarer Einheiten realisiert werden, so müssen diese Anteile der Anlage parallel neu entwickelt werden. Wie bereits in Kapitel 5.4 diskutiert, reduziert die partielle Neuentwicklung zwar die Vorteile der Wiederverwendung hinsichtlich der Beschleunigung des Vorgehens, ermöglicht aber eine Umsetzung des Konzeptes, ohne Einheiten für alle möglichen Funktionen einer Anlage bereitstellen zu müssen.

Die ausgewählten Einheiten müssen entsprechend der Anforderungen funktional, das heißt basierend auf dem Merkmalmodell, konfiguriert werden (vgl. Abbildung 6-4). Aufgrund der nicht disziplinspezifischen Gestaltung der Merkmalmodelle sind davon alle beteiligten Disziplinen betroffen. Die Konfiguration kann schrittweise vorgenommen werden und schränkt den Problemraum sukzessive ein. Diese Anpassung der wiederverwendbaren Einheit an den jeweiligen Kontext entspricht einer zunehmenden Detaillierung des Konzeptes.[45] Die Modellierung von Relationen zwischen Merkmal- und Familienmodell, also zwischen Problem- und Lösungsraum, führt jedoch dazu, dass diese funktionsorientierte Konfiguration den möglichen Lösungsraum einschränkt und folglich im

[45] Im Bereich des methodischen Konstruierens/Entwickelns würde man hier von einer prinzipiellen Lösung sprechen [VDI 2221, S. 9]. Aufgrund des immer noch bestehenden Problem-Charakters und der folglich Zugehörigkeit zum Problemraum wird von dieser Benennung an dieser Stelle Abstand genommen.

nachfolgenden technischen Entwurf (siehe Kapitel 8.3) weniger Design-Entscheidungen getroffen werden können und müssen (vgl. Abbildung 5-1).

Nachdem die Konfiguration aus funktionalen Gesichtspunkten durchgeführt wurde, ist der erarbeitete und detaillierte funktionale Entwurf der Anlage und somit des Verfahrens zu überprüfen und zu konsolidieren. Diese Konsolidierung kann durch die Techniken zur Konsistenzprüfung unterstützt werden, die in Kapitel 8.4 beschrieben und daher an dieser Stelle nicht explizit thematisiert werden. Ziel dieses Schrittes ist es, einen funktionalen Entwurf sicherzustellen, der aus Sicht aller involvierten Gewerke als umfassend und konsistent angesehen wird. Am Beispiel von Verfahrenstechnik und Automatisierungstechnik bedeutet dies, dass Verfahrensabschnitte, Grundoperationen, PCE-Aufgaben etc. definiert sein müssen. Dieser Entwurf kann in Form eines Verfahrensfließschema oder der Formalisierten Prozessbeschreibung dokumentiert werden. Bei Verwendung der Formalisierten Prozessbeschreibung ist jedoch zu diesem Zeitpunkt noch kein Modell unter Nutzung aller Elemente zu erwarten. Es besteht zu diesem Entwicklungsstadium lediglich aus *Prozessoperatoren* und *Produkten* sowie den wichtigen *Energien* und *Informationen*.

8.3. Technischer Entwurf

Basierend auf den Ergebnissen des funktionalen Entwurfes, gilt es im nachfolgenden Schritt nun, diesen unter Nutzung der bereits vorkonfigurierten wiederverwendbaren Einheiten in eine technische Lösung zu überführen. Auch hier wird ein zweistufiger, aber grundsätzlich anpassbarer Detaillierungsprozess vorgesehen. Dieser Prozess ist in Abbildung 8-5 ersichtlich und basiert, neben den Anforderungen, auf den im Rahmen des funktionalen Entwurfes selektierten wiederverwendbaren Einheiten. Sollten die Dokumente, die den funktionalen Entwurf bzw. das Verfahren beschreiben, nicht mittels der in Kapitel 8.2 beschrieben Schritte angefertigt worden sein, so sind die wiederverwendbaren Einheiten anhand der Verfahrensabschnitte zu selektieren und die funktionale Konfiguration somit nachzuholen.

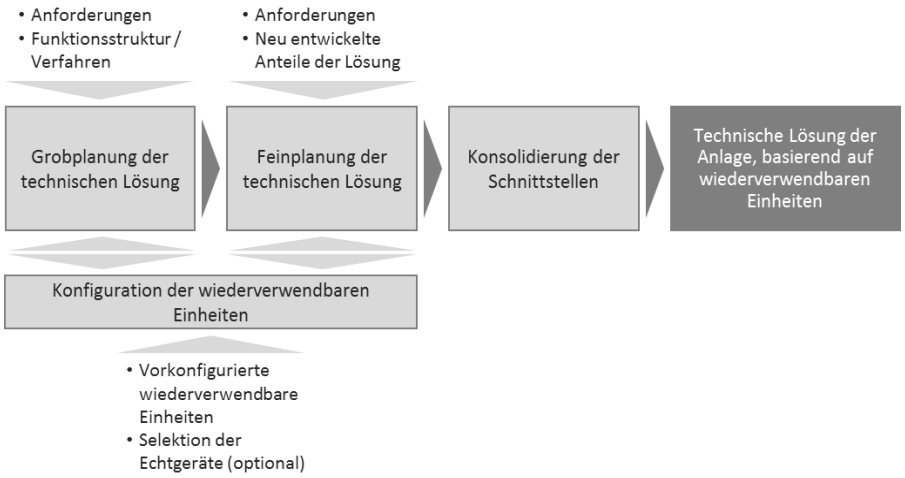

Abbildung 8-5: Technischer Entwurf der Anlage

Wie die Betrachtung in Kapitel 6.3 zeigt, wird die Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten basierend auf den Merkmalmodellen, bzw. den Variationspunkten des Problemraumes, in der Regel nicht genügen, um sämtliche Variabilität des Lösungsraumes zu binden. Darum werden die Einheiten in diesem Schritt basierend auf den Variabilitätsmodellen des Lösungsraumes abschließend konfiguriert. Ziel dessen ist es, die technische Lösung zu definieren, also Gerätetypen, Messprinzipien,

Bauformen von Apparaten oder aber auch zu verwendende Software-Bausteine festzulegen. Den Elementen hinterlegte Dokumente oder Dokumentfragmente (z.B. Stellenfunktionspläne) werden ebenfalls entsprechend selektiert. Hierbei steht primär die Rolle bzw. der Typ des Gerätes im Mittelpunkt, idealer Weise nicht aber das verwendete Echtgerät. Auch hier gilt jedoch, wie auch in Kapitel 6.3.2 diskutiert, dass es möglich ist, die Selektion der zu verwendenden Echtgeräte in die Konfiguration zu integrieren, wenn es den Anforderungen der Engineering-Organisation entspricht. Die Berücksichtigung von Echtgeräten führt in Folge aber dazu, dass der Umfang der Familienmodelle ansteigt, da jedem vorgesehenen Gerätetyp mehrere Echtgeräte verschiedener Hersteller zugeordnet werden können.

Die alleinige Konfiguration der verschiedenen Einheiten führt jedoch noch nicht dazu, dass eine konsistente Lösung vorliegt, die im Rahmen der nachfolgenden Schritte des Engineering realisiert werden kann. Daher müssen die von den konfigurierten Einheiten repräsentierten partiellen Lösungen integriert werden. Diese Integration erfordert insbesondere eine Überarbeitung der Schnittstellen zwischen den Einheiten, welche die zu realisierenden Rohrleitungen ebenso umfassen, wie auch mögliche elektrische und elektronische Leitungen, die der Energie- oder Informationsübertragung dienen, oder aber die Verknüpfung von Software-Bausteinen. Folglich betrifft dies Informationen, die in Form von R&I-Fließschemata oder aber auch in Stromlauf- und Stellenfunktionsplänen dokumentiert sind. Wird die Formalisierte Prozessbeschreibung verwendet, so ist es möglich, die Schnittstellen an den jeweiligen *Systemgrenzen* der wiederverwendbaren Einheiten zu prüfen und entsprechend der funktionalen Vorgaben mit den entsprechenden, umgebenden Elementen der Lösung zu verknüpfen (z.B. den Übergang von „P_Zwischenprodukt 2“ an den *Systemgrenzen* der Modellierung in Abbildung 6-2 zu definieren). Dieser Schritt ist unabhängig von der gewählten Modellierung durchzuführen. Dieselbe Anpassung ist auch dort vorzunehmen, wo Lösungsbestandteile, die mittels wiederverwendbarer Einheiten geplant werden, mit Anteilen zu verknüpfen sind, die neu entwickelt werden. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass es zu möglichen Nacharbeiten an der Schnittstelle kommen kann.

Im Zuge der Konsolidierung können auch Anpassungen vorgenommen werden, um beispielsweise mögliche aus der Wiederverwendung resultierende und nicht benötigte Redundanzen aufzulösen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn mehrere Instanzen der wiederverwendbaren Einheit „Medium Speichern“ genutzt werden, um die geforderten Anforderungen hinsichtlich der Speichermenge zu erreichen und jeder dieser Einheiten die Funktion „Hypochlorit dosieren“ zugewiesen wurde, obwohl die Dosiereinrichtung gegebenenfalls mehrere Behälter bedienen kann. Konsolidierungen dieser Art sind im Rahmen dieses Schrittes abschließend durchzuführen, um die Qualität der Lösung zu optimieren. Dieser Schritt ist maßgeblich von der angewendeten Werkzeugumgebung sowie der Implementierung der Konsistenzprüfungstechniken (vgl. Kapitel 8.4) abhängig, da ein Engineering-Werkzeug, dem eine interdisziplinäre Datenbank von Objekten zu Grunde liegt, hier weitaus größere Möglichkeiten der Unterstützung bietet, als dies bei einer heterogenen und disziplinspezifischen Werkzeug-Landschaft der Fall ist. Unabhängig davon liegt als Ergebnis dieses Schrittes eine geplante technische Lösung der Anlage vor, welche für die nachfolgenden Phasen des Engineerings freigegeben und herangezogen werden kann. Hierbei ist hinsichtlich der Wiederverwendung nicht entscheidend, ob diese in Form von rechnergestützt zu verarbeitenden Modellen oder papiergebundener Dokumente vorliegt.

8.4. Konsistenzprüfung konfigurierter wiederverwendbarer Einheiten

Die Verwendung wiederverwendbarer Einheiten im Engineering führt dazu, dass größere Einheiten integriert und konsolidiert werden müssen, als dies beim Engineering der Fall ist, wenn keine Wiederverwendung betrieben wird oder lediglich feingranulare Objekte wiederverwendet werden. Um mögliche Fehler bei dieser Integration zu detektieren, gilt es, die Konsistenz innerhalb wie auch zwischen den Einheiten zu prüfen. Dieses zweistufige Vorgehen ist in Abbildung 8-6 dargestellt.

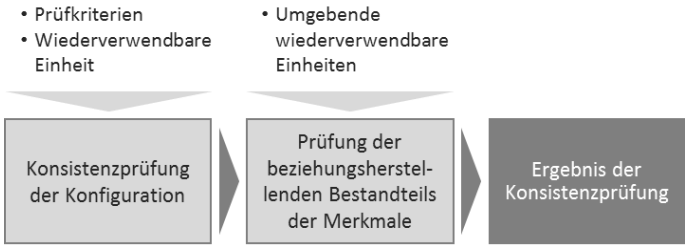

Abbildung 8-6: Konsistenzprüfung wiederverwendbarer Einheiten

Die Konsistenz der Konfiguration kann mittels einer Überprüfung der Prüfkriterien *P-6* und *P-7* sichergestellt werden.[46] Da im Rahmen dieses Wiederverwendungskonzeptes nicht mit partiell gebundenen Konfigurationen gearbeitet wird, stellt diese Prüfung sicher, dass zum einen die Konsistenz (*P-2*, vgl. Tabelle 7-1) gewährleistet wie auch alle Variabilität gebunden ist [BSR10].

Tabelle 8-1: Exemplarische Konsistenzprüfungskriterien für die Konfiguration wiederverwendbarer Einheiten

	Prüfkriterium	Prüfung von
P-6	*Die Variabilität des Merkmalmodells ist vollständig gebunden.*	Merkmalmodell
P-7	*Die Variabilität des Familienmodells ist vollständig gebunden.*	Familienmodell

Neben diesen variabilitätsbezogenen Prüfungen können aber auch die beziehungsherstellenden Bestandteile der Merkmale (vgl. Kapitel 7.3) genutzt werden, um die Konsistenz zwischen den Einheiten sicherzustellen. Bei einer manuellen Prüfung sind so alle Elemente, die ein Merkmal aufweisen, das die zwingende Verknüpfung mit einem anderen Objekt fordert, hinsichtlich deren Verknüpfung zu prüfen. Beispiel hierfür kann ein zwingend erforderlicher Soll-Wert eines Software-Bausteines oder aber auch eine Pumpe sein, deren Druckseite mit einer Rohrleitung verbunden sein muss.

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht es, die Konsistenz der aus wiederverwendbaren Einheiten erstellten Lösung bestmöglich sicherzustellen. Werden im Rahmen dieser Prüfung Inkonsistenzen entdeckt, müssen diese behoben und an die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten zurückgemeldet werden, wenn diese aus der wiederverwendbaren Einheit resultieren.

[46] Die Sicherstellung der Konsistenz einer Konfiguration mittels der Prüfkriterien *P-6* und *P-7* ist nur dann gewährleistet, wenn während der Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten die Prüfkriterien *P-1* bis *P-5* erfolgreich geprüft wurden. Diese, auf die Variabilität bezogenen, Prüfkriterien verhindern keine inhaltlich falschen Verknüpfungen. Diesbezügliche Ansätze der inhaltlichen Prüfung können beispielsweise [FLK+14A] entnommen werden.

8.5. Unterstützung der Angebotserstellung

Ein Schritt, der nicht im unmittelbaren Fokus des vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes liegt, jedoch als durchaus sinnvoll und lohnenswert zu erachten ist, stellt eine mögliche Unterstützung des Vertriebes bzw. der Auftragsakquise durch Wiederverwendung dar. Nach der Analyse der Ausschreibungsunterlagen kann eine umfassend aufgearbeitete Basis wiederverwendbarer Einheiten die Erstellung des in Vorleistung zu erbringenden Angebotes beschleunigen. Ein Aspekt, der auch von [GEI14@] gestützt wird. Darüber hinaus kann die umfassendere Datenbasis für die Präzisierung der frühen Kalkulation der Kosten der Anlage genutzt werden, um das Risiko eines defizitären Projektes aufgrund falscher kalkulatorischer Abschätzungen zu reduzieren [GEI14@].

[BIHO09] unterteilt das Angebot in einen allgemeinen, einen kommerziellen und einen technischen Teil [BIHO09, S. 204FF.], wobei der allgemeine Teil einen subsummierenden Charakter aufweist. Der kommerzielle Teil hingegen umfasst eine Vielzahl kaufmännischer Daten, die in ausführlicher Form [BIHO09, S. 207] entnommen werden können. Bei der Bestimmung dieser Daten kann die Nutzung wiederverwendbarer Einheiten primär an zwei Punkten ansetzen: Der Kalkulation der Kosten sowie der Termine und Fristen. Basierend auf der Auswahl und gegebenenfalls partiellen Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten können daraus effizientere Kostenabschätzungen vorgenommen werden, um schon frühzeitig eine höhere Kalkulationsgenauigkeit zu erreichen [AACE 18R-97; BLO15B%]. Die Erstellung der Datenbasis für die Kalkulation wird durch Wiederverwendung vereinfacht. Zudem kann die Kalkulation früher vorgenommen werden, das heißt bestenfalls bereits bei der Angebotserstellung und nicht erst während der Projektlaufzeit. Der Zusammenhang zwischen der Präzision der Kalkulation und den verbleibenden Freiheitsgraden wiederverwendbarer Artefakte wird in Kapitel 4.1.1 diskutiert. Diese Kausalität besitzt auch hier Gültigkeit. Darüber hinaus bewirkt die Abschätzung des Anteils neu zu entwickelnder Teile der Lösung, dass die Bewertung des Projektrisikos präzisiert wird. Selbiges gilt für die Abschätzung der Entwicklungszeiträume. Die detailliertere Kenntnis bezüglich neu zu entwickelnder Anteile und insbesondere auch zu verwendender Geräte führt dazu, dass Liefertermine von Schlüsselkomponenten schon früh abgestimmt und bei der Planung berücksichtigt werden können [BLO15B%]. Da diese Schlüsselkomponenten meist auf dem kritischen Pfad des Engineerings liegen, ermöglicht deren frühzeitige Berücksichtigung grundsätzlich eine Reduktion der Durchführungszeit des Engineerings sowie eine Reduktion des Risikos von Fehlplanungen und möglicher damit einhergehender Vertragsstrafen.

Der technische Teil des Angebotes dient der Beschreibung der zu realisierenden Anlage in konzeptioneller Form und kann somit als Übergang zwischen Problem- und Lösungsraum angesehen werden. Die Beschreibung des Verfahrens wird mit Hilfe der beschriebenen Fließschemata (vgl. Kapitel 2.2) sowie der damit assoziierten Artefakte (z.B. Stellenfunktionspläne etc.) oder auch der Formalisierten Prozessbeschreibung vorgenommen. Die Erstellung dieser Artefakte wird durch die Auswahl und der möglichst weitreichenden Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten beschleunigt und kann als Vorstufe zum Pflichtenheft angesehen werden [BIHO09, S. 208].

9. Werkzeugtechnische Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes

Die ausschließlich konzeptionelle Beschreibung des Wiederverwendungskonzeptes der vorigen Kapitel wird im Rahmen dieses Kapitels hinsichtlich werkzeugspezifischer Aspekte ergänzt. Ziel dieses Kapitels ist es, anhand möglicher Umsetzungsszenarien aufzuzeigen, dass eine Integration des Wiederverwendungskonzeptes in gängige Engineering-Werkzeuge möglich ist (vgl. Anforderung W-1). Eine Werkzeugumsetzung ist die Voraussetzung für die Integration des Konzeptes in die Abläufe einer Engineering-Organisation. Nachfolgend werden die alternativen Engineering-Werkzeuge *COMOS* und *Engineering Base* herangezogen, um anhand dieser die Umsetzbarkeit des Konzeptes nachzuweisen. Beide Werkzeuge sind konsequent objektorientiert und erlauben die Handhabung von Daten verschiedener Gewerke in einer Datenbank. Aufgrund des großen Stellenwertes, welchen die Variabilität für das vorgestellte Wiederverwendungskonzept einnimmt, werden in Umsetzungsszenario I die jeweiligen Engineering-Werkzeuge durch das dezidierte Variantenmanagement-Werkzeug *pure::variants* ergänzt. Gemäß der Klassifikation der [VDI/VDE 3695-4] kann *pure::variants* als „Spezifisches Werkzeug“ angesehen werden, das die durchgängigen Engineering-Werkzeuge hinsichtlich der Belange des Variantenmanagements ergänzt. Ein solches, spezifisches Werkzeug ist nötig, da derzeit die explizite Berücksichtigung von Variabilität nicht im Fokus klassischer Engineering-Werkzeuge der Anlagenplanung steht.

Die Verwendung eines zusätzlichen Werkzeuges bringt jedoch auch Nachteile mit sich, wie beispielsweise die Notwendigkeit einer weiteren Schnittstelle sowie das Erlernen eines zusätzlichen Werkzeugs seitens der involvierten Akteure. Auf Grund dessen wird in Umsetzungsszenario II aufgezeigt, wie eine Umsetzung des Konzeptes auch ohne ein zusätzliches Variantenmanagement-Werkzeug möglich wäre und welche Vor- und Nachteile damit verbunden sind. Das Kapitel schließt mit einer kritischen Zusammenfassung der Werkzeugumsetzung.

9.1. Verwendete Software-Werkzeuge

Nachfolgend werden die verwendeten Software-Werkzeuge beschrieben sowie in Kürze deren Anwendungsbereich, Zweck, Aufbau und zentrale Charakteristika spezifiziert, welche für die Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes von besonderer Relevanz sind.

***COMOS* (Siemens AG)**

Das modulare Engineering-Werkzeug *COMOS* der Siemens AG soll den gesamten Lebenszyklus einer automatisierten Anlage informationstechnisch abdecken. Folglich finden sich Funktionalitäten, die nicht nur eine Anwendung in der Planungsphase, sondern auch in der Phase des Betriebs ermöglichen. Mittels verschiedener Module kann das Werkzeug an die verfahrenstechnische, elektrotechnische und automatisierungstechnische Planung, wie auch die Unterstützung des Betriebes sowie der Instandhaltung angepasst werden. Aufgrund der Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf das Engineering der Anlage im engeren Sinne (vgl. Kapitel 2.1) werden lediglich die Software-Module betrachtet, welche auf die Planung der Anlage ausgelegt sind. Der Grundgedanke dabei ist die zentrale, objektorientierte Datenhaltung aller Fachdisziplinen in einer zentralen Datenbank. Diese Datenbank umfasst sogenannte Stammprojekte, in denen Stammdaten, Bibliotheken und Templates (vgl. Kapitel 3.2) vorgehalten werden können, und sogenannte Planungsprojekte, in denen die Planung einer konkreten, kundenspezifischen Anlage vorgenommen wird [SIE15B@]. Die Strukturierung der Sichten

innerhalb aller Projekte wird standardmäßig anhand [DIN 81346-1] vorgenommen. Die Daten innerhalb der Stammprojekte sind beispielsweise anhand der [DIN EN ISO 10628] strukturiert.

Die zentrale Datenhaltung ermöglicht es, dass alle Software-Module innerhalb von *COMOS* auf einem konsistenten Datenstand arbeiten.[47] Für die nachfolgend vorgestellte Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes sind zwei Schnittstellen von besonderer Relevanz: Zum einen das *Automation-Interface* [SIE15A@], das den Im- und Export von Daten zu dem Prozessleitsystem *PCS7* ermöglicht, und zum anderen der *Generische Excel-Import*, welcher die Handhabung großer Datenmengen erlaubt. Das *Automation-Interface* ermöglicht es, die Planungsergebnisse nach abgeschlossener verfahrenstechnischer, elektrotechnischer und automatisierungstechnischer Planung[48] an *PCS7* zu übergeben, um die Projektierung des Leitsystems effizienter zu gestalten. Dieses Zusammenwirken erfordert jedoch, dass die in *PCS7* zu verwendenden Bibliotheken sowie deren Softwarebausteine (sogenannte „Control Module Types“, kurz „CMTs“) vor der Planung in *COMOS* importiert werden müssen, um nachträgliche Inkonsistenzen zu vermeiden. Der Austausch mit dem Prozessleitsystem (kurz: PLS) kann bidirektional beschritten werden, um auch nachfolgende Änderungen in *COMOS* abbilden zu können. Der *Generische Excel-Import* ermöglicht es, ein Import-Profil zu erstellen, das die Auswertung von CSV-Dateien definiert, um anhand dieser die Instanziierung von Objekten aus dem Stammprojekt in das entsprechende Planungsprojekt vorzunehmen. Der originäre Zweck dieser Schnittstelle ist der Import großer Datenmengen, welche beispielsweise als Signallisten in Form einer CSV-Datei vorliegen. So erlaubt der *Generische Excel-Import* die automatische Erstellung, Parametrierung und Verknüpfung von Objekten im Planungsprojekt.

***Engineering Base* (Aucotec AG)**

Das Werkzeug *Engineering Base* der Aucotec AG ist ein objektorientiertes Engineering-Werkzeug, welches der funktionsorientierten Planung automatisierter Anlagen verschiedenster Domänen dient (z.B. diskrete und kontinuierliche Fertigung, Energietechnik etc.). Modelle und Dokumente werden in *Microsoft Visio* erstellt und automatisch illustriert, was eine Manipulation der Daten in grafisch bekannter Art und Weise erlaubt. Für die Prozessindustrie ermöglicht das Software-Werkzeug die verfahrenstechnische und elektrotechnische Planung der Anlage. Der Entwickler wird dabei mittels einer integrierten Workflow-Unterstützung durch einen definierten Planungsprozess geleitet, der sich aus Engineering-Aufgaben sowie den zu erarbeitenden Engineering-Objekten zusammensetzt. Auch dieses Engineering-Werkzeug ermöglicht die Wiederverwendung feingranularer Einheiten, die in Form von integrierbaren Bibliotheken vorgehalten werden. Darüber hinaus ist es möglich, auch die Definition größerer Einheiten als Templates/Typicals (vgl. Kapitel 3.2.3) vorzunehmen, jedoch wird hierbei keine konzeptionelle Unterstützung angeboten. Diese Templates werden in gesonderten Projekten gesammelt und dort zur Verwendung vorgehalten. Die Modellierung von Relationen zwischen Elementen dieser Templates ist lediglich mit softwareseitigen Anpassungen möglich [BLO15B%]. Allerdings können die Templates nach aktuellem Entwicklungsstand nicht mit Variabilität versehen werden, was zu einer großen Zahl vorzuhaltender Varianten führt. Zu Versuchszwecken wurde seitens des Herstellers ein interner Prototyp des sogenannten *Typical-Configurator* zur Verfügung gestellt, der

[47] Vor- und Nachteile dieser Werkzeug-Architektur sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden, eine Diskussion dessen findet sich in [KAB+02].

[48] Bei der automatisierungstechnischen Planung bestehen aktuell Tätigkeiten (wie beispielsweise die Erstellung von Funktionsplänen), die in beiden Werkzeugen vorgenommen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird die maximal mögliche Funktionalität hinsichtlich der automatisierungstechnischen Planung in *COMOS* vorgenommen, die weiteren Schritte in *PCS7* werden nicht thematisiert.

die Funktionalität von *Engineering Base* erweitert, indem Templates verschiedene Optionen zugewiesen werden können, die dann wiederum zu verschiedenen Varianten des Templates zusammengefasst werden. Dies ist ein Schritt hin zur Handhabung von Variabilität in den Templates, ermöglicht allerdings noch kein Variantenmanagement, da bisher lediglich die Handhabung einzelner Varianten und nicht deren Variabilität ermöglicht wird. Eine ausführliche Abhandlung zur Handhabung des *Typical-Configurator* kann [BLO15B%] entnommen werden. Die Anwendung der Templates führt zu einer Instanziierung der enthaltenen Elemente, die jedoch die grundlegenden Mechanismen der Objektorientierung, hinsichtlich Vererbung etc., nicht vorsehen. Bei Verwendung des *Typical-Configurator* können bei Instanziierung eine bereits vorkonfigurierte Variante eines Templates ausgewählt und vor der Instanziierung mögliche Optionen (de-)selektiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem *Typical-Configurator* in *Engineering Base* um einen bisher offiziell nicht erhältlichen Prototypen handelt, wird je eine Umsetzung mit und ohne dieses Hilfsmittel beschrieben.

Die funktionale Planung der Anlage in *Engineering Base* ermöglicht es, diese in einem ersten Schritt hinsichtlich der zu realisierenden Funktionen zu strukturieren und erst im Nachgang die entsprechenden Dokumente und Pläne abzuleiten, bzw. Echtgeräte zuzuweisen. Dieses Vorgehen entspricht weitgehend der [VDI 2221] und somit auch den Grundgedanken des vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes (vgl. Kapitel 5.2).

***pure::variants* (pure-systems GmbH)**

Das Variantenmanagement-Werkzeug *pure::variants*[49] der pure-systems GmbH basiert auf den Arbeiten zu [BEU03]. Das Werkzeug ermöglicht die Modellierung sowie das Management von Variabilität in Problemraum wie auch Lösungsraum gleichermaßen [PUR15@] und repräsentiert damit die in Kapitel 5.3 beschriebenen Konzepte. Folglich kann die Problemraumvariabilität in Form von Merkmalmodellen sowie die Lösungsraumvariabilität in Familienmodellen abgebildet werden. Die Elemente dieser Modelle können mittels einer Vielzahl von Relationen verbunden werden (vgl. Kapitel 6.3.3), um das Konfigurationswissen abzubilden. Es ist möglich, die Elemente des Familienmodells zu Lösungsartefakten zu assoziieren, jedoch sind diesbezügliche Werkzeugintegrationen bisher auf den Bereich des Software-Engineerings fokussiert. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsweise mit diesem Werkzeug kann [PUR06@] entnommen werden. Eine Übersicht der formalen Modelle, welche die verwendeten Variabilitäts- und Konfigurationsmodelle spezifizieren, ist in [PUR15@] zu finden. Die Modellierung der Variabilitätsmodelle wird durch verschiedene programminterne Routinen unterstützt, die eine konsistente Modellierung sicherstellen.

Aufgrund der vielfältigen Auswirkungen der Variabilität auf nahezu alle Bereiche der Entwicklung weist auch dieses Werkzeug eine Vielzahl von Schnittstellen auf. Neben Schnittstellen zu möglichen Anforderungsmanagement-Werkzeugen besteht die Möglichkeit, Variabilitätsmodelle sowie die Konfigurationen als CSV-Datei zu im- oder exportieren. Diese Schnittstelle ermöglicht es unter anderem, eine valide Konfiguration, die somit eine Variante des modellierten Systems entspricht, in definierter Form zu exportieren und damit nachfolgenden Software-Werkzeugen zur Verfügung zu stellen (vgl. Abbildung 9-1).

[49] Das Werkzeug wird im Rahmen von [BEU03] noch als „Consul“ bezeichnet.

9.2. Umsetzungsszenario I unter Verwendung eines Variantenmanagement-Werkzeuges

Das erste Umsetzungsszenario beschreibt die Anwendung des Wiederverwendungskonzeptes unter Verwendung eines Engineering-Werkzeuges (*COMOS* oder *Engineering Base*) in Kombination mit dem Variantenmanagement-Werkzeug *pure::variants*. Abbildung 9-1 zeigt das Zusammenspiel des jeweiligen Engineering-Werkzeuges mit dem Variantenmanagement-Werkzeug im projektunabhängigen sowie dem projektabhängigen Anteil des Wiederverwendungskonzeptes. Diese Anordnung ist weitgehend unabhängig vom verwendeten Engineering-Werkzeug.

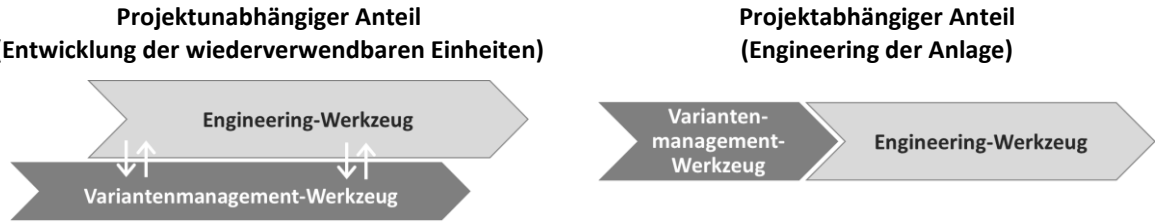

Abbildung 9-1: Zusammenspiel der Werkzeuge in projektunabhängigem und projektabhängigem Engineering

<u>Umsetzungsszenario I unter Verwendung von *COMOS* und *pure::variants*</u>

Das Umsetzungsszenario basiert auf der Anwendung von Software-Werkzeugen der Siemens AG und ist ausführlich in [SPES_XT14] beschrieben. Abbildung 9-2 zeigt das Zusammenwirken der verwendeten Engineering-Werkzeuge mit *pure::variants*, wobei anzumerken ist, dass für die reine Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes das Werkzeug *PCS7* nicht zwingend erforderlich ist.

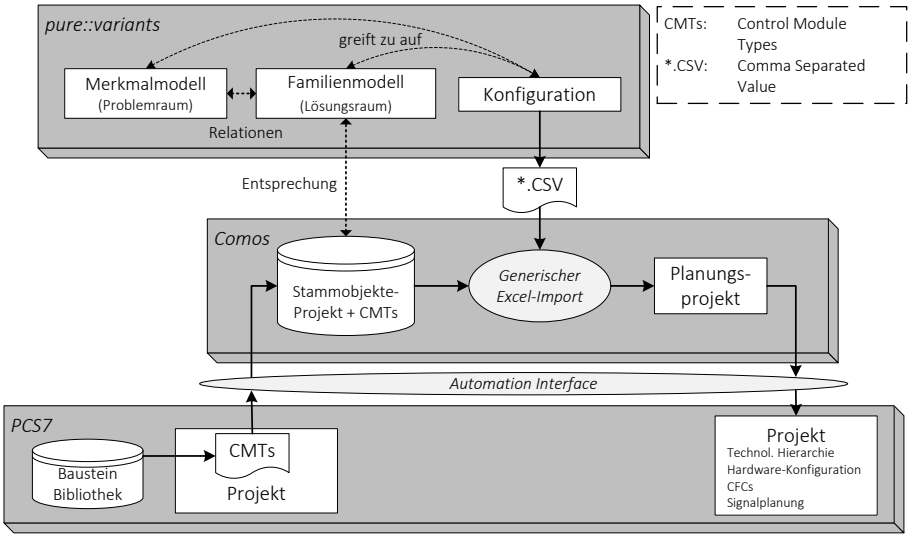

Abbildung 9-2: Werkzeugumsetzung mittels COMOS und pure::variants

Die Modellierung der Merkmalmodelle wie auch der Familienmodelle während der Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten wird in *pure::variants* vorgenommen. Währenddessen sind die Variabilitätsmodelle entsprechend des Entwicklungsstandes zu pflegen. Im Idealfall wird eine 1:1-Abbildbarkeit zwischen den Elementen des Familienmodells und der Objekte des Stammobjekte-

Projektes in *COMOS* eingehalten[50], um eine nachfolgende Allokation der Bestandteile der Konfiguration zu den Objekten in *COMOS* zu vereinfachen. Dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Im Engineering der Anlage wird die Konfiguration der Einheiten in *pure::variants* vorgenommen und diese anschließend als CSV-Datei exportiert. Mit Hilfe des *Generischen Excel-Imports* kann diese Konfiguration in *COMOS* importiert werden. An dieser Stelle muss einmalig eine Allokation der in der CSV-Datei referenzierten Objekttypen vorgenommen werden, die jedoch in nachfolgenden Anwendungen wiederverwendet werden kann. Mittels dieses Imports wird eine, der Konfiguration entsprechende, Objektstruktur in *COMOS* angelegt. Diese Objektstruktur kann sowohl die Funktions- als auch die Gerätestruktur umfassen. Bei Verwendung des *Automation-Interface* kann das Ergebnis überarbeitet und daraufhin in *PCS7* importiert werden, um auch nachfolgende Schritte des Engineerings zu beschleunigen.

Umsetzungsszenario I unter Verwendung von *Engineering Base* und *pure::variants*

Das Zusammenwirken von *pure::variants* und *Engineering Base* ohne Verwendung des *Typical-Configurator* ist in Abbildung 9-3 detailliert dargestellt. Die Entwicklung der Variabilitätsmodelle ist gemäß des Entwicklungsstandes in *pure::variants* vorzunehmen. Hierbei erfolgt die Arbeit bis zur exportierten CSV-Datei innerhalb von *pure::variants* identisch zu dem zuvor beschriebenen Szenario. Die Konfiguration der Einheiten wird im Rahmen des Engineerings in *pure::variants* vorgenommen und anschließend in *Engineering Base* importiert, um die entsprechenden Funktionen und Geräte zu instanziieren. Hierbei können statische Templates und Objekte referenziert werden.

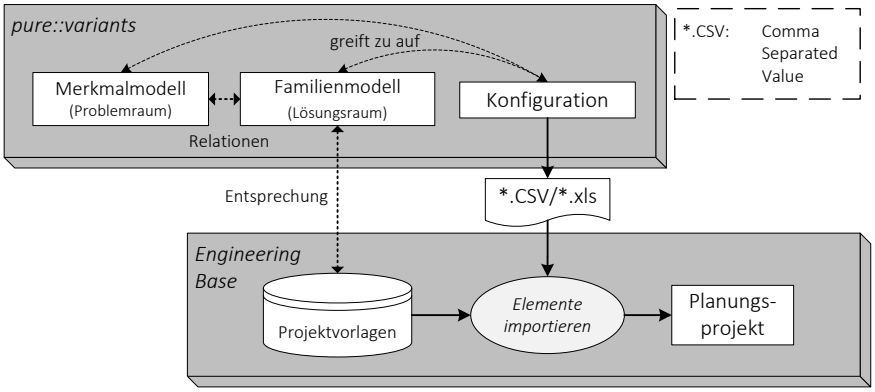

Abbildung 9-3: Werkzeugumsetzung mittels Engineering Base und pure::variants ohne Typical Configurator

Eine Verwendung von *Engineering Base* inklusive des *Typical-Configurator* in Verbindung mit *pure::variants* ist zwar grundsätzlich möglich, führt aber zu einer redundanten Datenhaltung, da die nicht konfigurierten Variabilitätsmodelle in *Engineering Base* als Templates und „Optionen“ abgebildet werden müssen. In Abbildung 9-4 ist ein Vorschlag skizziert, wie bestehende Variabilitätsmodelle verwendet werden können, um die Erstellung dieser Strukturen für den *Typical-Configurator* zu beschleunigen. Hierbei werden die Variabilitätsmodelle genutzt, um die Optionen innerhalb des *Typical-Configurators* anzulegen, sodass diese nicht gänzlich manuell definiert werden müssen. Dieser Ansatz ist jedoch als Sonderfall anzusehen, weshalb die konsequente Verwendung des

[50] Die Erstellung des Familienmodells kann unterstützt werden, indem die Struktur der Stammobjekte importiert wird. Ein stetiger Abgleich ist nach bisherigem Entwicklungsstand der Werkzeuge sowie der verwendeten Schnittstellen nicht möglich.

Typical-Configurator in *Engineering Base* im nachfolgenden Umsetzungsszenario II ohne ein Variantenmanagement-Werkzeug beschrieben wird.

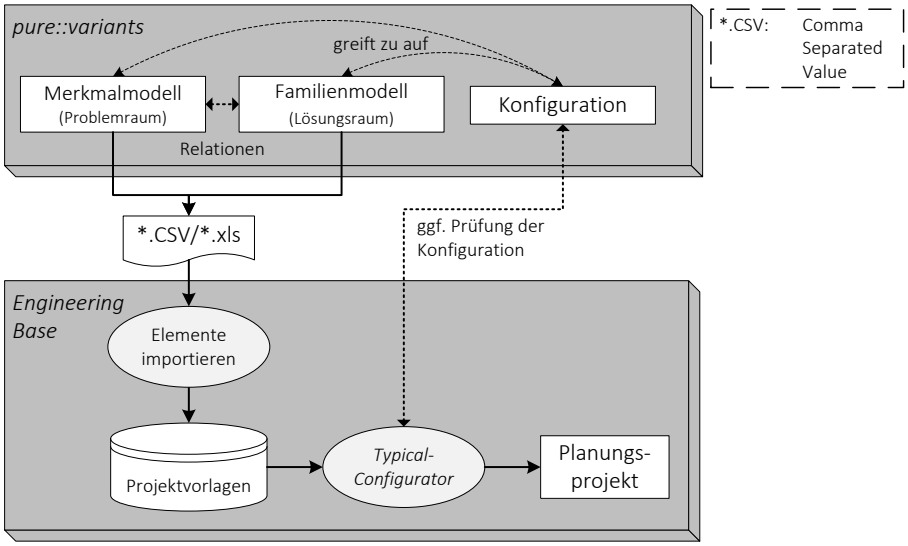

Abbildung 9-4: Werkzeugumsetzung mittels Engineering Base und pure::variants mit Typical Configurator

9.3. Umsetzungsszenario II ohne Verwendung eines Variantenmanagement-Werkzeuges

Das Umsetzungsszenario II thematisiert die Realisierung des Wiederverwendungskonzeptes mittels *COMOS* oder *Engineering Base*, jeweils ohne Verwendung des dezidierten Variantenmanagement-Werkzeuges *pure::variants*. Es wird folglich im projektunabhängigen, wie auch im projektabhängigen Engineering ausschließlich das jeweilige Engineering-Werkzeug verwendet.

Umsetzungsszenario II unter Verwendung von *COMOS*

Die Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes ohne zusätzliches Variantenmanagement-Werkzeug wird aufgrund der konsequenten Funktionsorientierung von *COMOS* ermöglicht. Es stellt einen Ansatz dar, wiederverwendbare Einheiten im Stammobjekte-Projekt zu definieren. Dabei werden die Einheiten entweder als sogenannte „Kopiervorlage“ definiert, welche die Referenzen zu den einzelnen enthaltenen Objekten umfasst, oder aber als gesonderte Agglomeration von Objekten zu einem neuen Stammobjekt gruppiert. Aufgrund der bisher nicht ausreichenden Unterstützung von Variabilität hat dies jedoch zur Folge, dass der wiederverwendbaren Einheit kaum variabilitätsbezogenen Relationen hinzugefügt werden können und diese somit nicht systematisch konfigurierbar ist. In Konsequenz kann weder eine Reduktion der Anzahl vorzuhaltender wiederverwendbarer Einheiten noch eine Adaption dieser an den Kontext der kundenindividuellen Anwendung vorgenommen werden. Die Handhabung von Variabilität kann mittels entsprechender Eingriffe in die Datenbank sowie der damit einhergehenden erforderlichen Routinen realisiert werden.

Umsetzungsszenario II unter Verwendung von *Engineering Base*

Eine Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes ohne Variantenmanagement-Werkzeug ist in *Engineering Base* grundsätzlich möglich, da auch dieses Engineering-Werkzeug eine funktionale Planung der Anlage der technischen voran stellt. Hinsichtlich der vorzuhaltenden wiederverwendbaren

Einheiten führt dies, aufgrund der standardmäßig nicht vorgesehenen Berücksichtigung expliziter Variabilität dazu, dass die Anzahl statischer wiederverwendbarer Einheiten erhebliche Umfänge annehmen kann. Abgesehen von wenigen Funktionen, die eine geringe Variabilität aufweisen, ist dies als impraktikabel anzusehen. Aufgrund dessen wird nachfolgend skizziert, wie das Wiederverwendungskonzept unter Verwendung des bisher unveröffentlichten Prototyps des *Typical-Configurator* angewendet werden kann.

Die wiederverwendbaren Einheiten sind folglich nicht mittels Variabilitätsmodellen, sondern anhand der im Template vorgesehenen Funktionen und Implementierungen zu beschreiben. Hierfür müssen während des projektunabhängigen Anteils des Konzeptes den Funktionen die entsprechenden Optionen zugewiesen werden und diese zu konsistenten Varianten assembliert werden. So können im Engineering wiederverwendbare Einheiten in Form von variablen Templates mit Hilfe des *Typical-Configurator* instanziiert werden. Eine ausführliche Beschreibung des Werkzeugs sowie der Anwendung des *Typical-Configurators* kann [BLO15B%] entnommen werden. Die Vor- und Nachteile der möglichen Manipulation bei Instanziierung der Varianten wurden in Kapitel 9.1 diskutiert.

9.4. Zwischenfazit

Das vorliegende Kapitel beschreibt verschiedene werkzeugtechnische Umsetzungsszenarien des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Wiederverwendungskonzeptes und weist somit die Anwendbarkeit des Konzeptes in industriellen Engineering-Werkzeugen nach. Während die Umsetzungen ohne ein gesondertes Variantenmanagement-Werkzeug bei der Handhabung der variablen wiederverwendbaren Einheiten erhebliche Schwächen aufweisen, ermöglicht die Nutzung eines solchen Werkzeuges eine konsequente Entwicklung und Anwendung variabler wiederverwendbarer Einheiten.

Die verwendeten Engineering-Werkzeuge weisen zwar mannigfaltige Schnittstellen auf, keine dieser Schnittstellen ist aber gezielt darauf ausgelegt, variabilitätsbezogene Informationen auszutauschen. Die prototypischen Umsetzungen zeigen zwar, dass verschiedene Schnittstellen dazu genutzt werden können, um diese Informationen zu transferieren. Jedoch sind diese Schnittstellen eher zum einmaligen Im-/Export als zum kontinuierlichen Abgleich der Informationen gedacht, wie es insbesondere im iterativen Verlauf der Entwicklung von Vorteil wäre.

Die Entwicklung des *Typical-Configurator* ist hingegen ein Beispiel dafür, dass auch die Hersteller der Engineering-Werkzeuge den Bedarf nach einer Unterstützung der Konfiguration erkannt haben und eine diesbezügliche Unterstützung anstreben. Allerdings kann hierbei bisher keine nachträgliche Änderung der Konfiguration vorgenommen werden. Eine Alternative zu der Integration der Funktionalität des Variantenmanagements stellt die Entwicklung einer spezifischen Schnittstelle zu Variantenmanagement-Werkzeugen dar, da diese spezialisierten Werkzeuge bereits eine weitreichende Unterstützung hinsichtlich des Handlings der Variabilität bieten. Diese Erkenntnisse wurden mit den verschiedenen Herstellern diskutiert und als sinnvoll erachtet, jedoch erfordert die Implementierung einer solchen Schnittstelle teils erheblichen Entwicklungsaufwand seitens der Werkzeug-Hersteller.

Hinsichtlich der Umsetzung sämtlicher anforderungsbezogener Tätigkeiten (vgl. Kapitel 7.1 und 8.1) ist neben dem Einsatz eines Variantenmanagement-Werkzeuges auch ein spezialisiertes Software-

Werkzeug für die Modellierung und Handhabung von Anforderungen vorteilhaft (z.B. IBM *Rational DOORS*). Ein solches kann beispielsweise mittels einer Schnittstelle von *pure::variants* genutzt werden, um die Relationen zwischen den Anforderungen und variabilitätsbehafteten Funktionen und Merkmalen abzubilden. Dieses zusätzliche Software-Werkzeug ermöglicht darüber hinaus ein durchgängiges Nachvollziehen von Entwicklungsentscheidungen, von der Anforderung, über die Modelle des Problemraums, hin zu den Elementen der Lösung.

10. Evaluation und Überprüfung der Anforderungserfüllung

Die vorigen Kapitel sind auf die Beschreibung des Wiederverwendungskonzeptes, das basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 4.3 erarbeitet wurde, sowie eine mögliche werkzeugtechnische Umsetzung ausgerichtet. Dieses Kapitel dient der exemplarischen Anwendung dieses Konzeptes sowie der Überprüfung der Anforderungserfüllung. So wird in einem ersten Schritt die Anwendbarkeit des Wiederverwendungskonzeptes belegt, indem dieses auf zwei industrielle Fallbeispiele angewendet wird. In einem zweiten Schritt wird die Überprüfung der Anforderungserfüllung vorgenommen, um die Vorteilhaftigkeit des Konzeptes in Relation zum Stand der Wissenschaft zu belegen. Die Anwendung wie auch die Überprüfung der Anforderungserfüllung sind weitgehend unabhängig von der Art der im vorigen Kapitel präsentierten Software-Umsetzungen; es wird aber davon ausgegangen, dass eine adäquate Handhabung der Variabilität (z.B. mittels *pure::variants*) sichergestellt ist.

10.1. Anwendung des Wiederverwendungskonzeptes

Das Wiederverwendungskonzept wird in zwei Fallstudien evaluiert, bei welchen jeweils ein alternatives Fallbeispiel herangezogen wird. Dabei handelt es sich bei dem ersten Fallbeispiel um eine Meerwasserentsalzungsanlage, die im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT [SPES_XT@] zur Verfügung gestellt und bereits bei einigen Abbildungen im Verlauf der Arbeit exemplarisch verwendet wurde. Da dieses Fallbeispiel im Laufe der Erarbeitung des Wiederverwendungskonzeptes immer wieder herangezogen wurde, um die Arbeit kontinuierlich voranzutreiben und die Anwendbarkeit sicherzustellen, wird im Rahmen der zweiten Fallstudie der Nachweis der Anwendbarkeit anhand eines alternativen Fallbeispiels erbracht. Hierbei wird das Konzept auf extraktive Gasanalysatoren angewendet [SIC15@], die typischer Weise im industriellen Anlagenbau zur Anwendung kommen, jedoch kundenindividuell konfiguriert und gefertigt werden. Die verschiedenen Fallbeispiele verdeutlichen, dass die Anwendung des Wiederverwendungskonzeptes nicht auf eine definierte Granularitätsebene beschränkt ist. Basierend auf der Beschreibung des jeweiligen Fallbeispiels wird die Definition und Beschreibung der Fallstudie vorgenommen.

10.1.1. Fallbeispiel „Meerwasserentsalzungsanlage“

Bei einer Meerwasserentsalzungsanlage handelt es sich um eine Wasseraufbereitungsanlage, deren Zweck es ist, salzhaltiges Meerwasser in Trinkwasser definierter Qualität zu überführen. Hierzu existieren verschiedene Verfahren, die primär in thermische und membranbasierte Verfahren differenziert werden. Bei den thermischen Verfahren wird das Meerwasser verdampft, wobei das Salz als konzentrierte Sole zurückbleibt. Der Wasserdampf wird wiederum zur Kondensation gebracht und dieses Kondensat in Folge auf Trinkwasserqualität aufbereitet. Die erheblichen Temperaturwechsel und der damit einhergehende Energiebedarf führen jedoch dazu, dass dieses Verfahren als sehr energie- und folglich auch kostenintensiv anzusehen ist. Aufgrund dessen werden mittlerweile die Membranverfahren bevorzugt [SEHE98, S. 755F.], die nicht nur weniger kostenintensiv sind, sondern auch die Möglichkeit bieten, gelöste organische Stoffe zu extrahieren. Bei diesen Verfahren wird das Salzwasser mit Hilfe von Hochdruckpumpen durch eine semipermeable Membran gepresst, die von Wassermolekülen, nicht aber von den gelösten organischen und anorganischen Stoffen passiert werden kann [SEHE98, S. 755]. Es sind verschiedene chemische und mechanische Prozessschritte notwendig, um das Meerwasser derart aufzubereiten, dass die empfindlichen Membranen keinen

Schaden nehmen sowie die Trinkwasserqualität erreicht wird. Zwar erfordert auch die Erzeugung des Drucks zur Überwindung des osmotischen Membrandruckes erhebliche Mengen an Energie, jedoch führen moderne Energierückgewinnungsmechanismen dazu, dass die Kosten der Membranverfahren geringer sind als die der thermischen Verfahren.

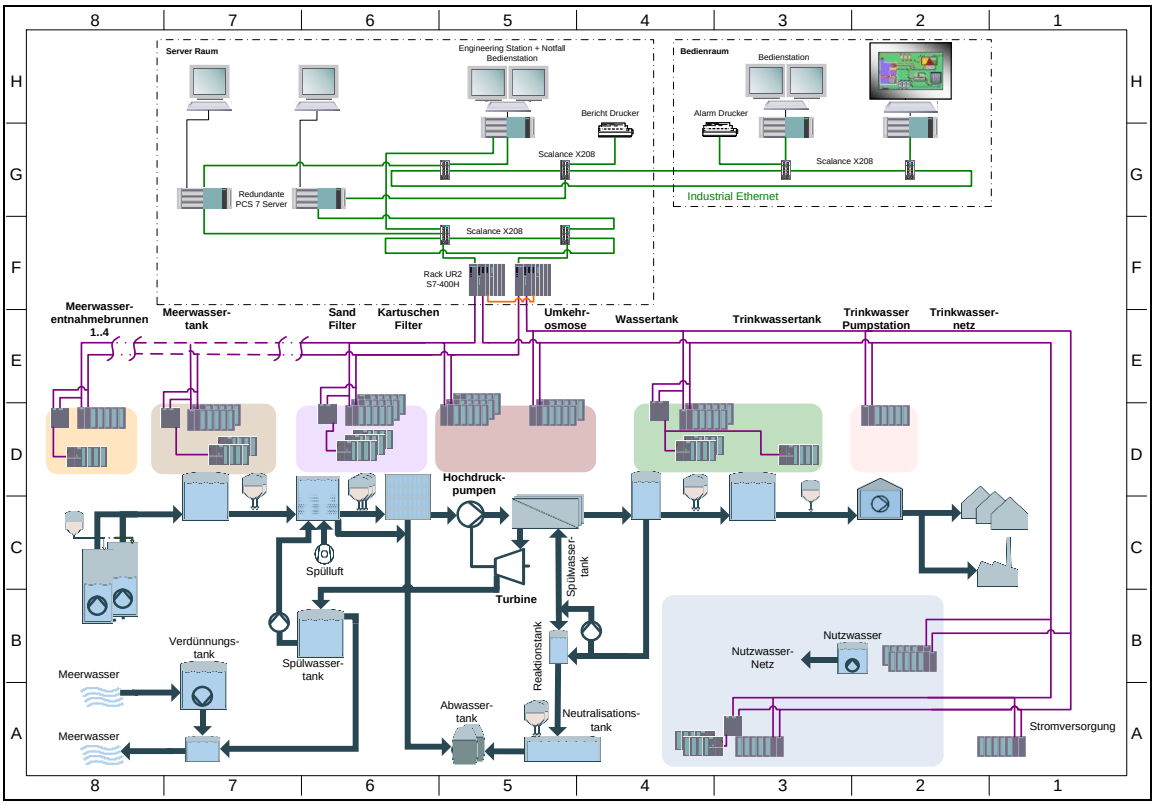

Abbildung 10-1: Prozess- und Automatisierungsstrutur der Meerwasserentsalzungsanlage nach [SIE12]

In Abbildung 10-1 ist die vereinfachte Anlagen- sowie Automatisierungsstruktur einer membranbasierten Meerwasserentsalzungsanlage exemplarisch dargestellt. Die untere Hälfte der Abbildung repräsentiert die Verfahrensabschnitte und Apparate der Umkehrosmose, während die obere Hälfte die automatisierungstechnische Struktur der Anlage schematisch darstellt. Entlang des Hauptprozesses wird das Meerwasser in Strandnähe mittels der Meerwasserentnahmebrunnen angesaugt und dabei durch die darüber liegenden Sandschichten bereits vorfiltriert.[51] Dieses Wasser wird mit verschiedenen Desinfektionsmitteln (Hypochlorit, Schwefelsäure, Calciumcarbonat, etc.) versetzt und dann im Meerwassertank zwischengespeichert. Der Tank dient als Puffer, um den nachfolgenden Prozessschritten einen gleichbleiben Volumenstrom an Meerwasser liefern zu können. Nach dem Passieren weiterer Filtereinheiten wird das Meerwasser mit der Hilfe von Hochdruckpumpen durch die semipermeablen Membranen gepresst.[52] Die zurückbleibende Sole (Konzentrat) wird durch eine Turbine zur Energierückgewinnung genutzt, anschließend mittels Meerwasser auf eine ökologisch unbedenkliche Konzentration verdünnt und teilweise als Spülwasser genutzt oder aber in das offene Meer geleitet. Das Permeat wird einer Reihe verschiedener mechanischer und chemischer Reinigungs-

[51] Detaillierte Informationen hinsichtlich der Meerwasserentnahmebrunnen sowie der Auswahl dieser können [DPM09] entnommen werden.
[52] Mögliche Anordnungen der Membranen und deren Betriebsweisen können [MERA07, S. 198FF.] oder [DES15@] entnommen werden.

und Aufbereitungsschritten unterzogen, um in Folge dem Trinkwassernetz zur Verfügung gestellt werden zu können [NIRI10A; NIRI10B].

Die Automatisierungslösung basiert bei dem hier betrachteten Beispiel auf einem zentralen Prozessleitsystem *PCS7*, das über verschiedene, spezialisierte Arbeitsplätze verfügt. Die Anbindung des Prozessleitsystems an die feldnahe Automatisierungshardware erfolgt mittels eines Datenservers. Die Strukturierung der Automatisierungshardware wurde entlang der Verfahrensabschnitte vorgenommen. Die Ausführung sämtlicher Systeme ist, wie Abbildung 10-1 zu entnehmen, redundant vorgenommen. Eine ausführliche Beschreibung der herangezogenen Beispielanlage kann [SIE12] und [SPES_XT13] entnommen werden. Die Definition eines exemplarischen Anlagenausschnittes wurde in Absprache mit der Siemens AG vorgenommen, noch bevor das Konzept angewendet wurde. Hierbei wurden die Meerwasserentnahmebrunnen bzw. die von diesen Brunnen realisierte Funktion „Meerwasser gewinnen“ als repräsentativ und hinsichtlich der Datenlage ausreichend dokumentiert angesehen.

10.1.2. Fallstudie „Meerwasserentsalzungsanlage“

Die nachfolgend beschriebene Fallstudie wurde im Rahmen des Projektes SPES_XT [SPES_XT@] durchgeführt. Evaluationsgegenstand der Fallstudie ist das erarbeitete Wiederverwendungskonzept, wobei das Evaluationsziel verfolgt werden soll, die Anwendbarkeit des Konzeptes nachzuweisen. Um eine valide Aussage hinsichtlich des vorgestellten Wiederverwendungskonzepts treffen zu können, müsste das klassische Engineering einer Anlage mit dem wiederverwendungsorientierten Engineering der identischen Anlagen verglichen werden. Da eine solch umfängliche Evaluation leider nicht praktikabel ist, wird die Evaluation im Rahmen einer exemplarischen Anwendung anhand eines Ausschnitts der Meerwasserentsalzungsanlage durchgeführt. Die erstellten Modelle können gesammelt Anhang D entnommen werden; diese werden nachfolgend direkt referenziert.

Wie Kapitel 7 anführt, stellt die Identifikation der Anforderungen an die wiederverwendbare Einheit den ersten Schritt des Wiederverwendungskonzeptes dar (vgl. Kapitel 7.1). Diese Anforderungen wurden systematisch erarbeitet, gemäß der vorgestellten Kategorisierung eingeteilt und bereits hinsichtlich deren potentieller Variabilität gekennzeichnet. Die erarbeiten Anforderungen können

Tabelle D-1 entnommen werden. Hierbei wird ersichtlich, dass eine große Zahl funktionaler Anforderungen vorliegt, die teilweise variabel sind und insbesondere die Anforderungen *F-1.3* und *F-1.5* sich gegenseitig bedingen, da sich eine Regelung des Durchflusses und eine Regelung des Füllstands gegenseitig ausschließen. Um die Anzahl möglicher Varianten zu reduzieren, wurden beispielsweise die selektierbaren Volumenströme auf zwei diskrete Werte festgelegt. Eine gegebenenfalls geforderte genauere Anpassung kann mittels weiterer, paralleler Brunnen („numbering up“) erreicht werden. Die Sammlung der Anforderungen wurde zum Zwecke der exemplarischen Durchführbarkeit nicht weiter ausgeführt. Eine Bewertung der Funktion, wie in Kapitel 7.2 beschrieben, konnte aufgrund der nicht vorliegenden Informationen einer möglichen Engineering-Organisation nicht durchgeführt werden.

Die erarbeiteten Anforderungen stellten im darauffolgenden Schritt die Grundlage für die Entwicklung des Merkmalmodells sowie der Funktionsstruktur dar (vgl. Kapitel 7.3). Das erstellte Merkmalmodell kann Abbildung D-1 entnommen werden. Darin sind nicht nur die Merkmale mit dem entsprechenden Variationstyp deklariert, sondern beispielsweise auch die sich ausschließenden Merkmale „Durchfluss

regeln“ und „Füllstand regeln“ mittels einer Relation als sich gegenseitig ausschließend definiert. Da die grafische Repräsentation der Variabilitätsmodelle eine übersichtliche Darstellung der Relationen nicht ermöglicht, können die Relationen Tabelle D-2 entnommen werden. Aufgrund des verfahrenstechnischen Bezuges sowie der vorliegenden Datengrundlage ist die übergeordnete Funktionsstruktur in Form eines Grundfließschemas nach [DIN EN ISO 10628] dokumentiert, das Abbildung D-2 entnommen werden kann.

Aufgrund der vorliegenden Dokumente wurde die nachfolgende Erarbeitung der technischen Lösung gemäß Kapitel 7.4.2 vorgenommen. Hierzu wurde das Verfahrensfließschema einer existierenden Meerwasserentsalzungsanlage herangezogen und nach Komponenten durchsucht, welche die Funktion „Meerwasser bereitstellen“ realisieren. Dies ist exemplarisch in Abbildung D-3 dargestellt. Ein Erfassen der weiterführenden Dokumente, wie des detaillierten R&I-Fließschemas, führt zur Identifikation der hier vermerkten technischen Komponenten (vgl. Abbildung D-4). Jedem dieser Elemente sind verschiedene Pläne assoziiert, welche auch nachfolgend dem jeweiligen Objekt im Familienmodell zugeordnet werden. Basierend auf diesen technischen Komponenten wurde in Folge das Familienmodell erstellt, das in Abbildung D-5 dargestellt ist. Das Familienmodell ist entsprechend der [DIN EN ISO 10628] strukturiert, wobei anzumerken ist, dass Software-Bausteine den Mess-, Steuer und Regelgeräten zugeordnet sind. Nach Abschluss des Familienmodells wurde das Konfigurationswissen, also die Zusammenhänge zwischen den Elementen des Merkmalmodells und denen des Familienmodells abgebildet, um eine funktionsorientierte Konfiguration zu ermöglichen. Dafür wurden positiv wie auch negativ ausgeprägte Relationen verwendet (vgl. Kapitel 6.3.3). Eine Übersicht dieser Merkmale und deren Relationen kann Tabelle D-2 entnommen werden. Mittels der Konsistenzprüfung konnte sichergestellt werden, dass die variabilitätsbezogenen Informationen in sich schlüssig sind (vgl. Kapitel 7.5). Die Überprüfungen aller Kriterien (vgl. Tabelle 7-1) können an der Stelle nicht gänzlich beschrieben werden. Ein Merkmal, welches das Prüfkriterium *P-1* erfüllt, ist beispielsweise das Merkmal „Sandstrand“, welches die Küstenform spezifiziert und eine direkte Relation zu der Bauform des Gehäuses im Familienmodell aufweist. Der Nachweis des Prüfkriteriums *P-2* ist beispielhaft in Abbildung D-6 erbracht, in welcher eine valide Konfiguration des Merkmal- wie auch Familienmodells dargestellt ist. Die vollständige tabellarische Darstellung der Lösungsraum-Elemente einer solchen Konfiguration kann Tabelle D-3 entnommen werden. Diese Tabelle umfasst die Daten, welche von nachgelagerten Software-Werkzeugen verarbeitet werden können. Es ist anzumerken, dass diese Tabelle aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die sichtbaren Namen beschränkt und die, für die rechnerbasierte Weiterverarbeitung zwingend erforderlichen, eindeutigen Namen nicht dargestellt sind.

Die gemäß Abbildung 7-1 erarbeiteten Modelle erlauben es, die wiederverwendbare Einheit der Funktion „Meerwasser gewinnen“ zu konfigurieren sowie durch weitere Merkmale zu ergänzen. Diese wiederverwendbare Einheit wurde im Rahmen eines exemplarischen projektabhängigen Engineerings gemäß Abbildung 8-1 verwendet und mit der Einheit des darauffolgenden Schrittes „Meerwasser speichern“ kombiniert. Es wurde im Kreis der Experten diskutiert, dass dadurch Anlageteile effizienter erstellt und so wiederverwendbare Artefakte gebündelt für die gezielte Verwendung vorgehalten werden können. In Kombination mit einer adäquaten Werkzeugunterstützung bietet dieses Vorgehen die Möglichkeit, auch die Variabilität innerhalb von Engineering-Objekten zu adressieren und explizit zu beschreiben.

10.1.3. Fallbeispiel „Extraktiver Gasanalysator“

Extraktive Gasanalysatoren kommen in einer Vielzahl industrieller Anlagen vor. Die Anwendung reicht von der chemischen Industrie, über verschiedene Kraftwerke, bis hin zu großen Frachtschiffen. Unabhängig von der Anwendung geht es dabei immer um die Messung spezifischer Gaskomponenten, die entweder relevant für die Regelung industrieller Verfahren oder die Dokumentation von Emissionen sind. Die in Zusammenarbeit mit der Sick AG betrachtete Gruppe extraktiver Gasanalysatoren erlaubt die Messung von über 60 verschiedenen Gaskomponenten in variierenden Konzentrationen [SIC15@]. Entsprechend der großen Anzahl von Einsatzbereichen, Messverfahren, Gaskomponenten, Messbereiche und -genauigkeiten weisen die Geräte eine erhebliche Varianz auf, die der Anpassung an den jeweiligen Kontext dient. Die Anpassbarkeit reicht vom Gehäuse, das einen Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen nach [DIN EN 60079-10-1] ermöglichen kann, bis hin zu verschiedenen Kombinationen von Analysatormodulen, Messwertaufbereitungen und Kommunikationsmodulen.

In Zusammenarbeit mit Vertretern der Sick AG wurde ein exemplarischer Bestandteil dieser Produktfamilie definiert, der sich eignet, um als wiederverwendbare Einheit aufbereitet zu werden. Dafür wurde ein UV-Messmodul betrachtet, welches die Messung der Gase NO, NO_2 und SO_2 sowie in Kombination mit einer weiteren Messeinheit auch die Messung des O_2-Gehaltes ermöglicht. Unabhängig von der zu messenden Gaskomponente wird das Messgas durch das Analysatormodul geleitet. Diese Strömung kann entweder durch einen externen Druck oder eine interne Messgaspumpe erzeugt werden. Neben der Messung verschiedener Nebengrößen, wie der Feuchte oder Temperatur des Messgases, werden im Analysator die Konzentrationen der einzelnen Gaskomponenten mittels optischer Messverfahren detektiert. Der schematische Aufbau eines solchen Analysatormoduls kann Abbildung 10-2 entnommen werden. Ein solcher Analysator besteht aus zwei Küvetten, wobei die Referenzküvette mit einem Referenzgas bekannter Spezifikation gefüllt und versiegelt ist. Die Messküvette wird hingegen vom Messgas durchströmt. In diesen Küvetten werden beide Gase mit UV-Licht spezifischer Wellenlängen beaufschlagt. Dieses UV-Licht kann mittels definierter Filter beeinflusst werden, um verschiedene Gaskomponenten messen zu können. Aus der Absorption des Lichtes in der Messküvette in Vergleich zu der Referenzküvette wird die Konzentration der jeweiligen Gaskomponente im Messgas errechnet. Der Messwert wird in einer zentralen Elektronik ermittelt und zur elektronischen Ausgabe aufbereitet. Die Ausgabe der Messwerte kann sowohl über eine optische Bedieneinheit, wie auch über verschiedene analoge und digitale Ausgänge erfolgen.

Das beschriebene Messverfahren weist vielfältige Abhängigkeiten zwischen den Messgasen, Messbereichen und -genauigkeiten sowie der technischen Lösung auf. Exemplarisch zu nennen sind unter anderem die Abhängigkeiten der verwendeten Referenzgase, verwendeten Klebstoffe, optischen Filter, Längen und Materialien der Küvetten. Diese Zusammenhänge stellen das zentrale Know-how des Unternehmens dar und können daher im Rahmen dieser Arbeit nicht veröffentlicht werden. Aufgrund dessen werden im Zuge der nachfolgenden Schilderungen lediglich diejenigen Funktionen, Merkmale, Komponenten und Relationen thematisiert, die bereits als veröffentlicht oder außensichtbar anzusehen sind. Unabhängig davon erfolgte die Durchführung der Fallstudie unter Berücksichtigung der vorgenannten Interna.

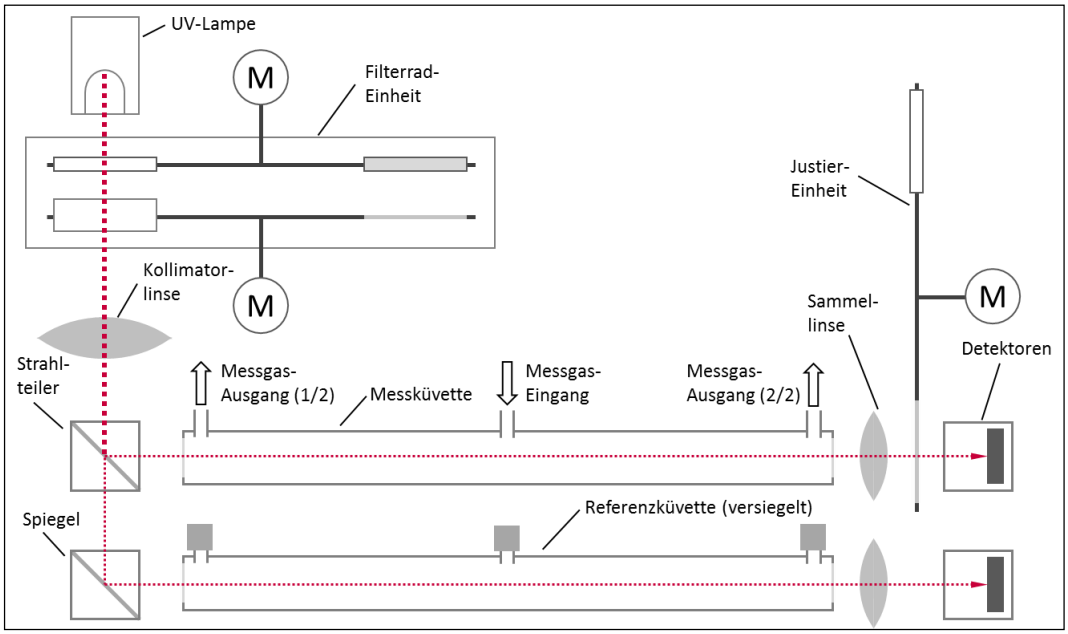

Abbildung 10-2: Schematische Struktur des UV-basierten Analysatormoduls nach [SIC15@]

10.1.4. Fallstudie „Extraktiver Gasanalysator“

Die vorliegende Fallstudie wurde in Kooperation mit der Sick AG in Form mehrerer Workshops durchgeführt. Neben dem Nachweis der reinen Anwendbarkeit des Konzeptes bestand seitens des Unternehmens Interesse daran, die Vorteilhaftigkeit hinsichtlich der Erstellung von Pflichtenheften und Sicherheitsnachweisen zu ermitteln. Ersteres wurde bereits im Rahmen der konzeptionellen Kapitel thematisiert, jedoch lag die Erstellung der Sicherheitsnachweise nicht im Fokus des konzeptionellen Kerns der Arbeit. Die Fallstudie wurde anhand des definierten Funktionsspektrums der Gasanalysatoren durchgeführt, das mittels des UV-basierten Analysatormoduls realisiert werden kann. Die Sammlung aller erstellten Modelle kann Anhang E entnommen werden; diese werden nachfolgend direkt referenziert.

Grundlage des projektunabhängigen Anteils ist die Ermittlung der Anforderungen. In einem ersten Schritt wurden so in Zusammenarbeit mit den Unternehmensvertretern[53] die Anforderungen definiert, den Kategorien (vgl. Kapitel 7.1) zugewiesen und bereits auf mögliche inhärente Variabilität hinterfragt. Die erarbeiteten Anforderungen können Tabelle E-1 entnommen werden. Eine qualitative Bewertung verschiedener Einheiten nach Kapitel 7.2 wird im Rahmen dieser Fallstudie nicht durchgeführt.

Basierend auf den Anforderungen wurden die zu realisierenden Funktionen erarbeitet, die zum einen die Basis des Merkmalmodells (vgl. Abbildung E-1) darstellen, zum anderen aber auch in die Funktionsstruktur überführt werden können, welche die Realisierung dieser Anforderungen ermöglicht (vgl. Kapitel 7.3).[54] Das Ergebnis dessen ist in Abbildung E-2 mittels der Formalisierten Prozessbeschreibung dargestellt. Die dort vorgenommene Assoziation der *Prozessoperatoren* zu

[53] Gemäß Tabelle 4-12 waren die Rollen Fachspezialist, Entscheider und Projektleitervertreten vertreten. Das Unternehmen Sick AG entspricht dabei der Rolle der Engineering-Organisation.

[54] Im Rahmen dieser Fallstudie wurde anstelle einer Neuentwicklung ein existierendes Produkt bzw. dessen Funktionalität analysiert, um ein effizientes Vorgehen sicherzustellen.

Technischen Ressourcen entstand bei der Allokation der Lösungskomponenten zu den jeweiligen Funktionen und Merkmalen und somit in einem nachfolgenden Schritt. Aufgrund der Orientierung der Gerätefunktionen auf das Messgas, ist die Besonderheit zu beachten, dass das Edukt gleich dem Produkt zu sein hat, das Medium also entlang des primären Materialflusses keine signifikante Veränderung der Eigenschaften erfährt. Setzt man die Messung einer Gaskomponente einer Verfahrensoperation gleich, so folgt aus Tabelle 6-1, dass die Einheit entlang der Grundoperationen zu strukturieren ist, welche Abbildung E-2 entnommen werden können.

Anstelle der Entwicklung der technischen Lösung wurden seitens des Unternehmens die Elemente der Gerätefamilie zur Verfügung gestellt, die als Lösungsbestandteile referenziert werden können. Diese Lösungsbestandteile wurden in Vorleistung entsprechend der Anforderungen des Unternehmens in Familienmodelle überführt. Dies kann einer vereinfachten Durchführung des in Kapitel 7.4.2 beschriebenen Vorgehens angesehen werden. Die Struktur der Modelle kann Abbildung E-3 entnommen, werden. Die einzelnen Familienmodelle sind in Abbildung E-4 bis Abbildung E-10 dargestellt. Dort wird ersichtlich, dass Elemente verschiedener Fachdisziplinen gehandhabt werden müssen. Die Vielfalt reicht von Küvetten, die das Messverfahren beeinflussen, über Software-Bausteine bis hin zu organisatorischen Elementen, wie den unterschiedlichen Betriebsanleitungen. Die Elemente sind für eine nachfolgende Konfiguration als standardmäßig deselektiert deklariert, das heißt sie müssen direkt oder indirekt als Teil der Lösung ausgewählt werden. Im Zuge der Modellierung wurden im Team mehr als 80 Relationen erstellt, die den Zusammenhang des Merkmalmodells (Abbildung E-1) und der zugehörigen gewerkeübergreifenden Lösungsbestandteile der jeweiligen Familienmodelle dokumentieren. Aus Gründen des Know-how-Schutzes werden die erstellten Relationen nicht abgebildet.

Die Konsistenzprüfung gemäß Kapitel 7.5 wurde nur in Teilen durchgeführt, da der Umfang der modellierten Familienmodelle weit über den des erstellten Merkmalmodells hinausgeht und folglich beispielsweise Prüfkriterium *P-4* nicht vollständig erfüllt werden kann. Hinsichtlich der Erstellung der Dokumentation nach Kapitel 7.6 konnte am Beispiel der verschiedensprachigen Betriebsanleitungen (Abbildung E-8) gezeigt werden, dass die Verknüpfung dieser Textfragmente zu den Bestandteilen der Lösung möglich und sinnvoll ist. Die Freigabe, Speicherung und Wartung nach Kapitel 7.7 wurde aufgrund des stark implementierungsabhängigen Charakters nicht in die Fallstudie integriert. Basierend auf den erstellten Variabilitätsmodellen wurde eine exemplarische, stufenweise Konfiguration der modellierten wiederverwendbaren Einheit durchgeführt, welche in Abbildung E-11 dargestellt ist. Hierbei wurde eine valide Konfiguration des Problemraums vorgenommen (linke Hälfte). Die rechte Hälfte der Abbildung zeigt die resultierende partielle Konfiguration der verschiedenen Familienmodelle (der Übersichtlichkeit halber nicht in voller Detailtiefe dargestellt). Diese Konfiguration kann im Anschluss anhand technischer Anforderungen komplettiert und für die Entwicklung eines neuen Gerätes genutzt werden. Abgesehen von dieser exemplarischen Konfiguration konnte keine ausführliche Anwendung der in Kapitel 8 beschriebenen projektabhängigen Konzeptbausteine vorgenommen werden.

Als Ergebnis der durchgeführten Fallstudie mit der Sick AG konnte ein umfassendes Merkmalmodell, das die Variabilität des betrachteten Teilsystems repräsentiert, ebenso wie ein hierarchisches Familienmodell, bestehend aus sieben einzelnen Modellen, erstellt werden. Das Vorgehen war dabei

stets geprägt von dem Leitgedanken, die betrachtete Funktion zu realisieren, sodass die Grenzen beteiligter Gewerke in den Hintergrund rückten. Die erstellten Modelle ermöglichen eine Konfiguration der wiederverwendbaren Einheit „Gaskonzentration messen“ unter funktionalen wie auch technischen Gesichtspunkten. Auch die Forderung, die Erstellung der Sicherheitsnachweise somit zu erleichtern, kann erfüllt werden. Eine geeignete Werkzeugumsetzung vorausgesetzt, können sowohl den Elementen der Variabilitätsmodelle Text-Fragmente hinterlegt werden, die entweder eine Spezifikation der Produktfamilie oder aber der gegebenenfalls auch partiell konfigurierten Einheit ermöglichen. Die beschriebene Fallstudie zeigt zum einen die Anwendbarkeit des Wiederverwendungskonzeptes anhand eines alternativen industriellen Fallbeispiels, zum anderen aber auch die Vorteilhaftigkeit hinsichtlich der Erstellung von Dokumenten (z.B. Lasten-/Pflichtenheft, Sicherheitsnachweis), die zwar im Rahmen der Erarbeitung des Konzeptes nicht im Fokus lag, jedoch eine Verbesserung des industriellen Alltages erwarten lässt.

10.2. Überprüfung der Anforderungserfüllung

Nachdem der vorige Abschnitt die Anwendbarkeit des Wiederverwendungskonzeptes anhand zweier Fallstudien aufgezeigt hat, dient dieser Abschnitt der Überprüfung, inwiefern das Wiederverwendungskonzept auch die zu Grunde gelegten Anforderungen erfüllt. Das vorgestellte Konzept wird in Relation gesetzt zu den Wiederverwendungskonzepten, die in Kapitel 4.1 analysiert und in Kapitel 4.4 bewertet wurden. In Tabelle 10-1 ist daher das in dieser Arbeit vorgestellte Wiederverwendungskonzept anhand der Anforderungen bewertet. Die Bewertungsergebnisse der bestehenden Wiederverwendungskonzepte aus Tabelle 4-16 sind an dieser Stelle wiederholt, um die Vergleichbarkeit der Bewertungen zu ermöglichen.

Tabelle 10-1: Überprüfung der Anforderungserfüllung und Vergleich der Wiederverwendungskonzepte

	Methodisches Vorgehen									Wiederverwendbare Einheit				Organisation	Werkzeug	
Anforderung: / **Konzept nach:**	Anforderung M-1	Anforderung M-2	Anforderung M-3	Anforderung M-4	Anforderung M-5	Anforderung M-6	Anforderung M-7	Anforderung M-8	Anforderung M-9	Anforderung E-1	Anforderung E-2	Anforderung E-3	Anforderung E-4	Anforderung O-1	Anforderung W-1	Anforderung W-2
Hady et al. (→ 4.1.1)	●	◐	○	○	○	○	◐	○	○	●	◐	○	●	◐	◐	○
Uzuner et al. (→ 4.1.2)	●	◐	○	○	◐	●	◐	○	◐	●	○	●	○	◐	●	○
Bramsiepe et al. (→ 4.1.3)	●	◐	○	○	○	○	●	○	◐	◐	○	○	◐	●	◐	○
Rottke et al. (→ 4.1.4)	●	◐	◐	○	○	○	○	○	●	◐	○	○	◐	○	●	○
Obst et al. (→ 4.1.5)	◐	○	◐	●	◐	○	◐	○	◐	◐	○	○	○	◐	◐	○
MOVA (→ 4.1.6)	●	◐	○	○	○	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	●	◐	○	○
Maga et al. (→ 4.1.7)	●	●	○	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	●	●	●	◐	◐	◐
Mahler (→ 4.1.8)	●	◐	◐	●	○	◐	●	◐	◐	◐	◐	○	●	●	◐	○
Fuchs et al. (→ 4.1.9)	●	●	○	◐	○	○	○	○	◐	○	◐	◐	○	○	○	○
Himmler et al. (→ 4.1.10)	●	◐	○	●	○	◐	◐	○	●	○	○	◐	○	◐	●	○
Schröck et al. (→ 5 ff.)	●	●	◐	●	●	◐	●	◐	●	●	◐	●	●	●	◐	◐

● Anforderung voll erfüllt (Konzeptionelle Umsetzung der Anforderung explizit beschrieben)
◐ Anforderung bedingt erfüllt (Konzeptionelle Umsetzung der Anforderung nicht beschrieben, aber möglich)
○ Anforderung nicht erfüllt (Ansatz steht der konzeptionellen Umsetzung der Anforderung entgegen)

Aufgrund der Fokussierung des in dieser Arbeit vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes auf das Vorgehen sowie die damit einhergehenden konzeptionellen Herausforderungen, erfüllt auch das vorgestellte Konzept nicht alle angeführten Anforderungen in Gänze. So sind insbesondere die werkzeugbezogenen Anforderungen, wie beispielweise die Forderung nach einer bidirektionalen Dokumentation der Wiederverwendung (Anforderung W-2), lediglich als bedingt erfüllt anzusehen. Ein Grund ist hierbei der stark organisationsspezifische Charakter einer möglichen Realisierung dieser Anforderung, der nicht im Fokus der prototypischen Umsetzung (vgl. Kapitel 9) steht. Eine weitere Anforderung, die als nur bedingt erfüllt betrachtet werden muss, ist Anforderung M-3, die eine

Bewertung der wiederzuverwendenden Artefakte hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung fordert. Zwar ermöglicht die in Kapitel 7.2 vorgestellte qualitative Bewertungstechnik einen Mehrwert gegenüber dem gängigen, erfahrungsgetriebenen Vorgehen, jedoch wäre es langfristig wünschenswert, hier auch quantitative Methoden ansetzen zu können, um insbesondere auch die Grundlage einer allgemeingültigen Argumentation für Wiederverwendung schaffen zu können. Leider existieren diesbezüglich noch keine zufriedenstellenden Ansätze, die über die vage Nennungen (beispielsweise „it takes two“ [CLNO12, S. 226F.]) hinausgehen. Eine ausführliche, argumentative Begründung der Bewertung jeder Anforderung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes ist Tabelle 10-2 zu entnehmen.

Tabelle 10-2: Bewertung der Anforderungserfüllung des vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes

Anforderung M-1: Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da alle wiederverwendungsbezogenen Tätigkeiten einer beschriebenen Systematik folgen. Das Konzept umfasst ein ausführliches Vorgehen für die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten im projektunabhängigen Anteil, wie auch einzelne Bausteine für die Verwendung dieser Einheiten im Engineering der automatisierten Anlage.
Anforderung M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da das beschriebene Wiederverwendungskonzept nicht nur die Automatisierungstechnik, sondern insbesondere auch vorgelagerte Fachdisziplinen integriert. Diese Integration wird erreicht, indem beispielsweise die Dekomposition der Anlage an den Arbeitsergebnissen der vorgelagerten Fachdisziplinen orientiert wird. Die Funktionsorientierung ermöglicht es, eine Definition der Einheiten sowie deren Variabilität vorzunehmen, die über die Gewerkegrenzen hinweg Gültigkeit besitzt.
Anforderung M-3: Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können
Diese Anforderung kann lediglich als bedingt erfüllt angesehen werden. Zwar umfasst der projektunabhängige Teil des Wiederverwendungskonzeptes eine Technik zur qualitativen Bewertung der Funktion bzw. der wiederverwendbaren Einheiten hinsichtlich deren Eignung sowie der Engineering-Organisation hinsichtlich deren Befähigung zur Entwicklung der Einheit. Dies stellt jedoch keine quantitative Metrik dar. Grundlage einer solchen Metrik muss eine valide und umfassende Datenbasis hinsichtlich der Wiederverwendung von Funktionen im Engineering automatisierter Anlagen sein, deren Erhebung und Aufbereitung jedoch die Unterstützung eines Industriepartners, sowie erhebliche monetäre Ressourcen in Anspruch nimmt. Unabhängig davon ermöglicht das Wiederverwendungskonzept die relative Abschätzung verschiedener Einheiten und stellt damit einen Mehrwert in Vergleich zu rein erfahrungsgetriebenen Vorgehen dar.
Anforderung M-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden. Das vorgestellte Wiederverwendungskonzept ermöglicht die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten basierend auf bestehenden Lösungen, um den Entwicklungsaufwand der wiederverwendbaren Einheit zu reduzieren. Eine werkzeugtechnische Umsetzung dieses Schrittes ist als sinnvoll anzusehen, jedoch stark abhängig von den verwendeten Werkzeugen und somit nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.
Anforderung M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da es zwingender Teil des projektunabhängigen Teils des Wiederverwendungskonzeptes ist, dass die Einheiten einer Prüfung unterzogen werden. Dieser Schritt ist sowohl bei neu entwickelten, wie auch bei überarbeiteten Einheiten, verpflichtend und kann durch geeignete Werkzeuge unterstützt werden.
Anforderung M-6: Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein
Diese Anforderung kann lediglich als bedingt erfüllt angesehen werden. Zwar ermöglicht das Wiederverwendungskonzept die Beschreibung der wiederverwendbaren Einheiten mittels Funktionen und Parametern, jedoch ist die Tätigkeit des Auffindens stark von der verwendeten Speicher- und Werkzeugtechnologie abhängig und kann konzeptionell nicht abschließend sichergestellt werden.
Anforderung M-7: Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden. Aufgrund der Definition der projektabhängigen Anteile des Wiederverwendungskonzeptes als Konzeptbausteine können diese in das Engineering der jeweiligen Engineering-Organisation eingebunden werden. So ist es möglich, die Kombination der wiederverwendbaren Einheiten mit neu entwickelten Bestandteilen der Lösung vorzunehmen.
Anforderung M-8: Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen
Diese Anforderung kann lediglich als bedingt erfüllt angesehen werden. Die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse wird zwar ermöglicht und die Überarbeitung der wiederverwendbaren Einheiten vorgesehen, jedoch ist die Kommunikation und Propagation dieser Erkenntnisse stark von den verwendeten Werkzeugen abhängig und kann folglich nicht ausschließlich durch konzeptionelle Aspekte adressiert werden.

Tabelle 10-2 (Fortsetzung)

Anforderung M-9: Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden. Die Definition der Funktion stellt den zentralen Aspekt des Wiederverwendungskonzeptes dar, anhand deren auch die Definition der Variabilität orientiert wird. Aufgrund der Differenzierung zwischen Problem- und Lösungsraum werden auch im Engineering der Anlage die funktionalen Aspekte der wiederverwendbaren Einheit in den Vordergrund gestellt. Diese Funktionsorientierung wird ermöglicht, indem die Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten anhand der Funktionen und erst nachfolgend anhand implementierungsspezifischer Anforderungen vorgenommen wird.
Anforderung E-1: Die Dekomposition muss sich an domänenspezifischen Normen orientieren
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden. Die Dekomposition ist anhand gängiger Normen und Richtlinien der Prozessindustrie möglich und wird beispielhaft anhand der [DIN EN ISO 10628] vorgenommen. Die Dekomposition kann aber bei Adaption des Konzeptes an andere Branchen oder Domänen entsprechend den dort geltenden Konventionen angepasst werden.
Anforderung E-2: Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden
Diese Anforderung kann als bedingt erfüllt angesehen werden, da die Modellierung der wiederverwendbaren Einheiten in Form von Merkmal- und Familienmodellen nicht an Gewerkegrenzen, sondern an der funktionalen Definition der Einheiten orientiert ist (vgl. Kapitel 6.3.3). So ist es möglich neben der ggf. gewerkspezifischen Relationen innerhalb der Lösungsbestandteile auch variabilitätsbezogenen Relationen zu modellieren. Diese Relationen können explizites Konfigurationswissen ebenso repräsentieren, wie informelles Entwicklerwissen. Jedoch stehen im vorgestellten Konzept die variabilitätsbezogenen Relationen im Vordergrund, sodass der Grad der Unterstützung inhaltlicher Relationen von der verwendeten Werkzeug-Plattform abhängig ist.
Anforderung E-3: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da die Verwendung von Merkmal- und Familienmodellen einen zentralen Bestandteil des Wiederverwendungskonzeptes darstellt. Auch die Anwendung alternativer Modellierungsansätze steht dem Wiederverwendungskonzept nicht entgegen.
Anforderung E-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da die wiederverwendbaren Einheiten zum einen Dokumentation für die Entwickler, welche die wiederverwendbaren Einheiten im Engineering nutzen sollen, und zum anderen auch Bestandteile der zukünftigen Anlagendokumentation enthalten können.
Anforderung O-1: Die Integration der Wiederverwendung in die Prozesse der Engineering-Organisation muss ermöglicht werden
Diese Anforderung kann als voll erfüllt angesehen werden, da die Teilung des Wiederverwendungskonzeptes in einen projektunabhängigen und einen projektabhängigen Teil das schrittweise Entwickeln wiederverwendbarer Einheiten begünstigt. Folglich müssen nicht für alle Funktionen einer automatisierten Anlage wiederverwendbare Einheiten vorgehalten werden. So kann das Wiederverwendungskonzept auch kontinuierlich eingeführt und die Anzahl wiederverwendbarer Einheiten wie auch den Anteil dieser an den Anlagen gesteigert werden. Darüber hinaus ermöglicht die Definition der Konzeptbausteine des projektabhängigen Teils eine Integration in bestehende Prozesse, die somit bei der Einführung des Konzeptes nicht gänzlich geändert werden müssen.
Anforderung W-1: Das Wiederverwendungskonzept muss sich in bestehende Werkzeuge der Engineering-Organisation integrieren lassen
Diese Anforderung kann lediglich als bedingt erfüllt angesehen werden. Zwar konnte die Umsetzbarkeit des Konzeptes in verschiedenen, gängigen Engineering-Werkzeugen belegt werden, jedoch führt die bisher eher geringe Unterstützung der Variabilität, welche diese Engineering-Werkzeuge aufweisen, dazu, dass für eine konsequente Umsetzung ein dezidiertes Variantenmanagement-Werkzeug eingesetzt werden muss. Erst dies ermöglicht die konsequente Realisierung des beschriebenen Wiederverwendungskonzeptes.
Anforderung W-2: Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein
Diese Anforderung kann lediglich als bedingt erfüllt angesehen werden, da die Dokumentation der Wiederverwendung zwar möglich, jedoch stark abhängig von den eingesetzten Engineering-Werkzeugen ist, sodass an dieser Stelle, basierend auf der konzeptionellen Beschreibung, keine abschließende Bewertung dessen vorgenommen werden kann.

Obgleich nicht alle Anforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit erhoben wurden, auch vom vorgestellten Wiederverwendungskonzept voll erfüllt werden, so zeigt der Vergleich mit alternativen Wiederverwendungskonzepten in Tabelle 10-1 einen Mehrwert, der insbesondere die gewerke-übergreifende Zusammenarbeit stärkt und die Berücksichtigung von Variabilität explizit macht.

11. Zusammenfassung, kritische Reflexion und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept vor, das Ansätze verschiedener Domänen kombiniert, um die Herausforderungen des Anlagenengineerings zu adressieren. Dieses Konzept wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit evaluiert und auf verschiedenen Konferenzen und Workshops diskutiert. Das vorliegende Kapitel schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung des Erreichten, einer kritischen Reflexion dessen sowie dem Aufzeigen möglicher zukünftiger Forschungsfragen.

11.1. Zusammenfassung

Engineering-Organisationen sind starken terminlichen wie auch monetären Restriktionen ausgesetzt, welche sie dazu bewegen, die Umsetzung der Aufgaben im Engineering zu optimieren. Ein Ansatz stellt das Kopieren bestehender Ergebnisse dar, die dann manuell und unsystematisch an die Anforderungen des aktuellen Projektes angepasst werden (vgl. Kapitel 3.2.1). Die häufige Differenzierung der Aufgaben anhand gewerkspezifischer Anteile, die meist sequenziell ausgeführt werden, hat jedoch zur Folge, dass die Optimierung innerhalb der jeweiligen Gewerkegrenzen durchgeführt wird. Diese lokale Optimierung führte zu einer Vielzahl von konzeptionellen und werkzeugtechnischen Lösungen, die gewerkspezifische Aufgaben adressieren, jedoch das Potential hinsichtlich des übergeordneten Engineerings nicht ausschöpfen. Es ist der Anspruch des in dieser Arbeit vorgestellten Wiederverwendungskonzeptes, Ansätze bestehender Wiederverwendungskonzepte auch aus anderen Domänen aufzugreifen und zu einem Konzept zu kombinieren, das sich am Engineering der gesamten Anlage anstelle der jeweiligen Gewerkegrenzen orientiert.

Vor der Beschreibung des Standes der Wissenschaft wurden die Grundlagen hinsichtlich der Wiederverwendung dargelegt. Die Beschreibung umfasst zum einen Strukturierungsansätze, die primär der Produktentwicklung oder dem Software-Engineering entstammen, zum anderen aber auch grundlegende Wiederverwendungsmechanismen, die von allen referenzierten Wiederverwendungskonzepten in verschiedener Weise genutzt werden. Aufgrund der zentralen Bedeutung einer systematischen Anpassbarkeit wiederverwendbarer Artefakte werden hier auch Grundlagen der Variabilität geschildert. Die beschriebenen wissenschaftlichen Wiederverwendungskonzepte werden nicht nur dazu verwendet, den Stand der Wissenschaft zu spezifizieren, sondern bilden auch eine Grundlage für die Anforderungsgewinnung. So werden Use-Cases und Anforderungen aus den veröffentlichten Arbeiten der einschlägigen Autoren abgeleitet und eine Anforderungsbasis erstellt, die den aktuellen Stand der Wissenschaft sowie die damit einhergehenden Herausforderungen adäquat abbildet. Diese Anforderungen beinhalten folglich sowohl Aspekte, die bereits in Wiederverwendungskonzepten realisiert worden sind, als auch Forderungen, die von Autoren aus Wissenschaft und Industrie veröffentlicht wurden, ohne dass es dafür bisher adäquate Lösungen gegeben hätte. Diese Anforderungen werden darüber hinaus auch für die abschließende Bewertung des Konzeptes genutzt, indem die Anforderungserfüllung der analysierten Wiederverwendungskonzepte überprüft wurde. Das Erreichte wird nachfolgend entsprechend des BMW-Prinzips [SCH99] gruppiert nach *Beschreibungsmittel*, *Methode* und *Werkzeug* beschrieben. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf den konzeptionellen Herausforderungen, also dem Bereich „Methode“.

Beschreibungsmittel: Basierend auf den Anforderungen wurde ein Wiederverwendungskonzept erarbeitet, das die systematische Wiederverwendung variabler Einheiten ermöglicht. Diese Einheiten umfassen neben den Lösungsbestandteilen auch Variabilitätsmodelle, die verwendet werden können, um die Variabilität in Problem- und Lösungsraum explizit zu dokumentieren, und ergänzen somit die Engineering-Objekte, die in verschiedenen domänenüblichen Beschreibungen vorliegen. So wird es möglich, abweichende Strukturen der Funktionen und Lösung vorzusehen und darüber hinaus den Funktionen interdisziplinäre Inhalte zuzuweisen. Damit können die Variabilitätsmodelle nicht nur zur Handhabung der Variabilität, sondern auch zur Modellierung der Relationen zwischen den Funktionen und Merkmalen des Problemraumes sowie den Elementen des Lösungsraumes genutzt werden. Diese Modellierung ermöglicht eine Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten unter Berücksichtigung der inhaltlichen Relationen und Verwendung interdisziplinärer Lösungsbestandteile.

Methode: Das Wiederverwendungskonzept besteht aus zwei Teilen, einem projektunabhängigen Anteil, der die Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten umfasst, sowie einen projektabhängigen Anteil, der Konzeptbausteine für die Verwendung der Einheiten im Engineering automatisierter Anlagen beschreibt. Diese Differenzierung orientiert sich an gängigen Quellen verschiedener Gewerke (vgl. Kapitel 5.1) und verdeutlicht den Bedarf, Wiederverwendung systematisch vorbereiten zu müssen. Das Vorgehen zur Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit folgt einer Systematik, wie sie in [VDI 2221] definiert ist, ergänzt diese jedoch um wiederverwendungsspezifische Aspekte, wie beispielsweise die portfolio-basierte Bewertung der Wiederverwendbarkeit einer Funktion (vgl. Kapitel 7.2).

Anstelle im projektabhängigen Anteil des Konzeptes ein neues Vorgehensmodell für das Engineering zu proklamieren, das erhebliche Änderungen in den Abläufen einer Engineering-Organisation zur Folge hätte, werden Konzeptbausteine vorgestellt, welche die Verwendung der wiederverwendbaren Einheiten in verschiedenen Vorgehensmodellen (vgl. Kapitel 2.2) ermöglichen. Diese Konzeptbausteine unterstützen zukünftige Anwender in verschiedenen Tätigkeiten (Anforderungsgewinnung, Entwurf, Konsistenzprüfung, Angebotserstellung etc.), bei denen wiederverwendbare Einheiten zum Einsatz kommen, und ermöglichen darüber hinaus die Kombination der Einheiten mit neu entwickelten Lösungsbestandteilen.

Werkzeug: Da ein Konzept den Weg aus der Forschung in die Praxis nicht ohne geeignete Unterstützung durch adäquate Werkzeuge bewerkstelligen kann, wurden verschiedene Umsetzungsszenarien erarbeitet und gegeneinander abgewogen. Dabei wurden die Engineering-Werkzeuge *COMOS* und *Engineering Base* herangezogen und jeweils mit dem Variantenmanagement-Werkzeug *pure::variants* kombiniert, um die Erstellung und Handhabung der Variabilitätsmodelle zu ermöglichen. Somit konnten verschiedene Herangehensweisen für die Umsetzung des Wiederverwendungskonzeptes aufgezeigt und deren Realisierbarkeit in verschiedenen Engineering-Werkzeugen nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigen diese Umsetzungen die Vorteilhaftigkeit der expliziten Berücksichtigung der Variabilität im Umfeld des Engineerings.

11.2. Kritische Reflexion

Das vorgestellte Wiederverwendungskonzept führt verschiedene Ansätze zusammen und kombiniert diese, um den Anforderungen des Engineerings gerecht zu werden. Gemessen an den Herausforderungen, welche in [FLV15B] hinsichtlich Wiederverwendung im Engineering postuliert werden, erfüllt das vorgestellte Konzept diese nahezu vollständig. Lediglich die Forderung nach einem gesonderten interdisziplinären Modellierungsansatz wird nicht erfüllt, da hierbei bestehende und erprobte Ansätze nichtig gemacht würden, was wiederum der Akzeptanz und Anwendbarkeit entgegen stünde. Wie auch die Überprüfung der Anforderungserfüllung in Kapitel 10.2 zeigt, erfüllt das vorgestellte Wiederverwendungskonzept auch die in dieser Arbeit herausgearbeiteten Anforderungen nicht in Gänze. Dies betrifft hauptsächlich Anforderungen, die stark von der werkzeugtechnischen Umsetzung in Engineering-Organisationen abhängen, wie beispielsweise das Rückmelden von Erkenntnissen aus Service und Instandhaltung (vgl. Anforderung M-8). Allerdings bringt ein Wiederverwendungskonzept wie das vorgestellte immer auch weitere Aspekte mit sich, die über die Implementierung hinausgehen. So wird auch in aktuellen Gesprächen und Umfragen [LSS+14] geäußert, dass eine gesteigerte Wiederverwendung angestrebt wird. Vernachlässigt wird jedoch allzu oft, dass systematische Wiederverwendung immer auch die Änderung der organisationsinternen Prozesse erfordert und somit erhebliche initiale Aufwände zur Folge haben kann, die nicht direkt einem Projekt zugeordnet werden können. Diese Hürde der Umsetzung stellt sich auch bei dem vorgestellten Wiederverwendungskonzept, wenngleich die schrittweise Einführung die in Vorleistung zu erbringenden Anteile einer Einführung reduziert. Zwar werden auch so Aufwände generiert, diese gefährden aber den Erfolg eines Kundenprojektes nicht direkt. Dieser positive Effekt wurde insbesondere im Rahmen der Fallstudien (vgl. Kapitel 10.1) von Industrievertretern bestätigt.

Darüber hinaus erfordert die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten oder Artefakte immer auch die Unterstützung der involvierten Akteure. Dies beginnt bei den Fachspezialisten, die ihr Wissen einbringen müssen und dieses somit auch für andere, insbesondere weniger Erfahrene, zugänglich machen. Um dies zu ermöglichen, muss die Führung der Engineering-Organisation dies nicht nur fordern [CLNO12, S. 192], sondern insbesondere auch für die Relevanz dieser Tätigkeiten werben [VDI 5610-1]. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Entwicklung der Einheiten nicht bestmöglich durchgeführt wird und in Folge die Anwendung der Einheiten nicht nur dem „not invented here“ [VOG08] entgegensteht, sondern eine gegebenenfalls unzureichende Qualität die Arbeit mit diesen Einheiten zusätzlich erschwert. Diese Fragestellungen gehen jedoch über die klassischen Ingenieurswissenschaften hinaus und liegen daher nicht im Fokus dieser Arbeit, werden aber unter anderem im *Fachausschuss 110* des *Verein Deutscher Ingenieure e.V.* behandelt, der beispielsweise auch die Richtlinie [VDI 5610-1] verfasste.

Aber auch in Wissenschaft und Forschung ist das Thema der systematischen Wiederverwendung im Allgemeinen und den produktlinienbasierten Ansätzen im Engineering im Speziellen Gegenstand aktueller weiterer Forschung (vgl. Kapitel 4.1.9). So zeigten unter anderem die Diskussionen auf der *„9th Annual IEEE International Systems Conference 2015“* [SFJ15*], dass im Bereich des Systems-Engineering die systemtheoretische Betrachtung von Modularität bzw. Modularisierung im Fokus aktueller Forschungsarbeiten liegt [ERQ15]. Darüber hinaus sind auch die organisatorischen Auswirkungen sowie gewerkeübergreifenden Aspekte der Variabilität, als Grundlage eines

interdisziplinären Wiederverwendungsansatzes, Gegenstand aktueller Diskussionen, die unter anderem auch durch die zuvor beschriebenen industriellen Defizite motiviert sind. So befasst sich beispielsweise auch [FLV15B] mit den gewerkeübergreifenden Aspekten der Wiederverwendung.

Das im Rahmen dieser Arbeit sowie den Veröffentlichungen präsentierte Wiederverwendungskonzept des Verfassers findet auch in wissenschaftlichen Arbeiten anderer Autoren Berücksichtigung. So wurde der Ansatz nach [FLK+14B] unter Bezugnahme auf die Veröffentlichung des Autors [SZF+14*] in [VFF+15] und [FLV15A] weitergeführt. Neben der schon in [FLK+14B] vorgenommenen Modellierung der Variabilität aus Kundensicht (vgl. Kapitel 4.1.9) weisen die letzteren Ansätze darüber hinaus eine explizite Modellierung der Variabilität auch auf Seiten der Lösung auf und adressieren somit die entsprechende „Herausforderung“ nach [FLV15B, S. 88FF.]. [FLV15A] stellt somit eine konsequente Weiterentwicklung von [FLK+14B] auf dem Weg zu einem durchgängigen und interdisziplinären Produktlinienansatz dar. Während so ermöglicht wird, Beziehungen und Logik auch auf Seiten der Lösung abzubilden, führt die unverändert auf Varianten fokussierte Betrachtung allerdings dazu, dass variantenübergreifende Fragestellungen hinsichtlich der Produktlinie immer noch außer Acht gelassen werden. Darüber hinaus ist die Zuordnung der Lösungsbestandteile zu den Merkmalen mittels Zuordnungstabellen im Bereich eines akademischen Fallbeispiels zwar noch handhabbar, die Skalierbarkeit auf Beispiele industriellen Charakters und Umfangs muss jedoch bezweifelt werden. So ermöglicht beispielsweise die in Kapitel 5.3 herangezogenen Variabilitätsmodellierung auch die Handhabung von Systemen mit höherer Varianz und Komplexität. Unabhängig davon wäre es vorteilhaft, wenn anstelle der nur schwer auf das Engineering übertragbaren Differenzierung in Entwickler- und Kundensicht [FLV15, S. 234FF.] die Modellierung zwischen Problem- und Lösungsraum konsequent umgesetzt würde und folglich auch die Zusammenhänge dieser beiden Betrachtungsräume behandelt würde.

Im Rahmen zweier Fallstudien, die anhand alternativer industrieller Fallbeispiele durchgeführt wurden, konnte die Anwendbarkeit des erarbeiteten Wiederverwendungskonzeptes nachgewiesen werden. Hierbei dienten jeweils definierte, repräsentative Ausschnitte industrieller Fallbeispiele als Datengrundlage, um daraus wiederverwendbare Einheiten abzuleiten. Die Fallstudien wurden mit Industrievertretern verschiedener Gewerke durchgeführt und diskutiert. Somit wird nicht nur die Anwendbarkeit des Konzeptes, sondern in der Diskussion auch die Vorteilhaftigkeit des vorgestellten Konzeptes belegt. Das Ergebnis der Fallstudien stützt das Bild, das die konzeptionelle Überprüfung der Anforderungserfüllung bietet, welche eine Bewertung des Konzeptes in Relation zu den im Rahmen des Standes der Wissenschaft präsentierten Ansätzen darstellt.

11.3. Ausblick

Wie auch die Überprüfung der Anforderungserfüllung in Kapitel 10.2 zeigt, birgt das vorgestellte Wiederverwendungskonzept einen Mehrwert gegenüber dem Stand der Wissenschaft und bietet mit der Variabilität oder auch der Funktionsorientierung Ansatzpunkte, wie bestehende Hürden, die den Transfer in das Engineering behindern, umgangen oder beseitigt werden können.

Die Thematik der Wiederverwendung, insbesondere wenn diese systematisch und interdisziplinär betrieben werden soll, hat jedoch Auswirkungen auf eine Vielzahl von Forschungs- und Unternehmensbereichen. Aufgrund dessen kann eine Arbeit, wie die vorliegende, nicht alle Fragestellungen abschließend beantworten. So sind die Auswirkungen auf die Abläufe und Strukturen innerhalb einer Engineering-Organisation bisher lediglich sporadisch untersucht worden [SAMA96]. Hier ergibt sich ebenso wirtschaftswissenschaftlicher Forschungsbedarf, wie bei den Fragen, die der Kalkulation der wiederverwendbaren Einheiten zu Grunde liegen. Wie [HAWO12] anführt, ist die Kalkulation der vordefinierten Module zwar möglich, deren Variabilität aber steht der Präzision der Kalkulation bisher entgegen. [LÜH13] zeigt hier erste Ansätze hinsichtlich der modularen Kostenschätzung, hier steht die Variabilität aber nicht im Fokus.

In Kapitel 7.4.2 wird ein Vorgehen beschrieben, wie wiederverwendbare Einheiten aus bestehenden und erprobten Lösungen erarbeitet werden können. Für das Software-Engineering stellt dies nach [TGK+04] eine sinnvolle Alternative zur Neuentwicklung der Einheiten dar, wobei davon ausgegangen werden kann, dass dies grundsätzlich auch im Engineering automatisierter Anlagen zutrifft. Allerdings erfordert ein solcher Ansatz, die bestehenden Lösungen auch als relevant identifizieren zu können. An dieser Stelle können neue, werkzeugbasierte Konzepte dem Anwender eine Unterstützung bieten, die über das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehen hinausgehen. Aufgrund der Notwendigkeit, ein solches Konzept auch anhand bestehender Daten erarbeiten und erproben zu können, bedarf dies bestenfalls der Zusammenarbeit mit einer Engineering-Organisation, die den Zugang zu diesen Daten gewährt.

Obgleich das in dieser Arbeit vorgestellte Wiederverwendungskonzept auf die modulare Planung konventioneller Anlagen ausgerichtet ist, besteht dennoch die Möglichkeit, die Grundgedanken, Ansätze oder Konzeptbausteine auch auf den modularen Anlagenbau nach [NE 148] zu übertragen. Auch hier besteht der Bedarf, Module projektunabhängig und unter Annahme der zukünftigen Kundenanforderungen zu entwickeln. Hierbei stehen zwar aktuell andere Herausforderungen, wie die Allokation leittechnischer Funktionen [HOF+14] oder die semantische Beschreibung der Module [OHU+15] im Vordergrund, jedoch führt auch im modularen Anlagenbau die explizite Berücksichtigung der Variabilität zu einer systematischen Anpassbarkeit der Module an spezifische Kundenanforderungen. Dabei rückt die Variabilität zur Laufzeit der Module, also eine potentielle Anpassung der Eigenschaften der Module während des Betriebes oder zwischen verschiedenen Betriebsphasen, in den Vordergrund. Diese Fragestellungen können mittels des in dieser Arbeit präsentierten Wiederverwendungskonzeptes unterstützt werden.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeit werden merkmalbasierte und annotative Variabilitätsmodellierungsansätze verwendet, um eine Integration in bestehende Werkzeuge zu ermöglichen. Langfristig sollte jedoch geprüft werden, inwiefern alternative Modellierungsansätze, wie beispielsweise die Delta-Modellierung [SBB+10], genutzt werden können. Dieser Ansatz ermöglicht die

sukzessive Detaillierung eines Systems, was dem Vorgehen des Engineerings automatisierter Anlagen nahe kommt. Gelingt es so, ein systematisches Vorgehen zu etablieren, wie eine automatisierte Anlage mittels der Kombination verschiedener Delta-Module entwickelt werden kann, kann die Flexibilität der wiederverwendbaren Einheiten gesteigert und deren Verwendung eingängiger gestaltet werden. Die Einführung eines solchen Ansatzes erfordert jedoch eine tiefgreifende Integration in die verwendeten Engineering-Werkzeuge, da hierbei eine separate Modellierung von Engineering-Objekten auf der einen und deren Variabilität auf der anderen Seite nicht mehr zielführend gehandhabt werden kann. Im Sinne der [VDI/VDE 3695-4] bedeutet das eine Integration des Variantenmanagement in die durchgängigen Engineering-Werkzeuge. Hierzu müssten folglich entweder die Engineering-Werkzeuge hinsichtlich der Unterstützung von Variabilität erweitert oder aber bestehende Variantenmanagement-Werkzeuge enger an die Engineering-Werkzeuge gekoppelt werden. Eine solche enge Kopplung würde darüber hinaus die Grundlage schaffen, nicht nur die Variabilität während der Entwicklung, sondern auch die Variabilität zur Laufzeit zu unterstützen und stellt somit gewissermaßen die Grundlage einer systematischen und vorgedachten Rekonfigurierbarkeit von Anlagen dar. So könnten zum einen Anpassungen während des Betriebes der Anlage definiert oder aber zum anderen auch gezielt Flexibilität vorgesehen werden, wie sie beispielsweise für die Umsetzung der Konzepte von Industrie 4.0 [KWH13] erforderlich wäre.

Anhang A: Use-Cases zur Gewinnung der Anforderungen

Die nachfolgend verwendeten Rollendefinitionen beziehen sich auf Tabelle 4-12.

Use-Case 1: Wiederverwendung wird unsystematisch betrieben

Typ	*Ist-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Das Engineering automatisierter Anlagen ist vom Projektgeschäft geprägt [FAY09]. Diese Projektorientierung führt zu teilweise erheblichem Zeitdruck auf die Engineering-Organisationen, sodass diese anstreben, mit möglichst geringem initialen Aufwand das Engineering zu optimieren.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Fachspezialist	• *Schnelle Abarbeitung der Tätigkeiten des Engineerings*
	Engineering-Organisation	• *Effiziente Durchführung des Engineering-Auftrages* • *Zufriedene Kunden* • *Projektdurchführung in Kosten-, Zeit- und Qualitätsrahmen*
	Kunde	• *Möglichst schnelles Engineering, um Anlage frühestmöglich in Betrieb nehmen zu können* • *Sichere und fehlerfreie Anlage mit hoher Verfügbarkeit*
Akteure	*Fachspezialist*	
Vor-bedingungen	• *Es liegen vorige Projekte vor, auf die der Fachspezialist frei zugreifen kann* • *Es liegt ein aktuelles Projekt zur Planung einer kundenindividuellen Anlage vor, das vom Fachspezialist bearbeitet werden soll*	
Nach-bedingungen	• *Engineering der kundenindividuellen Anlage abgeschlossen oder in einen reiferen Zustand überführt*	
Beschreibung in Schritten	1. *Der Fachspezialist analysiert die aktuelle Engineering-Tätigkeit und erkennt Ähnlichkeit zu vorigem Projekt bzw. voriger Tätigkeit* 2. *Aufsuchen dieser vergangen Lösung, kopieren der ganzen Lösung oder der relevanten Anteile (ggf. unter Missachtung verbundener Lösungsanteile anderer Gewerke, da diese nicht eindeutig zuzuordnen sind)* 3. *Anpassen der Kopie an Anforderungen des aktuellen Kundenprojektes* 4. *Erledigung der nicht durch die Kopie abgedeckten Engineering-Tätigkeiten*	
Erweiterungen/ Variation	a. *Nicht vorhanden*	
Quellen	*[JMG+10], [VDI/VDE 3695-3], [MJG+11c], [FFV12a], [HLO+14]*	
Anforderungen	*Anforderung M-1:* *Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen* *Anforderung M-2:* *Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren* *Anforderung M-5:* *Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen* *Anforderung E-2:* *Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden* *Anforderung E-3:* *Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden* *Anforderung W-2:* *Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein*	

Use-Case 2: Wiederverwendung wird basierend auf feingranularen gewerkspezifischen Einheiten betrieben

Typ	*Ist-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Das Engineering automatisierter Anlagen ist vom Projektgeschäft geprägt [FAY09]. Diese Projektorientierung führt zu teilweise erheblichem Zeitdruck auf die Engineering-Organisationen. Viele Anbieter von Engineering-Werkzeugen bieten daher als zusätzliche Produkte oder in Werkzeuge integriert Bibliotheken von meist gewerkspezifischen, feingranularen Einheiten (z.B. Normteilbibliotheken, Softwarebausteine, etc.) an, welche die objektorientierte Entwicklung einer Lösung erleichtern.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Fachspezialist	• *Schnelle Abhandlung der Tätigkeiten des Engineerings*
	Engineering-Organisation	• *Effiziente Durchführung des Engineering-Auftrages* • *Zufriedene Kunden* • *Projektdurchführung in Kosten-, Zeit- und Qualitätsrahmen*
	Kunde	• *Möglichst schnelles Engineering, um Anlage frühestmöglich in Betrieb nehmen zu können* • *Sichere und fehlerfreie Anlage mit hoher Verfügbarkeit*
Akteure	*Entscheider, Fachspezialist*	
Vor-bedingungen	• *Es liegen Engineering-Werkzeuge vor, die über Bibliotheken von standardisierten oder quasi-standardisierten Elementen verfügen* • *Es liegt ein aktuelles Projekt zur Planung einer kundenindividuellen Anlage vor, das von Fachspezialist bearbeitet werden soll*	
Nach-bedingungen	• *Engineering der kundenindividuellen Anlage abgeschlossen oder in einen reiferen Zustand überführt*	
Beschreibung in Schritten	1. *Der Entscheider beschließt die Anschaffung und Nutzung von Bibliotheken wiederverwendbarer Artefakte* 2. *Der Fachspezialist analysiert die aktuelle Engineering-Tätigkeit* 3. *Aus den entsprechenden Bibliotheken werden die feingranularen Elemente instanziiert und daraus die kundenspezifische Lösung assembliert* 4. *Erledigung der nicht durch feingranularen Elemente abgedeckten Engineering-Tätigkeiten*	
Erweiterungen/ Variation	a. *Nicht vorhanden*	
Quellen	*[ORD+01], [VDI/VDE 3695-3], [JMG+10], [FFV12A], [ODU13], [UZU13]*	
Anforderungen	*Anforderung M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren* *Anforderung M-6: Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein*	

Use-Case 3: Anforderungen an wiederverwendbare Einheiten aufbereiten

Typ	*Soll-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Die projektunabhängige Entwicklung einer neuen wiederverwendbaren Einheit wird initiiert.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Entscheider	• *Abgestimmte Definition der wiederverwendbaren Einheit* • *Valide Anforderungsbasis*
	Fachspezialist	• *Grundlage für weitere Entwicklung*
	Projektleiter	• *Effiziente und störungsfreie Projektdurchführung* • *Valide und umfassende Anforderungsbasis, um Iterationen im Projekt zu verhindern*
	Engineering-Organisation	• *Interdisziplinäre Konvention für die Definition (zukünftiger) wiederverwendbarer Einheiten* • *Günstige, qualitativ hochwertige wiederverwendbare Einheit, anwendbar in einer möglichst großen Zahl an Projekten*
Akteure	*Entscheider, Fachspezialist, Projektleiter*	
Vor-bedingungen	• *Detailliertes Marktwissen* • *Erwartung zukünftiger Projekte* • *Verfügbare Kapazitäten zur projektunabhängigen Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten*	
Nach-bedingungen	• *Konsistente Anforderungsbasis für die Entwicklung einer wiederverwendbaren Einheit* • *Ggf. nachgelagerte Entscheidung über Weiterführung der Entwicklung*	
Beschreibung in Schritten	1. *Interdisziplinäre Abstimmung und Festlegung einer Dekompositionsstrategie für zukünftige Anlagen* 2. *Analyse der zu entwickelnden wiederverwendbaren Einheit hinsichtlich der Eignung zur Wiederverwendung* 3. *Sammlung der Anforderungen durch Fachspezialist* 4. *Identifikation variabilitätsbehafteter Anforderungen* 5. *Abstimmung der Anforderungen mit Entscheider* 6. *Lösung von Inkonsistenzen* 7. *Abstimmung der Anforderungen mit beteiligten Stakeholdern* 8. *Detaillierung der Anforderungen* 9. *Freigabe der Anforderungen durch Entscheider*	
Erweiterungen/ Variation	2. *a) Bei Feststellung der Nichteignung: Abbruch der Entwicklung*	
Quellen	*[ORD+01], [VDI/VDE 3695-2], [MAG12]*	
Anforderungen	*Anforderung M-1:*	*Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen*
	Anforderung M-3:	*Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können*
	Anforderung E-1:	*Die Dekomposition muss sich an domänenspezifischen Normen orientieren*
	Anforderung E-3:	*Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden*

Use-Case 4: Wiederverwendbare Einheiten systematisch und interdisziplinär entwickeln

Typ	*Soll-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Die projektunabhängige Entwicklung einer neuen wiederverwendbaren Einheit wurde initiiert, die Entscheidung der Engineering-Organisation zur Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten wurde getroffen und die Anforderungsbasis erarbeitet und beschlossen.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Entscheider	• *Den Anforderungen entsprechende wiederverwendbare Einheit* • *Entwicklung im Rahmen der Kosten-, Zeit- und Qualitätsforderungen*
	Fachspezialist	• *Bestmögliche Lösung des Problems / der Anforderungen* • *Schutz des eigenen „Know-how“* • *Strukturierte Dokumentation bestehender Informationen und Lösungen* • *Möglichst geringe Einarbeitung in Werkzeugumgebung*
	Projektleiter	• *Effiziente und störungsfreie Projektdurchführung* • *Möglichst geringe Anzahl an Iterationen* • *Zufriedene Projektmitarbeiter*
	Engineering-Organisation	• *Günstige, qualitativ hochwertige wiederverwendbare Einheit, anwendbar in einer möglichst großen Zahl an Projekten* • *Wenn möglich, Wiederverwendung bestehender Lösungen für die Entwicklung der wiederverwendbare Einheit*
Akteure	*Entscheider, Fachspezialist, Projektleiter*	
Vor-bedingungen	• *Verfügbares detailliertes Marktwissen und Erwartung zukünftiger Projekte* • *Positive Entscheidung zur Entwicklung der wiederverwendbaren Einheit* • *Bereitschaft aller beteiligter Gewerke zur Beteiligung an Entwicklung* • *Verfügbare Kapazitäten zur projektunabhängigen Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten* • *Konsistente Anforderungsbasis gemäß Use-Case 3*	
Nach-bedingungen	• *Wiederverwendbare Einheit liegt inklusive expliziter Beschreibung der Variabilität vor*	
Beschreibung in Schritten	1. *Definition von Funktionen und Funktionsstrukturen inklusive Variabilität* 2. *Interdisziplinäre Erarbeitung von Lösungskonzepten inklusive Variabilität* 3. *Entwicklung der technischen Lösung unter Berücksichtigung von Variabilität* 4. *Freigabe der wiederverwendbaren Einheit für die Verwendung in kundenspezifischen Projekten*	
Erweiterungen/ Variation	*Bestehende Lösungen müssen anhand der Anforderungen und Funktionen aus Schritt 2 analysiert und für die Entwicklung der technischen Lösung herangezogen werden*	
Quellen	*[VDI/VDE 3695-2], [MAG12], [HAWO12], [BRSC12], [HLO+14], [MAH14], [FLV15A]*	
Anforderungen	*Anforderung M-1: Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen*	

	Anforderung M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren *Anforderung M-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können* *Anforderung M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen* *Anforderung M-9: Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung* *Anforderung E-1: Die Dekomposition muss sich an domänenspezifischen Normen orientieren* *Anforderung E-2: Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden* *Anforderung E-3: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden*

Use-Case 5: Ändern / Erneuern wiederverwendbarer Einheiten

Typ	*Soll-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Es liegen bereits wiederverwendbare Einheiten vor, die für die projektabhängige Entwicklung kundenspezifischer Lösungen (Engineering von Anlagen) verwendet werden. Aufgrund neuer Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung, technischem Fortschritt oder eine Revision technischer Komponenten müssen bestehende wiederverwendbare Einheiten geändert bzw. aktualisiert werden.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Entscheider	• *Vermeidung / Reduktion zukünftiger Fehler und / oder Probleme durch fehlerhafte oder nicht mehr dem Stand der Technik entsprechende wiederverwendbare Einheiten* • *Geringstmögliche Anzahl wiederverwendbarer Einheiten* • *Systematische Abschätzung, ob eine Anpassung oder Neuentwicklung der betroffenen wiederverwendbaren Einheiten nötig ist*
	Fachspezialist	• *Detaillierte Informationen über Änderungen oder technische Probleme oder Neuerungen* • *Dokumentation bestehender Informationen und Lösungen* • *Effiziente Möglichkeiten, Versionen bestehender wiederverwendbarer Einheiten zu erzeugen* • *Effiziente Möglichkeit, die Verwendung bestehender wiederverwendbarer Einheiten nachzuvollziehen, um Auswirkungen der Änderung analysieren zu können*
	Engineering-Organisation	• *Günstige, qualitativ hochwertige wiederverwendbare Einheit, anwendbar in einer möglichst großen Zahl an Projekten* • *Möglichst geringen Aufwand und keinen Imageverlust*
	Kunde	• *Anlage in Betrieb, möglichst geringe Ausfallzeiten* • *Informationen von Engineering-Organisation, ob ein Eingriff in die Anlage notwendig ist oder nicht*

Akteure	*Entscheider, Fachspezialist*
Vor-bedingungen	• *Es liegen wiederverwendbare Einheiten vor, die von einer Überarbeitung, resultierend aus oben genannten Gründen, betroffen sind*
Nach-bedingungen	• *Überarbeitete wiederverwendbare Einheit liegt vor oder wiederverwendbare Einheit wurde gelöscht* • *Mögliche Kundenprojekte wurden überprüft und die Kunden ggf. informiert*
Beschreibung in Schritten	1. *Klärung der Kritikalität der Neuerung oder des technischen Problems* 2. *Analyse der Auswirkungen auf bestehende wiederverwendbare Einheiten durch Fachspezialisten* 3. *Entscheidung über weiteres Vorgehen in Rücksprache mit Entscheider: Neuentwicklung, Überarbeitung oder Löschung der wiederverwendbaren Einheit* 4. *Ggf. Überarbeitung der wiederverwendbaren Einheit oder Neuentwicklung nach Use-Case 4* 5. *Freigabe der überarbeiteten wiederverwendbaren Einheit*
Erweiterungen/ Variation	2. *a) Wurden die wiederverwendbaren Einheiten bereits in kundenspezifischen Projekten verwendet, ist abhängig von der Kritikalität der technischen Probleme eine Überprüfung aller Projekte notwendig*
Quellen	*[VDI/VDE 3695-2], [MAG12], [HAWO12], [BRSC12]*
Anforderungen	*Anforderung M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen* *Anforderung M-8: Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen* *Anforderung W-2: Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein*

Use-Case 6: Nutzen der wiederverwendbaren Einheiten im Engineering automatisierter Anlagen

Typ	*Soll-Use-Case*	
Anwendungs-kontext	*Die Engineering-Organisation erhält den Zuschlag für das Engineering einer Anlage und führt dieses durch. Es liegen bereits wiederverwendbare Einheiten vor, die für die projektabhängige Entwicklung kundenspezifischer Lösungen (Engineering von Anlagen) verwendet werden können und die den Anforderungen des kundenspezifischen Projektes entsprechen.*	
Stakeholder und Interessen	**Stakeholder**	**Interessen**
	Entscheider	• *Effiziente Durchführung des Engineerings im Interesse der Engineering-Organisation und des Kunden*
	Projektleiter	• *Zufriedene Kunden im Sinne der Engineering-Organisation* • *Zufriedene Projektmitarbeiter*
	Fachspezialist	• *Schnelle Abhandlung der Tätigkeiten des Engineerings*
	Engineering-Organisation	• *Effiziente Durchführung des Engineering-Auftrages* • *Zufriedene Kunden* • *Projektdurchführung in Kosten-, Zeit- und Qualitätsrahmen*

	Kunde	• *Möglichst schnelles Engineering, um Anlage frühestmöglich in Betrieb nehmen zu können* • *Sichere und fehlerfreie Anlage mit hoher Verfügbarkeit*
Akteure	*Entscheider, Projektleiter, Fachspezialist, Kunde*	
Vor-bedingungen	• *Es liegen wiederverwendbare Einheiten vor, die für eine Verwendung in kundenspezifischen Projekten freigeben sind* • *Es liegt ein aktuelles Projekt zur Planung einer kundenindividuellen Anlage vor*	
Nach-bedingungen	• *Engineering der kundenindividuellen Anlage abgeschlossen oder in einen reiferen Zustand überführt*	
Beschreibung in Schritten	1. *Analyse der kundenspezifischen Anforderungen an die Anlage durch Fachspezialisten und Projektleiter* 2. *Anfertigung erster funktionaler Entwürfe des Verfahrens sowie der Anlage* 3. *Interdisziplinäre Abstimmung der Entwürfe* 4. *Selektion der geeigneten und verfügbaren wiederverwendbaren Einheiten anhand von konkreten kundenspezifischen Anforderungen und Funktionen* 5. *Konfiguration der wiederverwendbaren Einheiten* 6. *Konsolidierung der Lösung* 7. *Freigabe der erarbeiteten Lösung der Anlage für Beschaffung, Fertigung etc.*	
Erweiterungen/ Variation	*Liegen für einige Teile der Anlage keine wiederverwendbaren Einheiten vor, müssen diese Anteile neu entwickelt und mit den wiederverwendbaren Einheiten zu einer Lösung integriert werden*	
Quellen	*[ORD+01], [VDI/VDE 3695-3], [MAG12], [HAWO12], [RGF+12], [UZU13], [MAH14]*	
Anforderungen	*Anforderung M-1:* *Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen* *Anforderung M-2:* *Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren* *Anforderung M-6:* *Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein* *Anforderung M-7:* *Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können* *Anforderung M-9:* *Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung* *Anforderung E-3:* *Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden* *Anforderung E-4:* *Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten* *Anforderung W-2:* *Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein*	

Anhang B: Anforderungen an ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept

Die Bezüge zwischen den verschiedenen Anforderungen lassen sich unterteilen in einseitige und gegenseitige Bezüge. Dabei bedeutet ein einseitiger Bezug („Erfordert (…)“), dass die jeweilige Anforderung nur umgesetzt werden kann, wenn die genannte Anforderung umgesetzt wird. Eine gegensätzliche Nennung wird nicht vorgenommen. Gegenseitige Bezüge („Bezug zu (…)“) dokumentieren eine starke Abhängigkeit zweier Anforderungen.

Anforderung M-1: Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 3, Use-Case 4, Use-Case 6, [ORD+01], [MAJA10A], [RGF+12], [HLO+14], [FLV15A]*
Beschreibung	*Diese Anforderung repräsentiert den Bedarf eines systematischen und abgestimmten Vorgehens im Rahmen des Engineerings. Dies ist insbesondere der Fall, wenn mehrere Gewerke, die nicht zwingend einem Unternehmen angehören, in einer Engineering-Organisation zusammen arbeiten.*
Begründung	*Um Risiken, die das unsystematische Wiederverwenden von Lösungen bzw. Lösungsbestandteilen (vgl. Use-Case 1) aufweist, zu reduzieren, bedarf es eines definierten Vorgehens, das nicht nur die Anwendung der wiederverwendbaren Einheiten, sondern auch deren Entwicklung und Pflege systematisiert.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-4, Anforderung M-5, Anforderung M-6, Anforderung M-8, Anforderung E-1 und Anforderung W-2*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept definiert ein systematisches Vorgehen für die Entwicklung, die Pflege sowie die Anwendung der wiederverwendbaren Einheiten.*

Anforderung M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 2, Use-Case 4, Use-Case 6 [FFV12A], [HAWO12], [MAG12], [HLO+14]*
Beschreibung	*Die Anforderung adressiert den Bedarf der Integration mehrerer am Engineering beteiligter Gewerke. Diese Gewerke variieren je nach Anwendungsdomäne stark. Im Bereich der verfahrenstechnischen Anlagen können dies die Verfahrenstechnik (als führendes Gewerk), die Apparateplanung, die Elektrotechnik und die Automatisierungstechnik sein.*
Begründung	*Wie Use-Case 2 zeigt, ist auch eine feingranulare und disziplinspezifische Wiederverwendung möglich und bietet Vorteile bezüglich der Reduktion grundlegender Aufgaben (Instanziierung wiederkehrender Objekte). Um jedoch ein Potential erschließen zu können, welches über das der feingranularen Wiederverwendung hinausgeht, bedarf es der gewerkeübergreifenden Zusammenarbeit und Koordination der Dekomposition des zu entwickelnden Systems, also beispielsweise der automatisierten Anlage.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-1, Anforderung M-9, Anforderung E-1 und Anforderung E-2* *Bezug zu Anforderung O-1 und Anforderung W-1*
Erfüllungskriterium	*Es wird das führende Gewerk sowie mindestens eines der nachfolgenden Gewerke in die Einführung sowie die Umsetzung des Wiederverwendungskonzepts involviert. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn zumindest verschiedenartige Artefakte mehrerer Gewerke berücksichtigt und kombiniert werden.*

Anforderung M-3: Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können

Quellen	*Use-Case 3, [VDI/VDE 3695-3]*
Beschreibung	*Die als wiederverwendbare Einheit zu entwickelnde Funktion muss hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung überprüft werden.*
Begründung	*Nicht jede Funktion eignet sich gleichermaßen dazu, als wiederverwendbare Einheit aufbereitet zu werden. Die Gründe dafür sind mannigfaltig und umfassen unter anderem eine seltene Verwendung, einen schrumpfenden Markt, eine hohe Varianz, einen sehr kurzen Innovationszyklus oder einen hohen Neuheitsgrad in der Organisation sowie das damit verbundene Risiko. Um kostenintensive Fehlentwicklungen zu vermeiden, sind wiederverwendbare Einheiten vor der Aufbereitung zur Wiederverwendung hinsichtlich der Eignung zur Wiederverwendung zu überprüfen.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Bezug zu Anforderung M-9*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept sieht Techniken vor, um Funktionen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung zu bewerten. Diese Bewertung muss Faktoren, wie die Charakteristika der Funktion und deren Umsetzung, die Fähigkeiten und Kenntnisse der Engineering-Organisation sowie die Entwicklung der potentiellen Märkte umfassen.*

Anforderung M-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können

Quellen	*Use-Case 4, [TGK+04], [MAG12], [ODU13], [HLO+14]*
Beschreibung	*Das Wiederverwendungskonzept muss es ermöglichen, wiederverwendbare Einheiten aus bestehenden und erprobten Lösungen zu extrahieren und diese systematisch aufzubereiten, sodass diese nicht von gänzlich neu entwickelten wiederverwendbaren Einheiten zu differenzieren sind.*
Begründung	*Es ist davon auszugehen, dass Engineering-Organisationen bereits weitreichende Projekterfahrung in den Bereichen haben, für die wiederverwendbare Einheiten zu entwickeln sind. Um den Aufwand zu reduzieren und bereits entwickelte Lösungen nutzen zu können, muss das Wiederverwendungskonzept die systematische Extraktion und Aufbereitung wiederverwendbarer Einheiten aus bestehenden Lösungen ermöglichen.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Bezug zu Anforderung M-1*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept sieht die systematische Extraktion wiederverwendbarer Einheiten aus bestehenden Lösungen vor.*

Anforderung M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 4, Use-Case 5, [MAG12]*
Beschreibung	*Neu entwickelte wiederverwendbare Einheiten müssen einen definierten Freigabe- und Qualitätssicherungsprozess durchlaufen, bevor diese im Engineering einer automatisierten Anlage wiederverwendet werden dürfen. Diese Überprüfung kann teilautomatisiert oder manuell erfolgen.*
Begründung	*Eine systematische Überprüfung der Qualität wiederverwendbarer Einheiten ist die notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Wiederverwendung und die Akzeptanz des Konzeptes seitens der Anwender.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	-
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept sieht einen systematischen Freigabeprozess der wiederverwendbaren Einheiten vor, der anhand transparenter Kriterien und Techniken zu erfolgen hat und interdisziplinäre Aspekte in Betracht zieht.*

Anforderung M-6: Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein

Quellen	*Use-Case 2, Use-Case 6, [MAG12], [HLO+14], [MAH14]*
Beschreibung	*Wiederverwendbare Einheiten müssen in Verbindung mit spezifizierten Merkmalen und Funktionen abgelegt werden. Bei der Verwendung von quantifizierbaren Parametern sind ggf. auch Bereiche möglicher Ausprägungen anzugeben. In dieser Spezifikation müssen auch mögliche variable Anteile oder Parameter explizit zu erkennen sein.* *Die Form der Speicherung (Datenbank o.Ä.), sowie die Art des Zugriffes eines potentiellen Anwenders (Fachspezialist) darauf, sind dabei nicht entscheidend, so lange eine systematische Wiederauffindbarkeit sichergestellt werden kann.*
Begründung	*Eine systematische Auffindbarkeit der wiederverwendbaren Einheiten kann nur dann erreicht werden, wenn jede wiederverwendbare Einheit adäquat spezifiziert ist und diese Spezifikation auch von Anwendern durchsucht und verstanden werden kann.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-9, Anforderung E-2 und Anforderung E-3* *Bezug zu Anforderung M-1 und Anforderung W-1*
Erfüllungskriterium	*Wiederverwendbare Einheiten werden in Kombination mit den relevanten Funktionen und Parameterausprägungen unter Berücksichtigung der Variabilität abgelegt. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn dies zwar konzeptionell möglich, nicht jedoch explizit beschrieben ist. Die Erfüllung dieser Anforderung korreliert jedoch stark mit der möglichen Umsetzungen in Engineering-Werkzeugen.*

Anforderung M-7: Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können

Quellen	*Use-Case 6, [VDI/VDE 3695-2], [MAG12], [BRSC12]*
Beschreibung	*Im Rahmen des Engineerings werden einige Anteile der Anlage mittels wiederverwendbarer Einheiten realisiert, wohingegen ggf. auch Teile der Anlage durch neu entwickelte Artefakte realisiert werden müssen. Ein systematisches Wiederverwendungskonzept muss die Kombination dieser beiden Lösungswege ermöglichen. Unabhängig davon, wie hoch der Anteil wiederverwendeter Artefakte an der Gesamtlösung ist, muss diese Lösung die Kundenanforderungen erfüllen.*
Begründung	*Aufgrund der Größe einer automatisierten Anlage, aber auch innovativer Technologien oder Kundenanfragen, die außerhalb des Kerngeschäfts der Engineering-Organisation liegen, kann der Fall auftreten, dass Teile einer automatisierten Anlage neu entwickelt werden müssen und nicht durch wiederverwendbare Einheiten realisiert werden können.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	-
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept sieht im Bereich der projektabhängigen Tätigkeiten die Kombination von wiederverwendeten und neu entwickelten Inhalten vor, sodass sich eine kombinierte Lösung erarbeiten lässt.*

Anforderung M-8: Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen

Quellen	*Use-Case 5, [VDI/VDE 3695-2], [MAG12], [UZU13]*
Beschreibung	*Diese Anforderung thematisiert den Fall, dass im Betrieb bestehender Anlagen neue Erkenntnisse gewonnen werden, die auch bereits realisierte oder zukünftige wiederverwendbare Einheiten betreffen (z.B. fehlerhafte Komponenten oder Konstruktionen, etc.). In Folge dessen muss entschieden werden, ob eine Aktualisierung bestehender wiederverwendbarer Einheiten vorgenommen werden muss oder gar eine Revision bestehender Anlagen nötig ist.*
Begründung	*Trotz eines systematischen Vorgehens im Engineering und der Verwendung von qualitätsgesicherten Artefakten können Fehler auftreten, die erst im Betrieb der Anlage erfasst werden können. Diese Fehler oder zumindest deren Auswirkung sind auf ein Minimum zu reduzieren, in dem eine kontinuierliche Verbesserung der wiederverwendbaren Einheiten vorgenommen wird.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung W-2*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept sieht eine systematische Berücksichtigung von Erkenntnissen aus Service und Instandhaltung in der Entwicklung und der Aktualisierung der wiederverwendbaren Einheiten vor.*

Anforderung M-9: Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung

Quellen	*Use-Case 4, Use-Case 6, [VDI 2221], [AKI94], [STO97], [ORD+01], [BLE11], [ODU13], [LSS+14], [MAH14], [HLO+14]*
Beschreibung	*Die Funktionsorientierung stellt eine abstrakte und dennoch für Anwender eingängige Möglichkeit dar, die Fähigkeiten eines Systems zu definieren, zu beschreiben und zu erfassen.*
Begründung	*Gerade ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept bedarf einer gemeinsamen Basis, auf der die Abstimmung der verschiedenen wiederzuverwendenden Inhalte zu geschehen hat. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Definition der Einheiten (gerade auch hinsichtlich der Umsetzung in Maschinen, Apparaten, Hardware und Software) durchaus zwischen den verschiedenen Gewerken abweichen kann. Um die Definition der wiederzuverwendenden Inhalte im Laufe der abgedeckten Phasen des Engineerings dennoch vornehmen zu können, stellen Funktionen eine adäquate semantische Basis dar.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Bezug zu Anforderung E-1*
Erfüllungskriterium	*Es existiert eine Technik, um eine gewerkeübergreifende Definition wiederverwendbarer Inhalte anhand von Funktionen vorzunehmen. Allerdings muss diese Definition nicht zwingend auf allen Granularitätsebenen zwischen den beteiligten Gewerken deckungsgleich sein. Es muss jedoch möglich sein diese ggf. abweichenden Definitionen zueinander in Relation zu setzen.*

Anforderung E-1: Die Dekomposition muss sich an domänenspezifischen Normen orientieren

Quellen	*Use-Case 3, Use-Case 4, [ORD+01], [HAWO12], [UDK+12], [UZU13]*
Beschreibung	*Die Dekomposition der zu entwickelnden Anlagen soll sich an einschlägigen Normen der Domäne orientieren. Hierbei sind für die Prozesstechnik [DIN EN 61512-1], [DIN EN ISO 10628], [NE 33] oder [DIN 6779-13] zu nennen.*
Begründung	*Die Dekomposition der automatisierten Anlage stellt – insbesondere für interdisziplinäre Ansätze – eine wichtige Grundlage für die Modularisierung und folglich für die systematische Wiederverwendung dar. Die Abstimmung dieser Dekomposition kann erleichtert werden, wenn diese anhand einschlägiger Normen orientiert wird, die zwischen den beteiligten Gewerken abzustimmen sind.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-1* *Bezug zu Anforderung M-9 und Anforderung O-1*
Erfüllungskriterium	*Die Dekomposition der Anlage wird gewerkeübergreifend abgestimmt und anhand einschlägiger Normen strukturiert.*

Anforderung E-2: Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 4, [MAJA10B], [BLE11], [FFV12A]*
Beschreibung	*Bei allen Tätigkeiten im Rahmen eines wiederverwendungsbasierten Engineerings, also sowohl der Entwicklung als auch der Anwendung wiederverwendbarer Einheiten, müssen Relationen zu relevanten Artefakten anderer Gewerke modelliert und berücksichtigt werden.*
Begründung	*Ein interdisziplinärer Wiederverwendungsansatz kann erst dann gewinnbringend umgesetzt / angewendet werden, wenn die Relationen zwischen den Artefakten verschiedener Gewerke berücksichtigt werden. Erst so lässt sich ein Konzept umsetzen, welches nicht lediglich zu einer unabhängigen Parallelisierung der Arbeiten verschiedener Gewerke führt, sondern ein übergreifendes, systematisches Vorgehen ermöglicht. Darüber hinaus ermöglicht erst dies die Definition umfangreicher interdisziplinärer wiederverwendbarer Einheiten. Hierzu ist eine geeignete Modellierung, aber auch eine methodische Unterstützung der Entwickler, von Nöten.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung E-3* *Bezug zu Anforderung M-2*
Erfüllungskriterium	*Es werden neben den gewerkspezifischen auch gewerkeübergreifende Relationen modelliert bzw. dokumentiert und berücksichtigt.*

Anforderung E-3: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 3, Use-Case 4, Use-Case 6, [JGJ97, S. 8], [PBL05], [MAJA10A], [BLE11], [MJG11A], [UZU13], [HLO+14], [LSS+14], [FLV15A]*
Beschreibung	*Wiederverwendbare Einheiten sollen bei Ihrer Anwendung mittels vorgedachter Variabilität, beispielsweise in Form von Variabilitätspunkten, an den jeweiligen Kontext angepasst werden können.*
Begründung	*Erst die Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten ermöglicht eine systematische Anpassung dieser an kundenspezifische Anforderungen (also deren Kontext). Folglich ist bei der Entwicklung der wiederverwendbaren Einheiten Variabilität explizit zu berücksichtigen. Diese Berücksichtigung hat nicht unsystematisch und erfahrungsgetrieben zu erfolgen (vgl. Use-Case 1), sondern anhand von Modellen, welche die variablen Anteile einer wiederverwendbaren Einheit repräsentieren.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-1 und Anforderung E-2*
Erfüllungskriterium	*Die wiederverwendbaren Einheiten erlauben die explizite Modellierung von Variabilität. Hierbei ist in erster Linie nicht von Bedeutung welcher Ansatz zur Variabilitätsmodellierung angewendet wird. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn zumindest verschiedene Varianten wiederverwendbarer Artefakte vorgehalten werden.*

Anforderung E-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten

Quellen	*Use-Case 6, [BLE11], [BRSC12], [MAG12], [UZU13], [MAH14]*
Beschreibung	*Wiederverwendbare Einheiten müssen auch Teile der Dokumentation enthalten. Dies umfasst sowohl (1) die Dokumentation, die benötigt wird, um die wiederverwendbare Einheit anzuwenden, wie auch (2) mögliche Anteile einer zukünftigen Anlagendokumentation, welche die Teile betrifft, die durch die wiederverwendbare Einheit realisiert werden.*
Begründung	*Es muss davon ausgegangen werden, dass andere Personen die Entwicklung wiederverwendbarer Einheiten vornehmen, als diejenigen die diese Einheiten im Engineering anwenden. Um dies zu ermöglichen, ist eine adäquate Dokumentation vorzusehen (1).* *Geeignete wiederverwendbare Einheiten können es ermöglichen beträchtliche Anteile einer Anlage basierend auf wiederverwendbaren Einheiten zu realisieren. Da das Erstellen der Anlagendokumentation einen wichtigen Teil des Engineerings darstellt und mit erheblichen Aufwänden verbunden sein kann, können die wiederverwendbaren Einheiten genutzt werden, um auch die Erstellung der Anlagendokumentation zu unterstützen. Hierfür ist es nötig, dass bereits relevante Anteile der zukünftigen Anlagendokumentation vorliegen (2).*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-1* *Bezug zu Anforderung M-6*
Erfüllungskriterium	*Die wiederverwendbaren Einheiten enthalten Dokumentation (1) und (2) in adäquater Form.*

Anforderung O-1: Die Integration der Wiederverwendung in die Prozesse der Engineering-Organisation muss ermöglicht werden

Quellen	*[VDI/VDE 3695-3]*
Beschreibung	*Bestehende Engineering-Organisationen weisen meist bewährte Prozesse auf, die durch zunehmende Wiederverwendung zumindest in Teilen geändert werden müssen.*
Begründung	*Aufgrund der Projektorientierung des Engineerings kann sich keine Engineering-Organisation erlauben, die Prozesse ad hoc zu ändern. Das Risiko den Erfolg des aktuellen Projektes zu gefährden, wäre zu hoch. Aufgrund dessen muss ein Wiederverwendungskonzept eine systematische Einführung der Wiederverwendung sowie der damit einhergehenden Steigerung des Wiederverwendungsgrades der Lösungen ermöglichen / vorsehen.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung M-1 und Anforderung M-7* *Bezug zu Anforderung M-2*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept kann an bestehende Prozesse angepasst und systematisch eingeführt werden. Wird die Prozessintegration nicht explizit beschrieben, aber in einem Fallbeispiel schlüssig nachgewiesen, so wird diese Anforderung als bedingt erfüllt angesehen.*

Anforderung W-1: Das Wiederverwendungskonzept muss sich in bestehende Werkzeuge der Engineering-Organisation integrieren lassen

Quellen	*[MJG11A], [RGF+12], [HLO+14], [VLR14]*
Beschreibung	*Um die Akzeptanz der Anwender aber auch der Entscheider innerhalb einer Engineering-Organisation sicherzustellen, muss es möglich sein, das Wiederverwendungskonzept in verschiedenen, ggf. bestehenden, Engineering-Werkzeugen umzusetzen.*
Begründung	*Engineering-Organisationen nutzen meist eingespielte Verkettungen von Engineering-Werkzeugen, die es möglichst nicht zu ändern gilt, um ein potentielles Einführungsrisiko aber auch den zusätzlichen Schulungsaufwand der Anwender zu vermeiden.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung O-1* *Bezug zu Anforderung M-2*
Erfüllungskriterium	*Das Wiederverwendungskonzept kann in verschiedenen Engineering-Werkzeugen umgesetzt werden.*

Anforderung W-2: Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein

Quellen	*Use-Case 1, Use-Case 5, Use-Case 6, [VDI/VDE 3695-3]*
Beschreibung	*Die Wiederverwendung von gezielt aufbereiteten Einheiten muss dokumentiert werden. Dabei muss zum einen die Nachvollziehbarkeit von der wiederverwendbaren Einheit hin zu den Projekten, in denen diese eingesetzt wurde, möglich sein. Zum anderen muss auch aus kundenindividuellen Projekten nachvollzogen werden können, welche wiederverwendbaren Einheiten verwendet wurden.*
Begründung	*Neben ggf. vorhanden rechtlichen Forderungen in regulierten Industrien ist es auch generell erforderlich diese Nachvollziehbarkeit vorzusehen, um bei möglichen Fehlern, Rückrufen oder Aktualisierungen nachvollziehen zu können, welche wiederverwendbaren Einheiten respektive welche kundenindividuellen Anlagen davon betroffen sind. Diese Nachvollziehbarkeit ist die Grundlage der kontinuierlichen Verbesserung der vorgehaltenen wiederverwendbaren Einheiten.*
Bezüge zu anderen Anforderungen	*Erfordert Anforderung E-2*
Erfüllungskriterium	*Das Konzept sieht die Dokumentation sowie die Nachvollziehbarkeit der Beziehungen zwischen wiederverwendbaren Einheiten und deren Verwendung vor.*

Anhang C: Merkmal- und entscheidungsbasierte Variabilitätsmodellierung

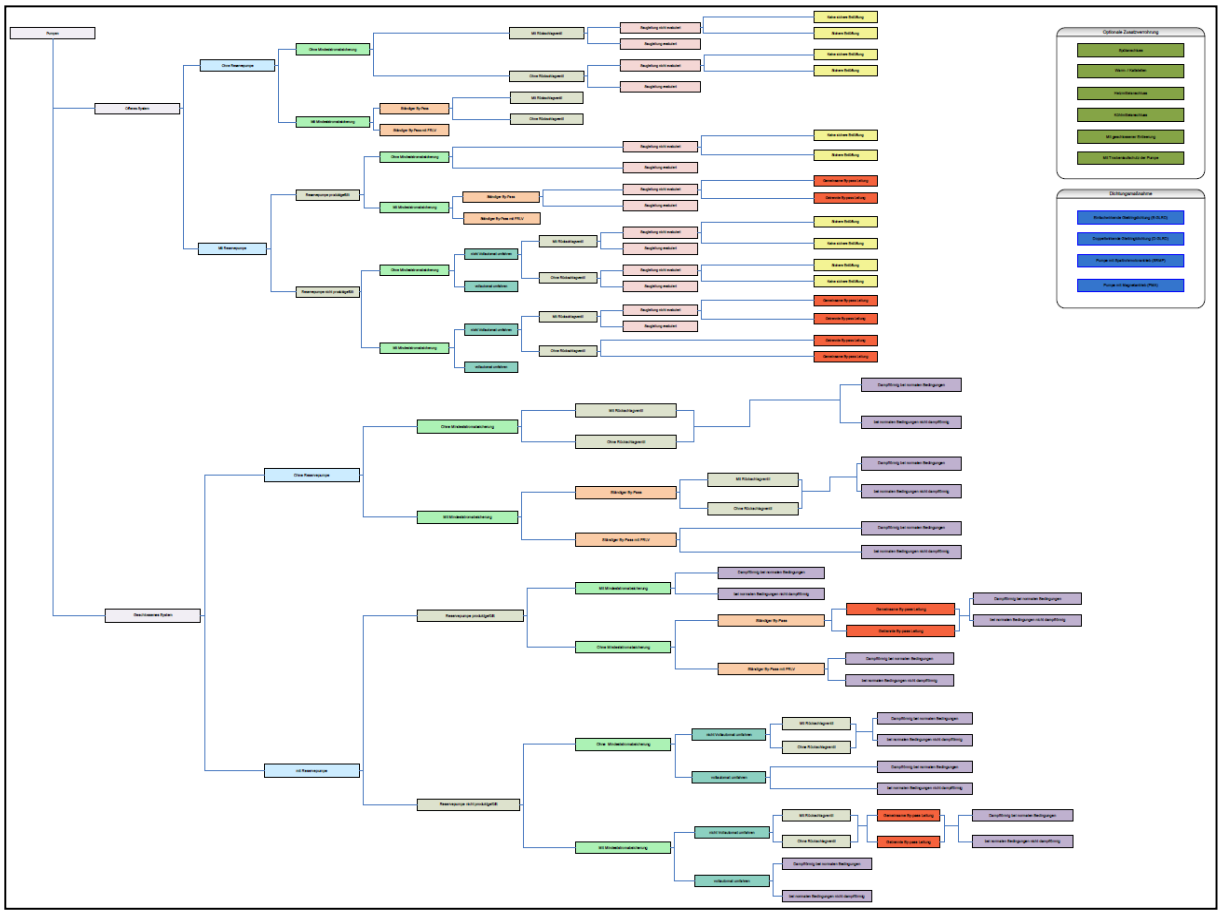

Abbildung C-1: Entscheidungsbaum für die Funktion „Pumpen“ [WSS10]

Der in Abbildung C-1 dargestellte Entscheidungsbaum ist [WSS10] entnommen und repräsentiert die Variabilität der Funktion „Pumpen“ aus apparatetechnischer Sicht. Die Abbildung dient der Repräsentation der Variabilität. Mittels der Farbcodierung werden Designentscheidungen verdeutlicht. Alle Elemente derselben Farbe betreffen also denselben funktionalen oder technischen Variationspunkt. Eine detaillierte Ansicht kann dem Anhang der referenzierten Quelle in digitaler Form entnommen werden.

Das in Abbildung C-2 dargestellte Merkmalmodell repräsentiert dieselbe Variabilität wie der Entscheidungsbaum in Abbildung C-1. Bereits der quantitative Vergleich der zu modellierenden Elemente verdeutlicht, zu welch großer Redundanz eine entscheidungsbasierte Modellierung der Variabilität führen kann. Im Gegensatz dazu ermöglichen merkmalbasierte Ansätze eine weitaus kompaktere Darstellung und geben darüber hinaus keine vorgeschriebene, sequenzielle Abarbeitung der Variationspunkte vor.

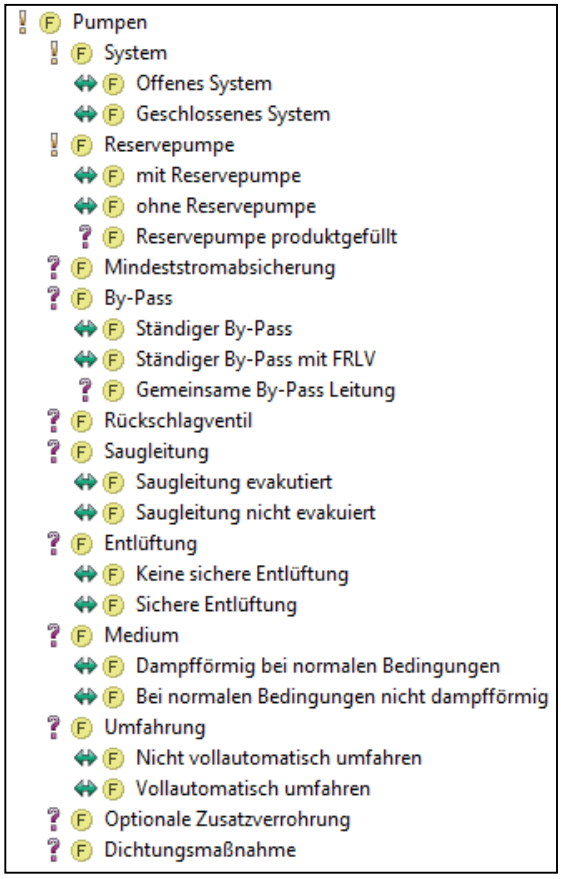

Abbildung C-2: Merkmalmodell[55] für die Funktion „Pumpen“ basierend auf [WSS10]

[55] Das vorliegende Merkmalmodell wurde, wie alle nachfolgenden Variabilitätsmodelle, mittels *pure::variants* erstellt.

Anhang D: Ergebnisse und Modelle der Fallstudie „Meerwasserentsalzungsanlage“

Tabelle D-1: Exemplarische Anforderungen für die Funktion „Meerwasser gewinnen“

Kategorie der Anforderung	Nr.	Anforderungen	Variabilitäts-behaftet
Funktionale Anforderungen	*F-1.1*	Der Anlageteil muss Meerwasser fördern.	Nein
	F-1.2	Der Durchfluss ist zu messen.	Nein
	F-1.3	Der Durchfluss soll geregelt werden können.	Ja
	F-1.4	Der Füllstand ist zu messen.	Nein
	F-1.5	Der Füllstand soll geregelt werden können.	Ja
	F-1.6	Der Druck ist zu messen.	Nein
	F-1.7	Der Motorstrom ist zu messen.	Nein
	F-1.8	Es ist eine Desinfektion des Meerwassers zu ermöglichen.	Nein
Qualitäts-anforderungen	*Q-1.1*	Förderrate 10.000 m³/d oder 20.000 m³/d.	Ja
	Q-1.2	Sicherheitsrelevante Systeme sind redundant auszuführen.	Nein
Rand-bedingungen	*R-1.1*	Das Wasser soll an verschiedenen Küstenarten gewonnen werden können.	Ja
	R-1.2	Das Desinfektionsmittel soll zentral oder dezentral verwahrt werden können.	Ja
Administrative Anforderungen	*A-1.1*	Die Variabilität soll mittels Merkmalmodellen abgebildet werden.	Nein
	A-1.2	Es sind die Schnittstellen jeder wiederverwendbaren Einheit zu beschreiben.	Nein
	A-1.3	Es sollen vorzugsweise bereits existierende Engineering-Objekte genutzt werden.	Nein

- Meerwasser gewinnen
  - Funktion
    - Wasser fördern
      - < 10.000 m³/d
      - > 10.000 m³/d
    - Zusatzmedien dosieren
      - Hypochlorit
        - Zentrale Speicherung
        - Dezentrale Speicherung
    - Prozessleittechnische Funktionen
      - Durchfluss
        - Durchfluss messen
        - Alarm Durchfluss
        - Durchfluss regeln
      - Füllstand
        - Füllstand messen
        - Alarm Füllstand
        - Füllstand regeln
      - Druck
        - Druck messen
        - Alarm Druck
      - Motorspannung
        - Motorspannung messen
        - Alarm Motorspannung
  - Schnittstellen
    - Ethernet Schnittstelle
    - Visualisierung
    - Anbindung Meerwassertank
  - Parameter
    - Strandform
      - Sandstrand
      - Felsstrand
      - Steilküste

Abbildung D-1: Merkmalmodell der Funktion „Meerwasser gewinnen“

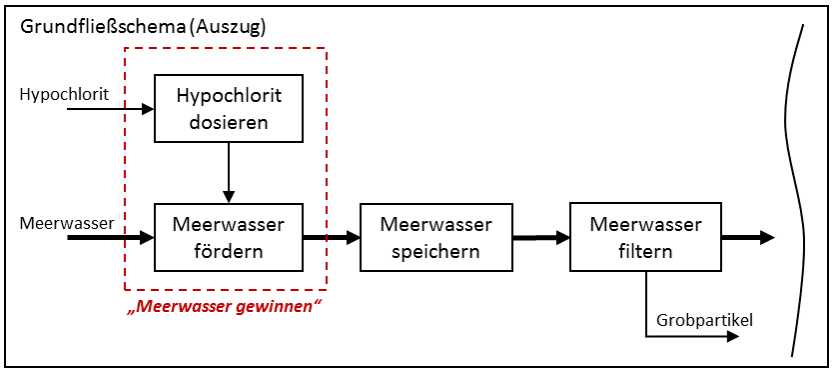

Abbildung D-2: Ausschnitt „Meerwasser gewinnen“ aus Grundfließschema

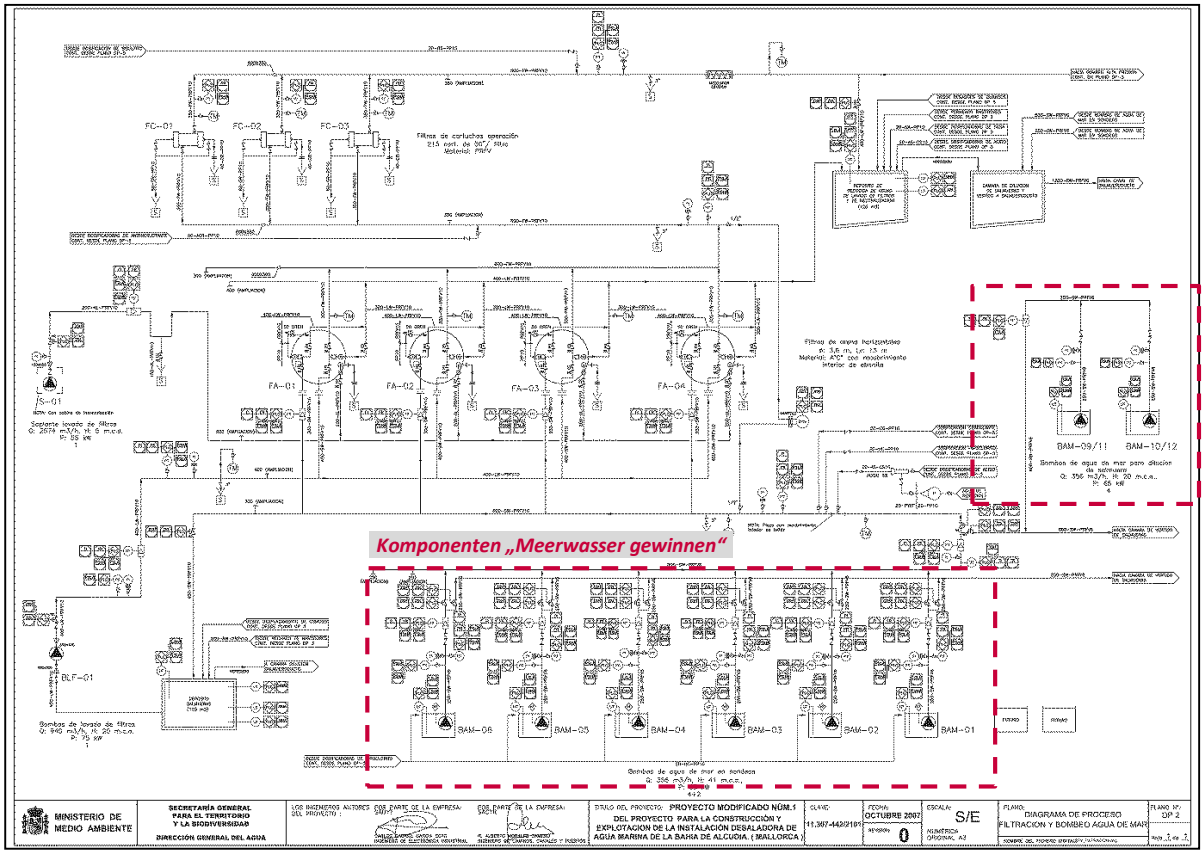

Abbildung D-3: Identifikation der Funktion „Meerwasser gewinnen“ in Verfahrensfließschema [SPES_XT15A]

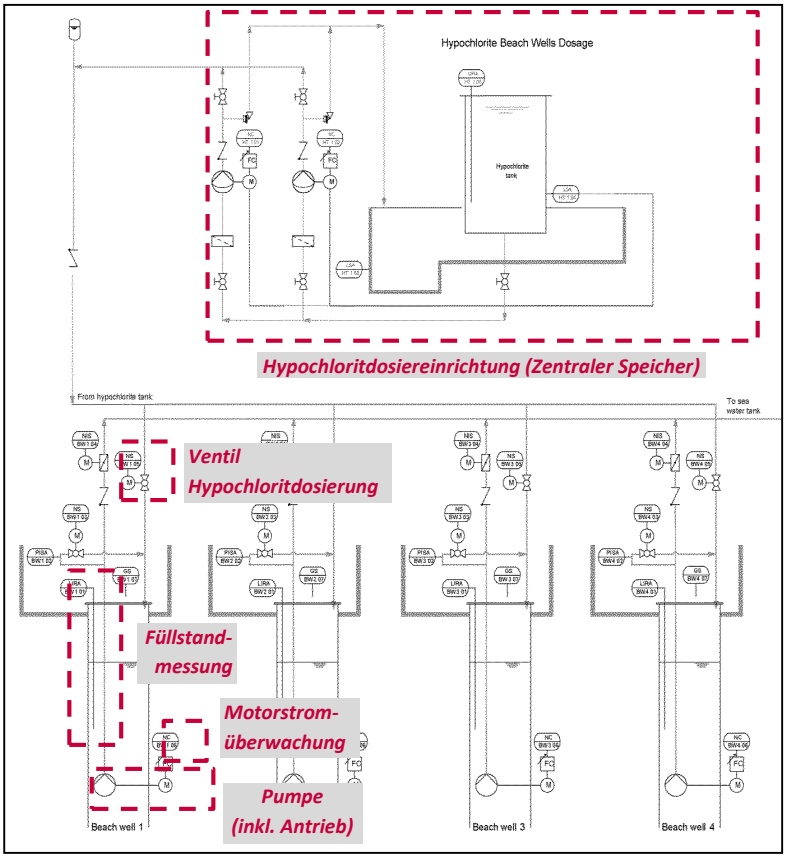

Abbildung D-4: Relevanter Ausschnitt des R&I-Fließschema für „Meerwasser gewinnen“ [SPES_XT15A]

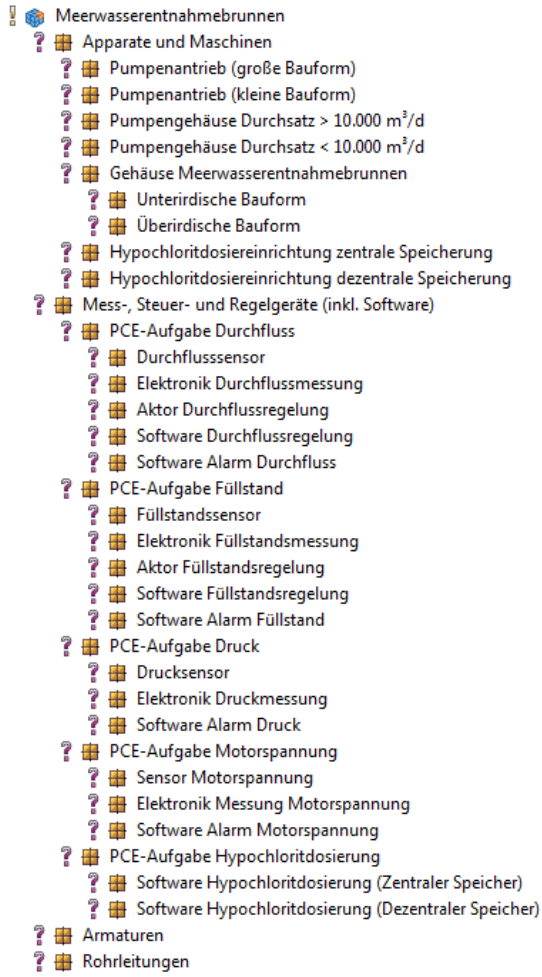

Abbildung D-5: Familienmodell der Funktion „Meerwasser gewinnen“

Tabelle D-2: Relationsbehaftete Merkmale der Funktion „Meerwasser gewinnen“

Visible Name	Type	Variation Type	Relations
Wasser fördern	ps:feature	ps:mandatory	Requires: "Gehäuse Meerwasserentnahmebrunnen"
< 10.000 m³/d	ps:feature	ps:alternative	Requires: "Pumpenantrieb (kleine Bauform)"; Requires: "Pumpengehäuse Durchsatz < 10.000 m³/d"
> 10.000 m³/d	ps:feature	ps:alternative	Requires: "Pumpenantrieb (große Bauform)"; Requires: "Pumpengehäuse Durchsatz > 10.000 m³/d"
Zentrale Speicherung	ps:feature	ps:alternative	Requires: "Hypochloritdosiereinrichtung zentrale Speicherung"; Requires: "Software Hypochloritdosierung (Zentraler Speicher)"
Dezentrale Speicherung	ps:feature	ps:alternative	Requires: "Hypochloritdosiereinrichtung dezentrale Speicherung"; Requires: "Software Hypochloritdosierung (Dezentraler Speicher)"
Durchfluss messen	ps:feature	ps:mandatory	Requires: "Durchflusssensor"; Requires: "Elektronik Durchflussmessung"
Alarm Durchfluss	ps:feature	ps:optional	Requires: "Software Alarm Durchfluss"; Requires: "Durchfluss messen"
Durchfluss regeln	ps:feature	ps:optional	Conflicts: "Füllstand regeln"; Requires: "Durchfluss messen"; Requires: "Aktor Durchflussregelung"; Requires: "Software Durchflussregelung"
Füllstand messen	ps:feature	ps:mandatory	Requires: "Füllstandssensor"; Requires: "Elektronik Füllstandsmessung"
Alarm Füllstand	ps:feature	ps:optional	Requires: "Füllstand messen"; Requires: "Software Alarm Füllstand"
Füllstand regeln	ps:feature	ps:optional	Conflicts: "Durchfluss regeln"; Requires: "Füllstand messen"; Requires: "Software Füllstandsregelung"; Requires: "Aktor Füllstandsregelung"
Druck messen	ps:feature	ps:mandatory	Requires: "Drucksensor"; Requires: "Elektronik Druckmessung"
Alarm Druck	ps:feature	ps:optional	Requires: "Druck messen"; Requires: "Software Alarm Druck"
Motorspannung messen	ps:feature	ps:mandatory	Requires: "Sensor Motorspannung"; Requires: "Elektronik Messung Motorspannung"
Alarm Motorspannung	ps:feature	ps:optional	Requires: "Motorspannung messen"; Requires: "Software Alarm Motorspannung"
Sandstrand	ps:feature	ps:alternative	Requires: "Unterirdische Bauform"

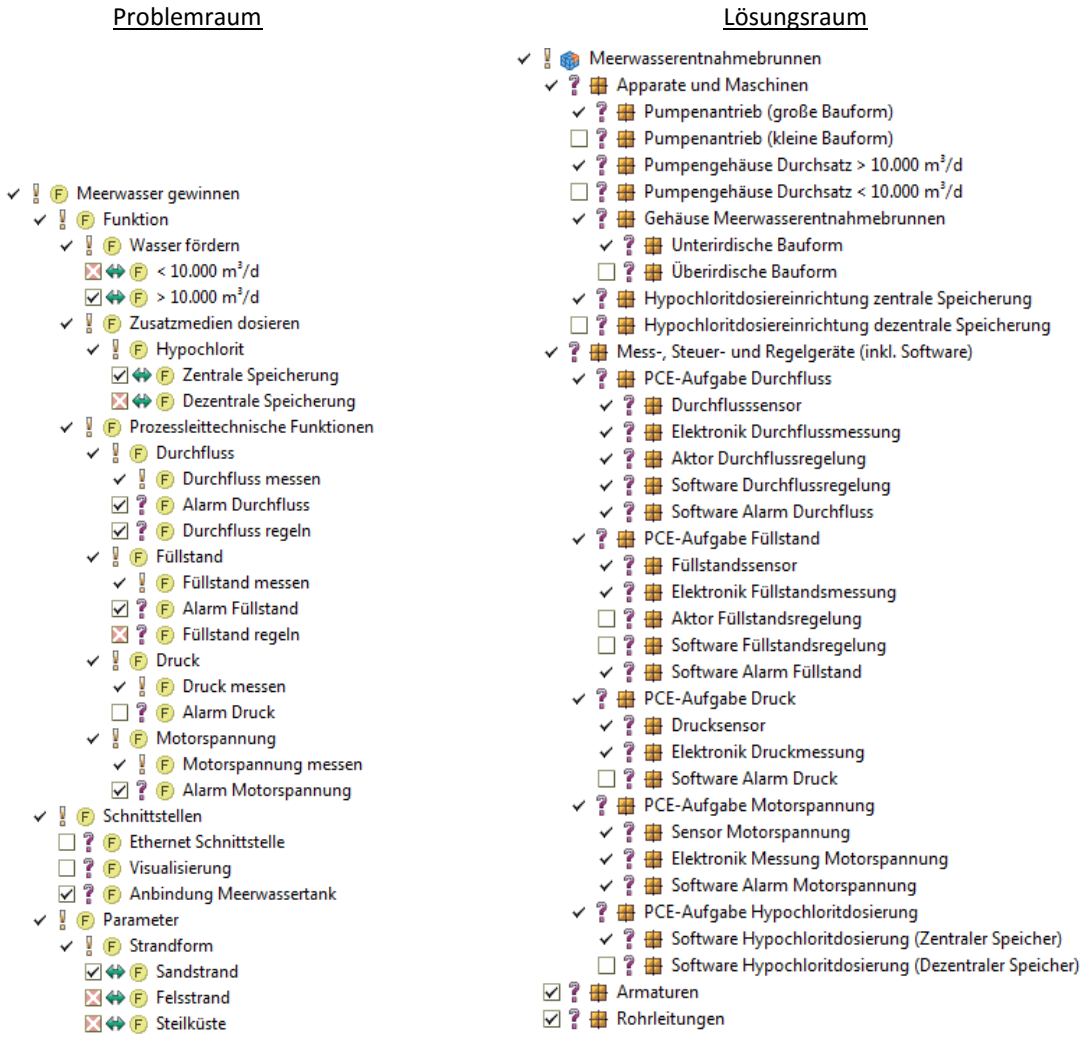

Abbildung D-6: Beispielhafte Konfiguration der wiederverwendbaren Einheit „Meerwasser gewinnen“

Tabelle D-3: Vereinfachte tabellarische Darstellung einer Konfiguration des Familienmodells

Unique ID	Visible Name	Type	Parent Unique ID	Parent Visible Name
igrAd5mG2i5HMxs0A	Meerwasserentnahmebrunnen	ps:family		
iVBaTuHknUwY8z_Zj	Apparate und Maschinen	ps:component	igrAd5mG2i5HMxs0A	Meerwasserentnahmebrunnen
iNWghK2cvgFTrA5Ga	Pumpenantrieb (große Bauform)	ps:component	iVBaTuHknUwY8z_Zj	Apparate und Maschinen
iNgla26ZMDKVgJCCu	Pumpengehäuse Durchsatz > 10.000 m³/d	ps:component	iVBaTuHknUwY8z_Zj	Apparate und Maschinen
izKtKi-bjIZ9Xb1QX	Gehäuse Meerwasserentnahmebrunnen	ps:component	iVBaTuHknUwY8z_Zj	Apparate und Maschinen
igsSxxFw9lLumdZNG	Unterirdische Bauform	ps:component	izKtKi-bjIZ9Xb1QX	Gehäuse Meerwasserentnahmebrunnen
ib7iCcG-5RJ74MPSb	Hypochloritdosiereinrichtung zentrale Speicherung	ps:component	iVBaTuHknUwY8z_Zj	Apparate und Maschinen
iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)	ps:component	igrAd5mG2i5HMxs0A	Meerwasserentnahmebrunnen
iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss	ps:component	iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)
iBOTB8rNjjkkwdNG1	Durchflusssensor	ps:component	iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss
izkDBeqEfcLj6WT0k	Elektronik Durchflussmessung	ps:component	iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss
iOpgZ5OTqMkTMlnib	Aktor Durchflussregelung	ps:component	iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss
iQhCJ14Bs2Kk9XKAG	Software Durchflussregelung	ps:component	iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss
iOywx6sca1NA7wSXr	Software Alarm Durchfluss	ps:component	iqcdVUadC5zchDPR-	PCE-Aufgabe Durchfluss
iXUbFuZl8Z5rU4cuz	PCE-Aufgabe Füllstand	ps:component	iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)
i7e6_DgEDDtZFOiAr	Füllstandssensor	ps:component	iXUbFuZl8Z5rU4cuz	PCE-Aufgabe Füllstand
iy46m8h9vXT0v9VEU	Elektronik Füllstandsmessung	ps:component	iXUbFuZl8Z5rU4cuz	PCE-Aufgabe Füllstand
iKAwEsHh1f0t2la4O	Software Alarm Füllstand	ps:component	iXUbFuZl8Z5rU4cuz	PCE-Aufgabe Füllstand
ixSXq5nNdxu_Z6fBw	PCE-Aufgabe Druck	ps:component	iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)
iSRQLTkUqIto9JFKq	Drucksensor	ps:component	ixSXq5nNdxu_Z6fBw	PCE-Aufgabe Druck
i2VhrZwYvN1iiJk2L	Elektronik Druckmessung	ps:component	ixSXq5nNdxu_Z6fBw	PCE-Aufgabe Druck
i04ja_rcIypn4LIc_	PCE-Aufgabe Motorspannung	ps:component	iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)
ikTqOBPHvx71b0Tou	Sensor Motorspannung	ps:component	i04ja_rcIypn4LIc_	PCE-Aufgabe Motorspannung
iJyoyxzeTACdxkwRm	Elektronik Messung Motorspannung	ps:component	i04ja_rcIypn4LIc_	PCE-Aufgabe Motorspannung
idsJPvKh4eozwHzzK	Software Alarm Motorspannung	ps:component	i04ja_rcIypn4LIc_	PCE-Aufgabe Motorspannung
ipE7gw0TixRwL4R9b	PCE-Aufgabe Hypochloritdosierung	ps:component	iI4zjZufTezXQ22Sb	Mess-, Steuer- und Regelgeräte (inkl. Software)
iChqfN4aMJmYKOULv	Software Hypochloritdosierung (Zentraler Speicher)	ps:component	ipE7gw0TixRwL4R9b	PCE-Aufgabe Hypochloritdosierung
iQOGrDFl78xa4NycD	Armaturen	ps:component	igrAd5mG2i5HMxs0A	Meerwasserentnahmebrunnen
iclEGP5QFwHJLBQc5	Rohrleitungen	ps:component	igrAd5mG2i5HMxs0A	Meerwasserentnahmebrunnen

Anhang E: Ergebnisse und Modelle der Fallstudie „Extraktiver Gasanalysator“

Tabelle E-1: Exemplarische Anforderungen für die Funktion „Gaskonzentration messen“

Kategorie der Anforderung	Nr.	Anforderungen	Variabilitäts-behaftet
Funktionale Anforderungen	*F-2.1*	Es ist die Messung der Gaskomponenten NO, NO_2, SO_2 vorzusehen.	Nein
	F-2.2	Es kann die Messung von O_2 vorgesehen werden.	Ja
	F-2.3	Es muss eine Justierung ohne Prüfgase ermöglicht werden.	Nein
	F-2.4	Eine analoge Messwertausgabe muss ermöglicht werden können.	Ja
	F-2.5	Eine Messgasüberwachung ist vorzusehen.	Nein
Qualitäts-anforderungen	*Q-2.1*	Die geforderte Messgasrate beträgt 40 dm^3/h.	Nein
	Q-2.2	NO soll zwischen 0 und 10 ppm oder zwischen 0 und 3000 ppm gemessen werden können.	Ja
	Q-2.3	NO_2 soll zwischen 0 und 50 ppm gemessen werden können.	Nein
	Q-2.4	SO_2 soll zwischen 0 und 50 ppm gemessen werden können.	Nein
	Q-2.5	O_2 soll zwischen 0 und 21 Vol-% gemessen werden können. (erfordert Anforderung F-2.2)	Ja
Rand-bedingungen	*R-2.1*	Das Gerät soll an verschiedene Umgebungsbedingungen angepasst werden können (explosionsgefährdete Zonen 0, 1, oder 2).	Ja
Administrative Anforderungen	*A-2.1*	Die Variabilität soll mittels Merkmalmodellen abgebildet werden.	Nein
	A-2.2	Es sind die Schnittstellen jeder wiederverwendbaren Einheit zu beschreiben.	Nein
	A-2.3	Es sind Klebstoffe gemäß aktueller Betriebsspezifikation zu verwenden.	Nein

- Extraktiver Gasanalysator
  - Funktionen
    - Feuchte messen
    - Gas foerdern
      - Externes An- und Abschaltung ermöglichen
    - Druck messen
      - Messgasdruckmessung
      - Barometrische Druckmessung
    - Durchfluss messen
    - Konzentration Gaskomponenten messen
      - Messmodul UV
        - Justiereinheit vorsehen
      - Konzentration messen NO
        - Messbereich NO 0 bis 10ppm
        - Messbereich NO 0 bis 3000ppm
      - Konzentration messen NO2
        - Messbereich NO2 0 bis 50ppm
      - Konzentration messen SO2
        - Messbereich SO2 0 bis 50ppm
      - Konzentration messen O2
        - Messbereih O2 0 bis 21 Vol.-Prozent
    - Messwert aufbereiten
      - Messgasdruckkorrektur vornehmen
      - Querempfindlichkeiten berechnen
    - Elektrische Leistung bereitstellen
      - Spannung 230V AC
      - Spannung 115V AC
      - Spannung 24V DC
  - Schnittstellen
    - Analoge Schnittstelle
      - 0 bis 20mA
      - 0 bis 20mA eigensicher
    - Optische Ausgabe
      - HMI
    - Digitale Schnittstelle
      - Ethernet Schnittstelle
      - CAN-BUS
      - MOD-BUS
  - Parameter
    - Umgebungstemperatur
      - Umgebungstemperatur > 40°C
    - Umgebungsbedingung
      - Kein Ex-Bereich
      - Ex Zone I
      - Ex Zone II

Abbildung E-1: Merkmalmodell „Gaskonzentration messen“

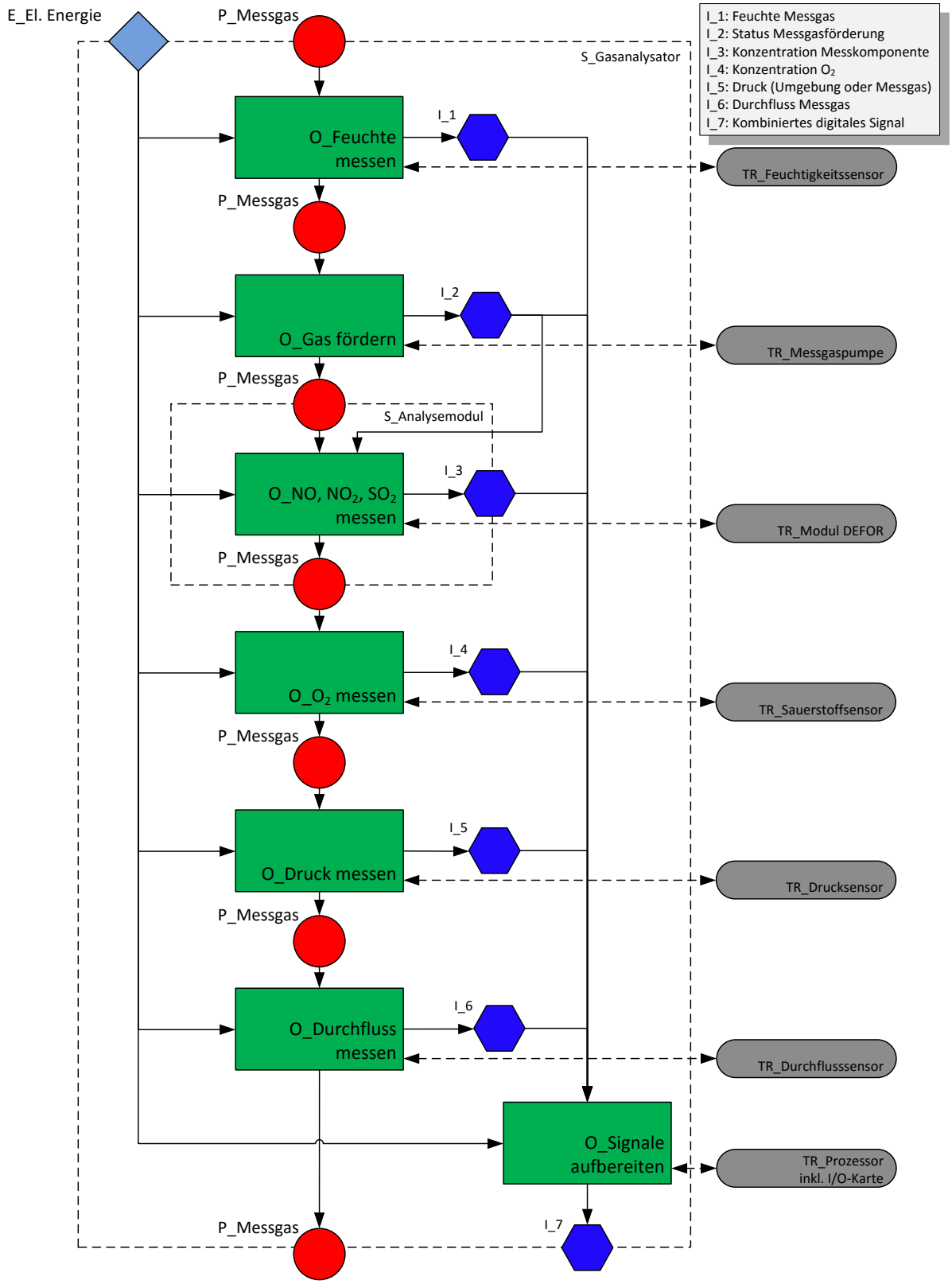

Abbildung E-2: Formalisierte Prozessbeschreibung „Gaskonzentration messen“

Abbildung E-3: Hierarchische Struktur der Familienmodelle Gasanalysator

Abbildung E-4: Familienmodell der Analysatoren

- Gehaeusetypen
  - Gehaeusetypen
    - Zone_1
      - Gehaeusetyp A Zone 1
      - Gehaeusetyp B Zone 1
      - Gehaeusetyp C Zone 1
    - Zone_2
      - Gehaeusetyp A Zone 2
      - Gehaeusetyp B Zone 2
    - Zone_kein_Ex
      - Gehaeusetyp A
      - Gehaeusetyp B
      - Gehaeusetyp C
      - Gehaeusetyp D
      - Gehaeusetyp E
  - Gasweg
    - Viton_verschlaucht
    - PTFE_verrohrt_1_Modul
    - PTFE_verrohrt_2_Modul
    - PTFE_verrohrt_3_Modul
    - PTFE_verrohrt_4_Modul
    - Edelstahl_verrohrt_1_Modul
    - Edelstahl_verrohrt_3_Modul
    - Edelstahl_verrohrt_4_Modul
    - Edelstahl_verrohrt_2_Modul
  - Gasanschluesse
    - Gaseingang_ausgang_6_mm_PVDF
    - Gaseingang_ausgang_6_mm_Swagelok
    - Gaseingang_ausgang_1_4Swagelok
  - Spuelanschluesse
    - Spuelgaseingang_ausgang_6_mm_PVDF
    - Spuelgaseingang_ausgang_8_mm_Swagelok
    - Spuelgaseingang_ausgang_1_4_Swagelok
    - Spuelgaseingang_ausgang_10_mm_Swagelok
  - Netzkabel
    - EU_Standard_Winkel
    - UK_Standard
    - EU_Standard_gerade
    - USA_Standard

Abbildung E-5: Familienmodell der Gehäuse

- HMI
  - Bedienteil_und_Anzeige
  - BCU_Basis_Control_Unit

Abbildung E-6: Familienmodell der HMI

- Messgasfoerderung_Ueberwachung
  - Messgaspumpe
    - verschlaucht
      - PVDF
      - PTFE
      - andere_Werkstoffe
    - verrohrt
  - Durchflusswaechter
  - Feuchtewaechter
  - Drucksensor
    - barometrische_Druckkomensation
    - Messgasdruckkomensation

Abbildung E-7: Familienmodell der Messgasförderung und Überwachung

- Sonstiges
  - Betriebsanleitung
    - Sprache_Betriebsanleitung_englisch
    - Sprache_Betriebsanleitung_deutsch
    - Sprache_Betriebsanleitung_franzoesisch
    - Sprache_Betriebsanleitung_spanisch
    - Sprache_Betriebsanleitung_russisch
    - Sprache_Betriebsanleitung_italienisch
    - Sprache_Betriebsanleitung_portugiesisch
  - Pruefung_der_Zertifikate
    - Werkzeugnis

Abbildung E-8: Familienmodell der sonstigen Komponenten

- Schnittstellen
  - I_O_Module
    - 1 I/O Modul
    - 2 I/O Module
    - I_O_Modul_fuer_Gehaeusemontage
    - I_O_Modul_fuer_Tragschienenmontage
    - Eigensichere_Messwertausgaenge
      - 1_eigensicherer_Messwertausgang
      - 2_eigensichere_Messwertausgaenge
      - 3_eigensichere_Messwertausgaenge
      - 4_eigensichere_Messwertausgaenge
      - 5_eigensichere_Messwertausgaenge
      - 6_eigensichere_Messwertausgaenge
      - 1_eigensicherer_Statussignalausgang
      - 2_eigensichere_Statussignalausgaenge
    - Eigensichere_Statusausgaenge
      - 1_eigensicherer_Statusausgang
      - 2_eigensicherer_Statusausgang
      - 3_eigensicherer_Statusausgang
      - 4_eigensicherer_Statusausgang
      - 5_eigensicherer_Statusausgang
      - 6_eigensicherer_Statusausgang
    - Software
      - Analogeingaenge
      - Digitaleingaenge
  - Kommunikationsbus
    - Ethernet
    - CAN_Bus
    - RS485
      - Modbus
      - Systembus
  - Messstellenumschaltung
    - 2_Messstellen
    - 4_Messstellen
    - 6_Messstellen

Abbildung E-9: Familienmodell der Schnittstellen

- Software
  - Messwertanzeige_1_bis_10
    - Komponente
    - Messwert
    - Einheit
  - Softwareoptionen
    - Externe_Querempf_korr_pro_Komp_werkss_eingest
    - Externe_Traegergaskorr_pro_Komponente_werkss_eingest
    - Erfassen_Anzeigen_von_1_ext_Analogsign_werkss_eingest
    - Erfassen_Anzeigen_von_2_ext_Analogsign_werkss_eingest
    - Messung_NO_NO2_Summenbldg_zu_NOx_und_Abb_als_Messkomp
  - EPA_Linearisierung
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_1_Messkomp
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_2_Messkomp
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_3_Messkomp
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_4_Messkomp
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_5_Messkomp
    - Zweiter_lin_und_kal_Messbereich_fuer_6_Messkomp
  - Daempfung
    - Konstante_Daempfung
      - Konst_Daempfung_Daempfung
      - Konst_Daempfung_Glaettung
      - Konst_Daempfung_Zeitkonstante
    - Dynamische_Daempfung
      - Dyn_Daempfung_Status_Ein_Aus
      - Dyn_Daempfung_Zeitkonstante
      - Dyn_Daempfung_Schwelle
  - Drift_Grenzwert
  - Software_Parameter
    - RS_485
      - Modul_Adresse
      - Baud_Rate
      - Data_Bits
      - Stop_Bits
      - Parity
    - Messkomponente_1
  - Justierung
    - Justierung_Messkomponente_1
      - Justierung_Drift_Grenzwerte
      - Justierergebnisse
      - Justierung_Driften
  - Basissoftware

Abbildung E-10: Familienmodell der Software

<u>Problemraum</u>

- Extraktiver Gasanalysator
  - Funktionen
    - Feuchte messen
    - Gas foerdern
      - Externes An- und Abschaltung ermöglichen
    - Druck messen
      - Messgasdruckmessung
      - Barometrische Druckmessung
    - Durchfluss messen
    - Konzentration Gaskomponenten messen
      - Messmodul UV
        - Justiereinheit vorsehen
      - Konzentration messen NO
        - Messbereich NO 0 bis 10ppm
        - Messbereich NO 0 bis 3000ppm
      - Konzentration messen NO2
        - Messbereich NO2 0 bis 50ppm
      - Konzentration messen SO2
        - Messbereich SO2 0 bis 50ppm
      - Konzentration messen O2
        - Messbereih O2 0 bis 21 Vol.-Prozent
    - Messwert aufbereiten
      - Messgasdruckkorrektur vornehmen
      - Querempfindlichkeiten berechnen
    - Elektrische Leistung bereitstellen
      - Spannung 230V AC
      - Spannung 115V AC
      - Spannung 24V DC
  - Schnittstellen
    - Analoge Schnittstelle
      - 0 bis 20mA
      - 0 bis 20mA eigensicher
    - Optische Ausgabe
      - HMI
    - Digitale Schnittstelle
      - Ethernet Schnittstelle
      - CAN-BUS
      - MOD-BUS
  - Parameter
    - Umgebungstemperatur
      - Umgebungstemperatur > 40°C
    - Umgebungsbedingung
      - Kein Ex-Bereich
      - Ex Zone I
      - Ex Zone II

<u>Lösungsraum</u>

- Analysatoren
  - Messmodul UV
  - Messmodul IR
  - Kombiniertes Messmodul
  - Messmodul Waermeleitfaehigkeit
  - Messmodul Sauerstoff Elektrochemisch
  - Messmodul Sauerstoff Paramagnetisch
- Gehaeusetypen
  - Gehaeusetypen
  - Gasweg
  - Gasanschluesse
  - Spuelanschluesse
  - Netzkabel
- HMI
  - Bedienteil_und_Anzeige
  - BCU_Basis_Control_Unit
- Messgasfoerderung_Ueberwachung
  - Messgaspumpe
  - Durchflusswaechter
  - Feuchtewaechter
  - Drucksensor
- Schnittstellen
  - I_O_Module
  - Kommunikationsbus
  - Messstellenumschaltung
- Software
  - Messwertanzeige_1_bis_10
  - Softwareoptionen
  - EPA_Linearisierung
  - Daempfung
  - Drift_Grenzwert
  - Software_Parameter
  - Justierung
  - Basissoftware
- Sonstiges
  - Betriebsanleitung
  - Pruefung_der_Zertifikate

Abbildung E-11: Partielle Konfiguration basierend auf Merkmalmodell und hierarchischen Familienmodellen

Literaturverzeichnis

Literatur

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der referenzierten Quellen, die nicht vom Autor stammen. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>] oder im Falle von Projektberichten mittels [SPES_XT <Jahr>] gekennzeichnet.

[AAF03] R. Alznauer, K. Auer, A. Fay: *Wiederverwendung von Automatisierungs-Informationen und -Lösungen.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 45 (3), S. 31-35, 2003.

[ABK+13] S. Apel, D. Batory, C. Kästner, G. Saake: *Feature-oriented software product lines: Concepts and implementation.* Berlin: Springer, 2013.

[AIS77] C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein: *A pattern language: Towns, buildings, construction.* New York: Oxford Univ. Press (Center for Environmental Structure series, 2), 1977.

[AKI94] K. Akiyama: *Funktionenanalyse: Der Schlüssel zu erfolgreichen Produkten und Dienstleistungen.* Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie Japan-Service, 1994.

[AND03] A. Andresen: *Komponentenbasierte Softwareentwicklung: Mit MDA, UML und XML.* München: Hanser, 2003.

[AND14] D.M. Anderson: *Design for Manufacturability: How to Use Concurrent Engineering to Rapidly Develop Low-Cost, High-Quality Products for Lean Production.* Hoboken: CRC Press, 2014.

[AND97] D.M. Anderson: *Agile Product Development for Mass Customization: How to develop and deliver products for mass customization, niche markets, JIT, build-to-order and flexible manufacturing.* Chicago, London, Singapore: IRWIN Professional Publishing, 1997.

[BAL09] H. Balzert: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering.* 3. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (Lehrbücher der Informatik), 2009.

[BAU05] I.M. Baumgart: *Modularisierung von Produkten im Anlagenbau.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation, 2005.

[BCG+13] H.-G. Baum, A.G. Coenenberg, T. Günther, P.M. Hamann: *Strategisches Controlling.* 5. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2013.

[BER01] G. Bernecker: *Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen: Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen.* 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Klassiker der Technik), 2001.

[BESÄ10] M. Bellgran, K. Säfsten: *Production Development: Design and Operation of Production Systems.* London: Springer, 2010.

[BEU03] D. Beuche: *Composition and Construction of Embedded Software Families.* Otto-v.-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik. Dissertation, 2003.

[BFG+02] J. Bosch, G. Florijn, D. Greefhorst, J. Kuusela, J.H. Obbink, K. Pohl: *Variability Issues in Software Product Lines.* In: F. van der Linden (Hrsg.): *Software Product-Family Engineering.* Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture notes in computer science), Vol. 2290, S. 13-21, 2002.

[BGK+11] B. Böhm, N. Gewald, A. Köhlein, J. Elger: *Mechatronic models as a driver for digital plant engineering.* In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 16. Tagung,* 2011.

[BIHO09] T. Bindel, D. Hofmann: *Projektierung von Automatisierungsanlagen: Eine effektive und anschauliche Einführung.* 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009.

[BLE11] C. Blees: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien.* Technische Universität Hamburg-Harburg. Dissertation, 2011.

[BOR61] K.-H. Borowski: *Das Baukastensystem in der Technik.* Berlin, Heidelberg: Springer (Wissenschaftliche Normung, Schriftenreihe, herausgegeben in Verbindung mit dem Seminar für Technische Normung an der Technischen Hochschule Hannover, 5), 1961.

[BRSC12] C. Bramsiepe, G. Schembecker: *Die 50%-Idee: Modularisierung im Planungsprozess: Anlagenplanung.* Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (5), S. 581-587, 2012.

[BRSC15] M. Brendelberger, Th. Scherwietes: *Engineering: Kapitel 8.1.* In: Früh, Maier et al. (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen.* 5. Auflage. München: DIV Dt. Industrieverlag, S. 632-650, 2015.

[BSR10] D. Benavides, S. Segura, A. Ruiz-Cortés: *Automated analysis of feature models 20 years later: A literature review.* Information Systems, Vol. 35 (6), S. 615-636, 2010.

[BSS+12] C. Bramsiepe, S. Sievers, T. Seifert, G.D. Stefanidis, D.G. Vlachos, H. Schnitzer, B. Muster, C. Brunner, J.P.M. Sanders, M.E. Bruins, G. Schembecker: *Low-cost small scale processing technologies for production applications in various environments - Mass produced factories.* Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 51, S. 32-52, 2012.

[BUC12] M. Buchholz: *Theorie der Variantenvielfalt: Ein produktions- und absatzwirtschaftliches Erklärungsmodell.* Technische Universität Ilmenau. Dissertation, 2012.

[BUN09] F. Bungert: *Pattern-basierte Entwicklungsmethodik für Product Lifecycle Management.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation, 2009.

[BWE+14] W. Bauer, C. Werner, F. Elezi, M. Maurer: *Forecasting of Future Developments Based on Historic Analysis.* In: *Design 2014: 13th International Design Conference,* S. 735-748, 2014.

[CABA91] G. Caldiera, V.R. Basili: *Identifying and Qualifying Reusable Software Components.* IEEE Computer, Vol. 24 (2), S. 61-70, 1991.

[CBK13] R. Capilla, J. Bosch, K.-C. Kang (Hrsg.): *Systems and software variability management: Concepts, tools and experiences.* Heidelberg: Springer, 2013.

[CGR+12] K. Czarnecki, P. Grünbacher, R. Rabiser, K. Schmid, A. Wasowski: *Cool Features and Tough Decisions: A Comparison of Variability Modeling Approaches.* In: ACM Press: *Proceedings of the Sixth International Workshop on Variability Modeling of Software-Intensive Systems,* 2012.

[CHCR14] C.-C. Chen, N. Crilly: *Modularity, redundancy and degeneracy: cross-domain perspectives on key design principles.* In: *8th Annual IEEE Systems Conference.* Piscataway, 2014.

[CHR15] L. Christiansen: *Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur- und Prozessmodell.* Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik. Dissertation, 2015.

[CHW98] J. Coplien, D. Hoffman, D. Weiss: *Commonality and variability in software engineering: Experience Report.* IEEE Software, Vol. 15 (6), S. 37-45, 1998.

[CLNO12] P. Clements, L. Northrop: *Software product lines: Practices and patterns.* 8. Ausgabe. Boston: Addison-Wesley (SEI series in software engineering), 2012.

[COC08] A. Cockburn: *Use Cases effektiv erstellen: das Fundament für gute Software-Entwicklung; Geschäftsprozesse modellieren mit Use Cases; die Regeln für Use Cases sicher beherrschen.* 1. Nachdruck. Heidelberg: mitp/REDLINE, 2008.

[COR02] A. Cornet: *Plattformkonzepte in der Automobilentwicklung.* Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Gabler Edition Wissenschaft), 2002.

[CZEI05] K. Czarnecki, U.W. Eisenecker: *Generative programming: Methods, tools, and applications.* 6. Auflage. Boston: Addison Wesley, 2005.

[CZEI99] K. Czarnecki, U.W. Eisenecker: *Components and Generative Programming.* In: Nierstrasz, Lemoine (Hrsg.): *Proceedings of the Software Engineering - ESEC/FSE '99: 7th European Software Engineering Conference Held Jointly with the 7th ACM SIGSOFT Symposium on the Foundations of Software Engineering Toulouse.* Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture notes in computer science, 1687), S. 2-19, 1999.

[DEL06] R. Dellanoi: *Kommunalitäten bei der Entwicklung variantenreicher Produktfamilien.* Universität St. Gallen. Dissertation, 2006.

[DIA01] J.L. Diaz-Herrera: *Domain Engineering.* In: S.K. Chang et al. (Hrsg.): *Handbook on Software Engineering & Knowledge Engineering*, Vol. I. River Edge: World Scientific, 2001.

[DIS12] M. Disselkamp: *Innovationsmanagement: Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen.* 2. Auflage. Wiesbaden: Springer, 2012.

[DPM09] B. David, J.-P. Pinot, M. Morrillon: *Beach Wells for Large-Scale Reverse Osmosis Plants: The Sur Case Study.* In: *IDA World Congress*, 2009.

[DRO13] M. Droste: *Bauhaus: 1919 - 1933.* Hong Kong: Taschen Verlag, 2013.

[ECK15] K. Eckert: *Funktionaler Anwendungsentwurf verteilter Automatisierungssysteme: Anwendung von Entwurfsmustern in der Automatisierungstechnik.* Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik. Dissertation, 2015.

[ECPD41] *Engineerings' Council for Professional Development.* Science, Vol. 94 (2446), S. 456, 1941.

[EKL+13] K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, U. Lindemann, M. Mörtl: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung.* 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), 2013.

[ENG06] W. Engeln: *Methoden der Produktentwicklung (Skripten Automatisierungstechnik).* München: Oldenbourg Industrieverlag, 2006.

[ENS06] W. Eversheim, C. Nonn, G. Schuh: *: Kapitel 26 - Produktstrukturierung im Einzel- und Kleinserienbereich (ab 1985).* In: Eversheim, Pfeifer, Weck (Hrsg.): *100 Jahre Produktionstechnik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen von 1906 bis 2006.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.

[ERER99] A. Ericsson, G. Erixon: *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms.* Dearborn, Michigan, New York: Society of Manufacturing Engineers; ASME Press, 1999.

[ERI98] G. Erixon: *Modular function deployment: A Method for Product Modularisation.* Royal Institute of Technology Stockholm, Departement of Manufacturing Systems, 1998.

[ERN00] H. Ernst: *Grundlagen und Konzepte der Informatik: Eine Einführung in die Informatik ausgehend von den fundamentalen Grundlagen.* 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2000.

[ERQ15] M. Efatmaneshnik, M. Ryan, S.U. Qaisar: *System Construction Cost of Hierarchical-Modular Structures.* In: *9th Annual IEEE International Systems Conference,* S. 153-157, 2015.

[FAY09] A. Fay: *Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme.* In: Schnieder, Ständer (Hrsg.): *Wird der Verkehr automatisch sicherer?: 20 Jahre - vom IfRA zum iVA - Jubiläumskolloquium; Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge des integrierten Systementwurfs zur Fahrzeug- und Verkehrsautomatisierung; 04. September 2009 in Braunschweig.* S. 43-60, 2009.

[FEVO13] S. Feldmann, B. Vogel-Heuser: *Änderungsszenarien in der Automatisierungstechnik – Herausforderungen und interdisziplinäre Auswirkungen.* In: Vogel-Heuser (Hrsg.): *Engineering von der Anforderung bis zum Betrieb.* Kassel: Kassel Univ. Press (Embedded Systems 1, Tagungen und Berichte, 3), S. 95-120, 2013.

[FFV12A] S. Feldmann, J. Fuchs, B. Vogel-Heuser: *Modularity, Variant and Version Management in Plant Automation - Future Challenges and State of the Art.* In: *Design 2012: International Design Conference,* S. 1689-1698, 2012.

[FFV12B] J. Fuchs, S. Feldmann, B. Vogel-Heuser: *Modularität im Maschinen- und Anlagenbau - Analyse der Anforderungen und Herausforderungen im industriellen Einsatz.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 12. Tagung. Magdeburg,* S. 307-316, 2012.

[FGP+13] J. Feldhusen, K.-H. Grote et al. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* 8. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2013.

[FHH+02] H.-J. Franke, J. Hesselbach et al. (Hrsg.): *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung.* München: Hanser, 2002.

[FLK+14A] S. Feldmann, C. Legat, K. Kernschmidt, B. Vogel-Heuser: *Compatibility and coalition formation: Towards the vision of an automatic synthesis of manufacturing system designs.* In: IEEE: *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).* Istanbul, S. 1712-1717, 2014.

[FLK+14B] J. Fuchs, C. Legat, K. Kernschmidt, T. Frank, B. Vogel-Heuser: *Interdisziplinärer Produktlinienansatz zur Unterstützung der Wiederverwendbarkeit im Maschinen- und Anlagenbau.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 13. Tagung, Magdeburg,* 2014.

[FLV15A] S. Feldmann, C. Legat, B. Vogel-Heuser: *Engineering Support in the Machine Manufacturing Domain through Interdisciplinary Product Lines: An Applicability Analysis.* In: IFAC, IEEE, IFIP, IFORS: *INCOM 2015: 15th Symposium Information Control Problems in Manufacturing, Ottawa,* 2015.

[FLV15B] S. Feldmann, C. Legat, B. Vogel-Heuser: *An Analysis of Challenges and State of the Art for Modular Engineering in the Machine and Plant Manufacturing Domain.* In: IFAC: *2nd IFAC Conference of Embedded Systems Computational Intelligence and Telematics in Control CESCIT,* S. 87-92, 2015.

[FRIS94] W. Frakes, S. Isoda: *Success factors of systematic reuse.* IEEE Software, Vol. 11 (5), S. 14-19, 1994.

[FUVO12] J. Fuchs, B. Vogel-Heuser: *Metriken und Methoden zur Umstrukturierung einer modularen Steuerungssoftware im Sondermaschinenbau.* In: VDI/VDE: *Automation 2012:*
Der 13. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik, S. 29-32, 2012.

[GOL11] J. Goll: *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik.* 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

[GÖP98] J. Göpfert: *Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.* Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag (Gabler Edition Wissenschaft Markt- und Unternehmensentwicklung), 1998.

[GRÄ04] I. Gräßler: *Kundenindividuelle Massenproduktion: Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.

[GRS+15] K. Gaubinger, M. Rabl, S. Swan, T. Werani: *Innovation and Product Management: A Holistic and Practical Approach to Uncertainty Reduction.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (Springer Texts in Business and Economics), 2015.

[GRSC04] N. Große, W. Schorn: *Projekte.* In: Langmann (Hrsg.): *Taschenbuch der Automatisierung.* München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, S. 506-550, 2004.

[HAB12] R. Haberfellner: *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung.* 12. Auflage, Zürich: Orell Füssli, 2012.

[HAD07] Ł. Hady: *Modular investment cost estimate of multipurpose chemical plant.* Chemical and Process Engineering, Vol. 28 (1), S. 17-31, 2007.

[HAR84] K. Hartmann (Hrsg.): *Grundlagen der Verfahrenstechnik und chemischen Technologie: Dynamische Grundoperationen der Verfahrenstechnik - Modellierung und optimale Steuerung.* Berlin: Akademie-Verlag Berlin, 1984.

[HAWO09] Ł. Hady, G. Wozny: *Know-How and Quality Assurance Using a Web Based Reuse-Atlas.* In: Klemes (Hrsg.): *Chemical Engineering Transactions,* 2009.

[HAWO10] Ł. Hady, G. Wozny: *Modulare Anlagenplanung - Stand der Technik?* In: 7. Symposium "Informationstechnologien für die Entwicklung und Produktion in der Verfahrenstechnik". Aachen, 2010.

[HAWO12] Ł. Hady, G. Wozny: *Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen.* Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (5), S. 597-614, 2012.

[HDW08] Ł. Hady, M. Dyląg, G. Wozny: *Kostenschätzung und Kostenkalkulation im chemischen Anlagenbau: Estimation and Calculation of Cost for Chemical Plant Construction.* Czasopismo Techniczne (5), S. 159-176, 2008.

[HDW09] Ł. Hady, M. Dyląg, G. Wozny: *Investment Cost Estimation and Calculation of Chemical Plants with Classical and Modular Approaches.* Chemical and Process Engineering, Vol. 30, S. 319-340, 2009.

[HEHU13] A. Herrmann, F. Huber: *Produktmanagement: Grundlagen - Methoden - Beispiele.* 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

[HEI99] J. Heina: *Variantenmanagement: Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt.* Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Gabler Edition Wissenschaft), 1999.

[HEL03] F.P. Helmus: *Anlagenplanung: Von der Anfrage bis zur Abnahme.* Weinheim: Wiley-VCH, 2003.

[HEN73] B.D. Henderson: *The Experience Curve: The Growth share Matrix or the Product Portfolio.* BCG-Perspective, 1973.

[HEPO14] A. Heuer, K. Pohl: *Structuring Variability in the Context of Embedded Systems during Software Engineering: Problem Statement.* In: *Proceedings of the eighth International Workshop on Variability Modelling of Software-intensive Systems (VaMos).* New York: ACM, 2014.

[HILA15] F. Himmler, T. Lahr: *Integrated plant engineering based on AutomationML – Towards better standardization and seamless process integration in plant engineering.* In: *2. Integrated Plant Engineering Conference (IPEC)*. Nürnberg, 2015

[HIM14] F. Himmler: *Function Based Engineering with AutomationML: Towards better standardization and seamless process integration in plant engineering.* In: *AutomationML als Integrationsformat – Vernetzung von Organisation, Werkzeugen, Ingenieursdisziplinen, …: 3. AutomationML Anwenderkonferenz.* Blomberg, 2014.

[HJJ09] D. Hou, P. Jablonski, F. Jacob: *Towards an Environment for the Proactive Management of Copy-and-Paste Programming.* In: *IEEE 17th International Conference on Program Comprehension (ICPC), 2009*.

[HKC15] A. Heuer, T. Kaufmann, M. Constantinescu-Fomino: *On the Explicit Consideration of Context Variability in the SPES Modeling Framework.* In: *Proceedings of Software Engineering 2015 (SE 2015): Workshopband (inkl. Doktorandensymposium): ENVISION 2020: Fünfter Workshop zur Zukunft der Entwicklung softwareintensiver, eingebetteter Systeme,* 2015.

[HKM+13] A. Haber, C. Kolassa, P. Manhart, P.M.S. Nazari, B. Rumpe, I. Schaefer: *First-class variability modeling in Matlab/Simulink.* In: Gnesi, Collet, Schmid (Hrsg.): *Proceedings of the seventh International Workshop on Variability Modelling of Software-intensive Systems (VaMoS), Pisa.* New York: ACM, 2013.

[HLO+14] F. Himmler, H. Loy, V. Ostapovski, M. Amberg: *Function Based Engineering - A Standardization Framework for the Plant Engineering Domain.* In: *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2014,* S. 404-416, 2014.

[HOF+14] T. Holm, M. Obst, A. Fay, L. Urbas, T. Albers, S. Kreft, U. Hempen: *Dezentrale Intelligenz für modulare Automation: Lösungsansätze für die Realisierung modularer Anlagen.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, 56 (11), S. 34-43, 2014.

[HRR+11] A. Haber, H. Rendel, B. Rumpe, I. Schaefer: *Delta Modeling for Software Architectures.* In: fortiss GmbH: *Tagungsband des Dagstuhl-Workshop MBEES: Modellbasierte Entwicklung eingebetteter Systeme VII,* 2011.

[JAC98] I. Jacobson: *Object-oriented software engineering: A use case driven approach.* Repr. Harlow: Addison-Wesley, 1998.

[JGJ97] I. Jacobson, M. Griss, P. Jonsson: *Software Reuse: Architecture, process and organization for business success.* New York: ACM Press, 1997.

[JMG+10] N. Jazdi, C. Maga, P. Göhner, T. Ehben, T. Tetzner, U. Löwen: *Mehr Systematik für den Anlagenbau und das industrielle Lösungsgeschäft - Gesteigerte Effizienz durch Domain Engineering: Improved Systematisation in Plant Engineering and Industrial Solutions Business - Increased efficiency through Domain Engineering.* at - Automatisierungstechnik Vol. (9), S. 524-532, 2010.

[JOS07] P. Jost: *Evolutionäres Domain-Engineering zur Entwicklung von Automatisierungssystemen.* Universität Stuttgart, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik. Dissertation, 2007.

[JRL00] M. Jazayeri, A. Ran, van der Linden, Frank: *Software architecture for product families: Principles and practice.* Boston: Addison-Wesley, 2000.

[KAB+02] R.A. Klein, F. Anhäuser, M. Burmeister, J. Lamers: *Planungswerkzeuge aus Sicht eines Inhouse-Planers.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 44 (1), S. 46-50, 2002.

[KDN+98] A.P. Kalogeras, C. Diedrich, P. Neumann, G. Papadopoulos: *Function block definition based on the IEC 1499 language.* In: *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE IECON 1998., Vol.* 1, S. 169-172, 1998.

[KGW14] H. Krcmar, S. Goswami, T. Wolfenstetter: *Anforderungsmanagement für Produkt-Service Systeme: Kapitel 3.2.* In: Vogel-Heuser, Lindemann, Reinhart (Hrsg.): *Innovationsprozesse zyklenorientiert managen: Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen.* Berlin: Springer Vieweg, S. 106-121, 2014.

[KIP12] T. Kipp: *Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung*. Technische Universität Hamburg-Harburg. Dissertation, 2012.

[KOKA98] R. Koller, N. Kastrup: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte.* 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.

[KOL98] R. Koller: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen.* 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.

[KRCA05] M. Kratochvíl, C. Carson.: *Growing Modular: Mass Customization of Complex Products, Services and Software.* 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.

[KVF04] U. Katzke, B. Vogel-Heuser, K. Fischer: *Analysis and state of the art of modules in industrial automation.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 46 (1), S. 23-31, 2004.

[KWH13] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.* Berlin, 2013.

[LAGÖ99] R. Lauber, P. Göhner: *Prozessautomatisierung - Band 2: Modellierungskonzepte und Automatisierungsverfahren, Softwarewerkzeuge für den Automatisierungsingenieur, Vorgehensweise in den Projektphasen bei der Realisierung von Echtzeitsystemen.* 3. Auflage. Berlin: Springer, 1999.

[LAPO05] K. Lauenroth, K. Pohl: *Principles of Variability.* In: Pohl, Böckle, van der Linden (Hrsg.): *Software Product Line Engineering: Foundations, Principles, and Techniques.* Berlin, Heidelberg: Springer, S. 57-88, 2005.

[LAS00] G. Lashin: *Baukastensystem für modulare Straßenbahnfahrzeuge.* Konstruktion, Vol. (52), S. 61-65, 2000.

[LIE03] M. Liehr: *Komponentenbasierte Systemmodellierung und Systemanalyse: Erweiterung des System-Dynamics-Ansatzes zur Nutzung im strategischen Management.* Universität Mannheim. Dissertation, 2003.

[LIE13] S. Lier: *Entwicklung einer Bewertungsmethode für die Modularisierung von Produktionssystemen in der Chemieindustrie.* Universität Bochum. Dissertation, 2013.

[LIGR11] S. Lier, M. Grünewald: *Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants.* Chemical Engineering & Technology, Vol. 34 (5), S. 809-816, 2011.

[LLM+06] Z. Li, S. Lu, S. Myagmar, Y. Zhou: *CP-Miner: Finding Copy-Paste and Related Bugs in Large-Scale Software Code.* In: *IEEE Transactions on Software Engineering: 32th Conference on Software Engineering,* S. 176-192, 2006.

[LÖS01] J. Lösch: *Controlling der Variantenvielfalt: Eine koordinationsorientierte Konzeption zur Steuerung von Produktvarianten.* Technische Universität Braunschweig. Dissertation, 2001.

[LSS+14] A. Lüder, N. Schmidt, H. Steiniger, S. Biffl: *Analyse von Anforderungen an Software-Systeme zum Steuerungsentwurf.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 13. Tagung.* Magdeburg, 2014.

[LÜH13] C. Lühe: *Modulare Kostenschätzung als Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase.* Technische Universität Berlin. Dissertation, 2013.

[LUT11] C. Lutz: *Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte: Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion.* Technische Universität Wien. Dissertation, 2011.

[MAG12] C. Maga: *Adaptierbares Wiederverwendungskonzept für die Entwicklung von automatisierten Systemen.* Universität Stuttgart, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik. Dissertation, 2012.

[MAH14] C. Mahler: *Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering.* Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik. Dissertation, 2014.

[MAJA09] C. Maga, N. Jazdi: *Concept of a Domain Repository for Industrial Automation.* In: *Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE),* 2009.

[MAJA10A] C. Maga, N. Jazdi: *An Approach for Modeling Variants of Industrial Automation Systems.* In: IEEE *International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR)*, Vol. 1, 2010.

[MAJA10B] C. Maga, N. Jazdi: *Klassifizierung möglicher Beziehungen zwischen wiederverwendbaren Artefakten in der Automatisierungstechnik.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 10. Tagung*. Magdeburg 2010.

[MAJA11] C. Maga, N. Jazdi: *Survey, Approach and Examples of Modeling Variants in Industrial Automation.* Journal of Control Engineering and Applied Informatics, Vol. 13 (1), 2011.

[MAN06] Z.Á. Mann: *Three Public Enemies: Cut, Copy and Paste.* Computer, Vol. 39 (7), S. 31-35, 2006.

[MARE13] C. Manz, M. Reichert: *Herausforderungen an ein durchgängiges Variantenmanagement in Software-Produktlinien und die daraus resultierende Entwicklungsprozessadaption.* In: Wagner, Lichter (Hrsg.): *Proceedings of Software Engineering 2013 (SE 2013): Workshopband (inkl. Doktorandensymposium): ENVISION 2020: Dritter Workshop zur Zukunft der Entwicklung softwareintensiver, eingebetteter Systeme.* Bonn: Gesellschaft für Informatik, S. 273-282, 2013.

[MAT10] J. Matevska: *Rekonfiguration komponentenbasierter Softwaresysteme zur Laufzeit.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.

[MELE97] M.H. Meyer, A.P. Lehnerd: *The power of product platforms: Building value and cost leadership.* New York: Free Press, 1997.

[MEN01] M. Menge: *Ein Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der auftragsbezogenen Einzel- und Kleinserienfertigung komplexer Produkte.* Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik. Dissertation, 2001.

[MER12] M. Mertens: *Verwaltung und Verarbeitung merkmalbasierter Informationen: Vom Metamodell zur technologischen Realisierung.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation, 2012.

[MERA07] T. Melin, R. Rautenbach: *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung; mit 76 Tabellen.* 3. Auflage. Berlin: Springer (VDI-Bücher), 2007.

[MIEL98] T.D. Miller, P. Elgard: *Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective.* In: *Design for Integration in Manufacturing: Proceedings of the 13th IPS Seminar.* Aalborg University, Departement of Production, 1998.

[MJE+09] C. Maga, N. Jazdi, T. Ehben, T. Tetzner: *Domain Engineering - Mehr Systematik im industriellen Lösungsgeschäft.* In: VDI/VDE: *Automation 2009: Der Automatisierungskongress in Deutschland,* S. 69-72, 2009.

[MJG11A] C. Maga, N. Jazdi, P. Göhner: *Requirements on Engineering Tools for Increasing Reuse in Industrial Automation.* In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 16. Tagung, Vol.* 16, S. 1-7, 2011.

[MJG11B] C. Maga, N. Jazdi, P. Göhner: *Reusable Models in Industrial Automation: Experiences in Defining Appropriate Levels of Granularity.* In: *18th IFAC World Congress, Vol.* 18, S. 9145-9150, 2011.

[MJG+11C] C. Maga, N. Jazdi, P. Göhner, N. Gewald, B. Böhm, A. Köhlein: *Evaluierungskriterien für Domain Repositories mit mechatronischen Artefakten.* In: VDI/VDE: *Automation 2011: Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik,* S. 13-16, 2011.

[MON05] R. Montau: *Einführung in die PLM-Technologie.* In: Zwicker, Montau (Hrsg.): *Informationstechnologien im digitalen Produkt.* Zürich, 2005.

[MOSC92] D. Monjau, S. Schulze: *Objektorientierte Programmierung: Ein einführendes Lehrbuch mit Beispielen in Modula-2.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1992.

[NEU03] C. Neubaur: *Konzept strategisches Variantenmanagement.* Universität St. Gallen. Dissertation, 2003.

[NIRI10A] K. Nikolaus, S. Ripperger: *Trinkwassergewinnung aus Meerwasser mittels Umkehrosmose: Teil 1: Grundlagen und energetische Betrachtung.* F&S Filtrieren und Separieren, Vol. 24 (1), 2010.

[NIRI10B] K. Nikolaus, S. Ripperger: *Trinkwassergewinnung aus Meerwasser mittels Umkehrosmose: Teil 2: Kostenrechnung unter Berücksichtigung einer vorgeschalteten Ultrafiltration.* F&S Filtrieren und Separieren, Vol. 24 (2), 2010.

[OBUR12] M. Obst, L. Urbas: *Wissensbasierte Assistenzsysteme für modulares Engineering.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 12. Tagung,* S. 179-188, 2012.

[ODU13] M. Obst, F. Doherr, L. Urbas: *Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering.* at - Automatisierungstechnik, Vol. 61 (02), S. 103-108, 2013.

[OHU+15] M. Obst, T. Holm, L. Urbas, A. Fay, S. Kreft, U. Hempen, T. Albers: *Beschreibung von Prozessmodulen: Ein weiterer Schritt zur Umsetzung der NE 148.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 57 (01/02), S. 48-59, 2015.

[OHU14] M. Obst, A. Hahn, L. Urbas: *Package-Unit-Integration in der Prozessindustrie: Was fehlt für Plug-and-produce.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 56 (1-2), S. 56-65, 2014.

[ORD+01] C. Oetter, H. Rempp, C. Diedrich, G. Franz, O. Hanitsch, N. Pastoors, M. Petig: *MOVA - Modulare Offene Verteilte Funktionsblocksyteme für die Automatisierungstechnik: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes.* Frankfurt am Main: VDMA-Verlag, 2001.

[OTWO98] K.N. Otto, K.L. Wood: *Product Evolution: A Reverse Engineering and Redesign Methodology.* Research in Engineering Design Vol. (10), S. 226-243, 1998.

[PABE74] G. Pahl, K. Beitz: *Baukastenkonstruktionen.* Konstruktion, Vol. 26 (4), 1974, S. 153-160.

[PAR10] H.A. Partsch: *Requirements-Engineering systematisch: Modellbildung für softwaregestützte Systeme.* Berlin: Springer, 2010.

[PBF+05] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung.* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch), 2005.

[PBL05] K. Pohl, G. Böckle, F. van der Linden (Hrsg.): *Software Product Line Engineering: Foundations, Principles, and Techniques.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.

[PFDÖ90] W. Pfeiffer, R. Dögl: *Das Technologie-Portfolio-Konzept zur Beherrschung der Schnittstelle.* In: Hahn, Taylor (Hrsg.): *Strategische Unternehmungsplanung / Strategische Unternehmungsführung.* 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 254-282, 1990.

[PHA+12] K. Pohl, H. Hönninger, R. Achatz, M. Broy: *Model-based Engineering of Embedded Systems: The SPES 2020 Methodology.* Heidelberg: Springer, 2012.

[POR99] M.E. Porter: *Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten (Competitive strategy).* 10. Auflage. Frankfurt am Main: Campus-Verlag, 1999.

[PORU11] K. Pohl, C. Rupp: *Basiswissen Requirements Engineering: Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering"; Foundation Level nach IREB-Standard.* 3. Auflage Heidelberg: dpunkt-Verlag, 2011.

[RAP99] T. Rapp: *Produktstrukturierung.* Universität St. Gallen, Dissertation, 1999.

[REHA09] R. Reussner, W. Hasselbring (Hrsg.): *Handbuch der Software-Architektur.* 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt.-Verlag, 2009.

[REWE07] M.-O. Reiser, M. Weber: *Multi-Level feature trees: A pragmatic approach to managing highly complex product families.* Requirements Engineering Vol. (12), S. 57-75, 2007.

[RGF+12] J. Rottke, F. Grote, H. Fröhlich, D. Köster, J. Strube: *Efficient Engineering by Modularization into Package Units: Modularization.* Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (6), 2012.

[ROS09] S. Rosensteiner: *Cost Estimation in Software Product Line Engineering.* 1. Auflage. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH, 2009.

[SAKA00] K. Sattler, W. Kasper: *Verfahrenstechnische Anlagen: Planung, Bau und Betrieb.* Weinheim: Wiley-VCH, 2000.

[SAMA96] R. Sanchez, J.T. Mahoney: *Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design.* Strategic Management Journal Vol. (17), S. 63-76, 1996.

[SBB+10] I. Schaefer, L. Bettini, V. Bono, F. Damiani, N. Tanzarella: *Delta-Oriented Programming of Software Product Lines.* In: Bosch, Lee (Hrsg.): *Software product lines: going beyond: proceedings of the 14th international conference (SPLC 2010), Jeju Island, South Korea.* Berlin: Springer (Lecture notes in computer science, 6287), S. 77-91, 2010.

[SCH05] G. Schuh: *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools.* 2. Auflage. München: Hanser, 2005.

[SCH06] A. Schwinn: *Entwurfsmusterbasierter Ansatz zur Systematisierung von Applikationsbeziehungen im Business Engineering.* In: Schelp, Winter (Hrsg.): *Integrationsmanagement: Planung, Bewertung und Steuerung von Applikationslandschaften; mit 45 Tabellen.* Berlin, Heidelberg: Springer (Business Engineering), S. 31-59, 2006.

[SCH08] T. Schmidberger: *Wissensbasierte Auswertung von Anlagen-Planungsdaten für die Unterstützung des Prozessleittechnik-Ingenieurs: Anwendung einer rollenbasierten Mustersuche.* Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik. Dissertation, 2008.

[SCH89] G. Schuh: *Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten: ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten.* Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation, 1989.

[SCH99] E. Schnieder: *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme; mit 56 Tabellen.* Braunschweig: Vieweg (Studium Technik), 1999.

[SEHE98] J.D. Seader, E.J. Henley: *Separation process principles.* Hoboken: Wiley, 1998.

[SIE12] Siemens AG: *Consultant-DVD - Water and Wastewater: V2.5.* 2012.

[SIGA02] H. Simon, A.v.d. Gathen: *Das große Handbuch der Strategieinstrumente: Werkzeuge für eine erfolgreiche Unternehmensführung; Benchmarking, Kompetenz-Mapping, Portfolio-Analyse, Marktsegmentierung, Szenario-Analyse, Balanced Scorecard und andere.* Frankfurt/Main: Campus Verlag, 2002.

[SPES_XT12] A. Vogelsang, M. Feilkas: *SPES Meta Model Viewpoint-Specification: Functional Viewpoint.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2012.

[SPES_XT13] C. Wehrstedt, T. Holm, T. Jäger, M. Davidich, R. Rosen, V. Brandstetter, P. Witschel: *EC3.AP4.D1 – Fallstudienbeschreibung Meerwasserentsalzung / Desalination.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2013.

[SPES_XT14] S. Schröck: *EC5.AP3.D2 – Werkzeug-Prototyp für Wiederverwendung und Variantenmanagement auf Basis ausgewählter Engineering-Werkzeuge der Siemens AG.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2014.

[SPES_XT15A] T. Jäger, S. Schröck: *EC5.AP4.D4 – Darstellung der Anwendung der im EC5 entwickelten Methoden zur Wiederverwendung und zum Variantenmanagement im Engineering-Workflow automatisierter Anlagen.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2015.

[SPES_XT15B] T. Kaufmann, A. Heuer, T. Weyer, M. Constantinescu-Fomino, M. Große-Rhode, S. Mann, S. Schröck, T. Jäger, S. Stilkerich: *EC5.AP2.D2.2 – Finale Techniken zur Prüfung der Konsistenz, Verträglichkeit und Abhängigkeiten im Engineering von eingebetteten Systemen.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2015.

[SPES_XT15C] S. Schröck: *EC5.AP4.D7 – Leitfaden für das Wiederverwendungsbasierte Engineering automatisierter Anlagen - Siemens AG.* Deliverable im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes SPES_XT, 2015.

[SRC+12] I. Schaefer, R. Rabiser, D. Clarke, L. Bettini, D. Benavides, G. Botterweck, A. Pathak, S. Trujillo, K. Villela: *Software diversity: state of the art and perspectives: Introduction.* International Journal on Software Tools for Technology Transfer, Vol. 14 (5), S. 477-495, 2012.

[SSB+12] T. Seifert, S. Sievers, C. Bramsiepe, G. Schembecker: *Small scale, modular and continuous: A new approach in plant design.* Chemical Engineering and Processing: Process Intensification Vol. (52), S. 140-150, 2012.

[SSE08] S. Schmitz, M. Schlütter, U. Epple: *R&I - Grundlage durchgängigen Engineerings: P&ID - Fundament for continuous engineering.* In: VDI/VDE: *Automation 2008 - Lösungen für die Zukunft: Der Automatisierungskongress in Deutschland.* Düsseldorf: VDI-Verlag (VDI-Berichte, 2032, CD-ROM), S. 55-59, 2008.

[STO97] R.B. Stone: *Towards a theory of modular design.* University of Texas Austin. Dissertation, 1997.

[STOU09] F. Straube, O. Ouyeder: *Modularisierung logistischer Systeme: Entwicklung eines Leitfadens zur Modularisierung logistischer Systeme und Konzeption von Betreibermodellen für kleine und mittelständische Unternehmen. ModuLoSys Schlussbericht,* 2009.

[STR02] G. Strohrmann: *Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse: Eine Einführung für Ingenieure und Techniker.* München: Oldenbourg-Industrieverlag, 2002.

[STR08] U. Strauch: *Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie: Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung einer chemischen Anlage.* Technische Universität Berlin, Fakultät III - Prozesswissenschaften. Dissertation, 2008.

[SWA00] P.M. Swamidass (Hrsg.): *Encyclopedia of production and manufacturing management.* Boston, Mass.: Kluwer Academic Publication, 2000.

[TAB06] P. Tabeling: *Softwaresysteme und ihre Modellierung: Grundlagen, Methoden und Techniken; mit 45 Tabellen.* Berlin, Heidelberg: Springer (eXamen.press), 2006.

[TAU13] T. Tauchnitz: *Integriertes Engineering - wann, wenn nicht jetzt!: Notwendigkeit, Anforderungen und Ansätze.* atp - Automatisierungstechnische Praxis (1-2), S. 46-53, 2013.

[TGK+04] A. Tomer, L. Goldin, T. Kuflik, E. Kimchi, S.R. Schach: *Evaluating Software Reuse Alternatives: A Model and Its Application to an Industrial Case Study.* IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 30 (9), S. 601-612, 2004.

[UBJ+12] L. Urbas, S. Bleuel, T. Jäger, S. Schmitz, L. Evertz, T. Nekolla: *Automatisierung von Prozessmodulen: Von Package-Unit-Integration zu modularen Anlagen.* atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 54 (1-2/2012), S. 44-53, 2012.

[UBR05] S. Ubransky: *Integrierter Ansatz zur systemunabhängigen Wiederverwendung von Lerninhalten.* Technische Universität Dresden. Dissertation, 2005.

[UDK+12] L. Urbas, F. Doherr, A. Krause, M. Obst: *Modularisierung und Prozessführung: Prozessleittechnik.* Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (5), S. 615-623, 2012.

[UKZ12] L. Urbas, A. Krause, J. Ziegler: *Process control systems engineering.* München: Oldenbourg Industrieverlag, 2012.

[ULEP04] K.T. Ulrich, S.D. Eppinger: *Product design and development.* 3. Ausgabe. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2004.

[ULR09] A. Ulrich: *Entwicklungsmethodik für die Planung verfahrenstechnischer Anlagen.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009.

[ULR95] K.T. Ulrich: *The role of product architecture in the manufacturing firm.* Research Policy, Vol. 24 (3), S. 419-440, 1995.

[UZSC12] H. Uzuner, G. Schembecker: *Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern.* Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (5), S. 747-761, 2012.

[UZU13] H. Uzuner: *Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von R&I-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes.* Technische Universität Dortmund. Dissertation, 2013.

[VBH+09] S. Vajna, H. Bley, P. Hehenberger, C. Weber, K. Zeman: *CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung.* 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[VFF+15] B. Vogel-Heuser, J. Fuchs, S. Feldmann, C. Legat: *Interdisziplinärer Produktlinienansatz zur Steigerung der Wiederverwendung: Untersuchung der Anwendbarkeit von Produktlinien für die Entwicklung in der Automatisierung des Maschinenbaus.* at - Automatisierungstechnik, Vol. 63 (2), S. 99-110, 2015.

[VFS+15] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, M. Tichy: *Evolution of software in automated production systems: Challenges and Research Directions.* The Journal of Systems & Software, Vol (110), S. 54-84, 2015.

[VIST13] T. Vietor, C. Stechert: *Produktarten zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses: Kapitel 17.* In: Feldhusen, Grote et al. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* 8. Auflage Berlin: Springer Vieweg, S. 817-870, 2013.

[VLR14] B. Vogel-Heuser, U. Lindemann, G. Reinhart (Hrsg.): *Innovationsprozesse zyklenorientiert managen: Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen.* Berlin: Springer Vieweg, 2014.

[VOG08] B. Vogel-Heuser: *Welchen Nutzen kann UML für das Engineering in der Automatisierungstechnik bieten?* In: Vogel-Heuser (Hrsg.): *Automation & Embedded Systems.* München: Oldenbourg Industrieverlag, 2008.

[VOKA07] G.H. Vogel, G. Kaibel: *Verfahrensentwicklung: Von der ersten Idee zur chemischen Produktionsanlage.* Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

[VSK+07] B. Vogel-Heuser, T.Y. Sim, U. Katzke, A. Wannagat, R. Jochem: *Evaluation und Anwendung von Variantenmodellierung im Maschinen- und Anlagenbau zur Verbesserung der Modulstruktur und Erhöhung der Wiederverwendung.* In: VDI/VDE: *Automation 2007: Der Automatisierungskongress in Deutschland,* S. 107-116, 2007.

[WAEP15] C. Wagner, U. Epple: *Variant Management for Control Blocks.* In: *20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation,* 2015.

[WER12] M. Werdich: *FMEA - Einführung und Moderation: Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld).* 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.

[WESC08] K.H. Weber, M. Schüßler: *Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen.* Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), 2008.

[WESO14] T. Weilkiens, R.M. Soley: *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur.* 3. Auflage. Heidelberg: dpunkt.-Verlag, 2014.

[WEST13] M. Weyrich, F. Steden: *Simulationsmodule methodisch identifizieren: Besseres Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei Modellerstellung*. atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 55 (07/08), S. 44-52, 2013.

[WEY11] T. Weyer: *Kohärenzprüfung von Anforderungsspezifikationen: Ein Ansatz zur Prüfung der Kohärenz von Verhaltensspezifikationen gegen Eigenschaften des operationellen Kontexts.* Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Dissertation, 2011.

[WIL06] F.E.P. Wilms: *Szenariotechnik: Vom Umgang mit der Zukunft.* 1. Auflage. Bern: Haupt-Verlag, 2006.

[WSM10] A. Wiesner, A. Saxena, W. Marquardt: *An Ontology-based Environment for Effective Collaborative and Concurrent Process Engineering.* In: *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM):* IEEE, S. 2518-2522, 2010.

[WSS10] G. Wozny, G. Schembecker, H. Schmidt-Traub: *Abschlussbericht: Informationstechnische Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase durch ein modulares Planungskonzept* (AIF/IGF-Nr: 15344 N). Frankfurt am Main, 2010.

[ZFB15] F. Zimmer, A. Fay, B. Böhm: *Engineering-Beziehungen als Konzept zur Modellierung von Abhängigkeiten und Werkzeug zur Aufwandsreduktion in der Planung: Engineering relations as a concept for modelling dependencies and as a tool to reduce the effort in the planning phase*. In: VDI/VDE: *Automation 2015: 16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik,* 2015.

[ZWMO05] E. Zwicker, R. Montau (Hrsg.): *Informationstechnologien im digitalen Produkt.* Zürich, 2005.

Normen, Richtlinien und Empfehlungen

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der referenzierte Normen, Richtlinien und Empfehlungen. Die Quellen sind mittels [<Typ> <Nummer>] gekennzeichnet.

[AACE 18R-97] AACE INTERNATIONAL RECOMMENDED PRACTICE 18R-97. *Cost Estimate Classification System - As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries*, 2005.

[DIN IEC 61131-3] DIN IEC 61131-3. *Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 3: Programmiersprachen*, 2014.

[DIN 199-1] DIN 199-1. *Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten – Teil 1: Begriffe*, 2002.

[DIN 323-1] DIN 323-1. *Normzahlen und Normzahlreihen; Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte*, 1974.

[DIN 323-2] DIN 323-2. *Normzahlen und Normzahlreihen; Einführung*, 1974.

[DIN 6779-13] DIN 6779-13. *Kennzeichnungssystematik für technische Produkte und technische Produktdokumentation*, 2003.

[DIN 81346-1] DIN 81346-1. *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien – Teil 1: Allgemeine Regeln,* 2010.

[DIN EN 60079-10-1] DIN EN 60079-10-1. *Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 10-1: Einteilung der Bereiche - Gasexplosionsgefährdete Bereiche (IEC 31J/234/CDV:2014)*, 2010.

[DIN EN 61512-1] DIN EN 61512-1. *Chargenorientierte Fahrweise – Teil 1: Modelle und Terminologie*, 2000.

[DIN EN 62264-1] DIN EN 62264-1. *Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie*, 2012.

[DIN EN 62424] DIN EN 62424. *Festlegung für die Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik in Fließbildern und für den Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen*, 2009.

[DIN EN ISO 10628] DIN EN ISO 10628. *Fließschema für verfahrenstechnische Anlagen*, 2001.

[DIN EN ISO 4762] DIN EN ISO 4762. *Zylinderschrauben mit Innensechskant*, 2004.

[DIN IEC 61499-1] DIN IEC 61499-1. *Funktionsbausteine für industrielle Leitsysteme – Teil 1: Architektur*, 2003.

[IEC 60848] IEC 60848. *GRAFCET specification language for sequential function charts*, 2013.

[IEC 61346] IEC 61346, zurückgezogen. *Industrial systems, Installations and Equipment and Industrial Products — Structuring Principles and Reference Designations*, 1996.

[NA 35] NA 35. *Abwicklung von PLT-Projekten*, 2003.

[NE 148] NE 148. *Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen*, 2013.

[NE 33] NE 33. *Anforderungen an Systeme zur Rezeptfahrweise*, 2003.

[PAS 1059] PAS 1059. *Planung einer verfahrenstechnischen Anlage – Vorgehensmodell und Terminologie*, 2006.

[TGL 25000] TGL 25000. *Verfahrenstechnik Grundoperationen*, 1974.

[VDI 2206] VDI 2206. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2004.

[VDI 2218] VDI 2218. *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-Technologie*, 2003.

[VDI 2221] VDI 2221. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, 1993.

[VDI 2222-1] VDI 2222-1. *Konstruktionsmethodik – Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*, 1997.

[VDI 2223] VDI 2223. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte / Systematic embodiment design of technical products*, 2004.

[VDI 5200-1] VDI 5200-1. *Fabrikplanung – Blatt 1: Planungsvorgehen*, 2011.

[VDI 5610-1] VDI 5610-1. *Wissensmanagement im Ingenieurwesen – Blatt 1: Grundlagen, Konzepte und Vorgehen*, 2009.

[VDI 6600-1] VDI 6600-1. *Projektingenieur – Blatt 1: Berufsbild*, 2006.

[VDI/VDE 3682-1] VDI/VDE 3682-1. *Formalisierte Prozessbeschreibung – Blatt 1: Konzept und grafische Darstellung*, 2015.

[VDI/VDE 3682-2] VDI/VDE 3682-2. *Formalisierte Prozessbeschreibung – Blatt 2: Informationsmodell*, 2015.

[VDI/VDE 3694] VDI/VDE 3694. *Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen*, 2014.

[VDI/VDE 3695-1] VDI/VDE 3695-1. *Engineering von Anlagen – Evaluieren und Optimieren des Engineerings – Blatt 1: Grundlagen und Vorgehensweise*, 2010.

[VDI/VDE 3695-2] VDI/VDE 3695-2. *Engineering von Anlagen – Evaluieren und Optimieren des Engineerings – Blatt 2: Themenfeld Prozesse*, 2010.

[VDI/VDE 3695-3] VDI/VDE 3695-3. *Engineering von Anlagen – Evaluieren und Optimieren des Engineerings – Blatt 3: Themenfeld Methoden*, 2010.

[VDI/VDE 3695-4] VDI/VDE 3695-4. *Engineering von Anlagen – Evaluieren und Optimieren des Engineerings – Blatt 4: Themenfeld Hilfsmittel*, 2010.

Veröffentlichungen des Autors

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der Veröffentlichungen des Verfassers, die mittels [<Kurzbeleg>*] gekennzeichnet sind.

[DEF+16*] O. Drumm, R. Eckardt, A. Fay, G. Gutermuth, D. Krumsiek, U. Löwen, T. Makait, T. Mersch, A. Schertl, T. Schindler, M. Schleipen, S. Schröck: *Durchgängiges Engineering in Industrie 4.0-Wertschöpfungsketten*. In 4. VDI-Fachtagung „Industrie 4.0“, Düsseldorf, 2016.

[FSD+14*] A. Fay, S. Schröck, O. Drumm, R. Eckardt, G. Gutermuth, D. Krumsiek, U. Löwen, A. Schertl, T. Schindler: *Anforderungen an Leitsysteme durch Industrie 4.0.* In: VDI/VDE: *Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik,* 2014.

[GMM+13*] M. Große-Rhode, P. Manhart, R. Mauersberger, S. Schröck, M. Schulze, T. Weyer: *Anforderungen von Leitbranchen der deutschen Industrie an Variantenmanagement und Wiederverwendung und daraus resultierende Forschungsfragestellungen.* In: Wagner, Lichter (Hrsg.): *Software Engineering 2013: Workshopband, Aachen.* Bonn: Ges. für Informatik (GI-Edition Proceedings, 215), S. 251-260, 2013.

[HJS+15*] S. Heymann, J. Jasperneite, S. Schröck, A. Fay: *Beschreibung von modularisierten Produktionsanlagen in Industrie 4.0.* In: VDI/VDE: *Automation 2015: 16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik,* 2015.

[HSF+13*] T. Holm, S. Schröck, A. Fay, T. Jäger, U. Löwen: *Engineering von "Mechatronik und Software" in automatisierten Anlagen: Anforderungen und Stand der Technik.* In: Wagner, Lichter (Hrsg.): *Software Engineering 2013: Workshopband, Aachen.* Bonn: Ges. für Informatik (GI-Edition Proceedings, 215), S. 261-272, 2013.

[SFJ14*] S. Schröck, A. Fay, T. Jäger: *Konzept zur gewerkeübergreifenden systematischen Wiederverwendung funktionaler Einheiten im Engineering automatisierter Anlagen: Concept for the systematic reuse of functional units within the engineering of automated plants.* In: VDI/ VDE: *Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik,* 2014.

[SFJ15*] S. Schröck, A. Fay, T. Jäger: *Systematic interdisciplinary reuse within the engineering of automated plants.* In: *9th Annual IEEE International Systems Conference,* 2015.

[SSF13A*] F. Schumacher, S. Schröck, A. Fay: *Tool support for an automatic transformation of GRAFCET specifications into IEC 61131-3 control code.* In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 18. Tagung,* 2013.

[SSF13B*] F. Schumacher, S. Schröck, A. Fay: *Transforming hierarchical concepts of GRAFCET into a suitable Petri net formalism.* In: *IFAC Symposium on Manufacturing Modelling,* 2013.

[SZF+14*] S. Schröck, F. Zimmer, A. Fay, T. Jäger: *Konzept zur funktionsorientierten systematischen Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen der Prozessindustrie.* In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 13. Tagung,* 2014.

[SZF+15*] S. Schröck, F. Zimmer, A. Fay, T. Jäger: *Systematic reuse of interdisciplinary components supported by engineering relations.* In: IFAC, IEEE, IFIP, IFORS: *INCOM 2015: 15th Symposium Information Control Problems in Manufacturing,* 2015.

[SZH+13*] S. Schröck, F. Zimmer, T. Holm, A. Fay, T. Jäger: *Principles, viewpoints and effect links in the engineering of automated plants.* In: *IECON: 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,* 2013.

Studentische Arbeiten

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der studentischen Arbeiten, die vom Autor betreut wurden. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>%] gekennzeichnet.

[BLO15A%] H. Bloch: *Identifikation und Analyse eines typischen Workflows im Engineering automatisierter Anlagen: Identification and analysis of a typical workflow within the Engineering of automated plants.* Hamburg, Projektseminararbeit, 2015.

[BLO15B%] H. Bloch: *Anwendung und werkzeugbasierte Umsetzung einer Methodik zum wiederverwendungsbasierten Engineering automatisierter Anlagen: Application and tool-based realization of a methodology for the reuse-based Engineering of automated plants.* Hamburg, Masterthesis, 2015.

[CAE13%] B. Caesar: *Domain Engineering als ein Ansatz der systematischen Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen: Domain Engineering as an approach to methodical reuse within Plant-Engineering.* Hamburg, Bachelorarbeit, 2013.

[CAE15%] B. Caesar: *Konzeptionelle Entwicklung und experimentelle Evaluation einer Methodik zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Manufacturing Execution Systemen (MES) unter Berücksichtigung des Automatisierungs- und Integrationsgrades: Profitability analysis of Manufacturing Execution Systems (MES) taking account of the level of automation and integration*. Hamburg/Ludwigshafen, Masterarbeit, 2015.

[GRU15%] R. Gruszka: *Herausforderungen von Industrie 4.0 durch die Flexibilisierung der Anlagenstruktur im Hinblick auf das Manufacturing Execution System*. Hamburg, Masterarbeit, 2015.

[KAU13%] N. Kaufmann: *Analyse von Konzepten für die systematische Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen: Analysis of approaches towards systematic reuse within the engineering of automated plants.* Hamburg, Projektarbeit, 2013.

[LAN14A%] E. Lange: *Herausforderungen von Industrie 4.0 für Manufacturing Execution Systems am Beispiel von SIMATIC IT: Challenges of Industrie 4.0 for Manufacturing Execution Systems by the example of SIMATIC IT.* Hamburg, Masterarbeit, 2014.

[LAN14B%] E. Lange: *Identifikation von Anforderungen und Vergleich von Leitsystemen für automatisierte Anlagen im Hinblick auf Industrie 4.0: Elicitation of requirements and comparison of control systems with regard to the application in the context of Industrie 4.0.* Hamburg, Masterarbeit, 2014.

Referenzierte Internetquellen

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der referenzierten Internetquellen. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>@] gekennzeichnet.

[BIT15@] H.-J. Bittermann: *So schaffen Modularisierung und Standardisierung Freiräume.* http://www.process.vogel.de/anlagenbau_engineering/articles/490108/ [Abruf: 2015-08-03].

[DES15@] Desalitech: *Reverse Osmosis Systems and Configurations: The Desalitech Blog.* http://desalitech.com.previewdns.com/reverse-osmosis-systems-and-configurations [Abruf: 2015-08-18].

[GEI14@] A. Geipel-Kern: *Rezepte für den Großanlagenbau von morgen: Großanlagenbau*. http://www.process.vogel.de/anlagenbau_engineering/articles/449254 [Abruf: 2014-06-24].

[GRI03@] M. Griss: *Reuse Comes in Several Flavors: Achieving a Better Return on Software™ Series.* http://www.martin.griss.com/pubs/WPGRISS02.pdf [Abruf: 2013-07-04].

[KCH+90@] K.-C. Kang; S.G. Cohen; J.A. Hess; W.E. Novak; A.S. Peterson: *Feature-Oriented Domain Analysis (FODA): Feasibility Study.* http://www.sei.cmu.edu/reports/90tr021.pdf [Abruf: 2013-07-03].

[MAY97@] F.A. Maymir-Ducharme: *The Product Line Business Model.* http://www.umcs.maine.edu/~ftp /wisr/wisr8/papers/maymir/maymir-updated.html [Abruf: 2013-07-02].

[VCI14@] VCI (Hrsg.): *Chemiewirtschaft in Zahlen.* https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation /chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf [Abruf: 2015-09-03].

[PRSU10@] ProcessNet; SusChem: *Die 50%-Idee - Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit: Positionspapier. http://processnet.de/processnet_media/die+50prozent_idee+vortrag +bott_schembecker-p-1158.pdf* [Abruf: 2013-06-28].

[PUR06@] pure-systems GmbH: *Technical White Paper Variant Management with pure::variants.* http://www.pure-systems.com/White_Papers.92.0.html [Abruf: 2015-08-18].

[PUR15@] pure-systems GmbH: *pure::variants User's Guide.* http://www.pure-systems.com/Documentation.116.0.html [Abruf: 2015-08-18].

[SIC15@] Sick AG: *Extraktive Gasanalysatoren GMS800.* https://www.sick.com/de/de/gasanalysatoren /extraktive-gasanalysatoren/gms800/gms800/p/p206540 [Abruf: 2015-08-18].

[SIE15A@] Siemens AG: *Comos Automation Integrated Engineering: Bedienhandbuch*. https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109475955/Integrated_Engineering_deDE_de-DE.pdf [Abruf: 2015-09-02].

[SIE15B@] Siemens AG: *Comos Platform Bedienung: Bedienhandbuch.* https://support.industry.siemens.com/dl/files/941/109475941/att_842663/v1/COMOS_Platform_Bedienung_deDE_de-DE.pdf [Abruf: 2015-09-02].

[SPES_XT@] Technische Universität München: *Software Platform for Embedded Systems "XT".* http://spes2020.informatik.tu-muenchen.de/spes_xt-home.html [Abruf: 2015-09-02].

Referenzierte Software

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der erwähnten Software. Die Software ist mittels <*Name der Software*> gekennzeichnet.

Automation-Interface	*Automation-Interface (Add-on zu COMOS):* Siemens AG, 2015.
COMOS	*COMOS:* Siemens AG, 2015. http://w3.siemens.com/mcms/plant-engineering-software/de/seiten/default.aspx.
Rational DOORS	*Rational DOORS:* IBM, 2014. http://www-03.ibm.com/software/products/de/ratidoor.
Engineering Base	*Engineering Base:* Aucotec AG, 2014. https://www.aucotec.com/solutions/plattform-engineering-base.html.
Generischer Excel-Import	*Generischer Excel-Import (Import-Modul zu COMOS):* Siemens AG, 2015.
Merge-Tool	*Proprietäre Software-Lösung im Rahmen des Projektes „MOVA“* [ORD+01].
Microsoft Visio	*Microsoft Visio: Professional 2010:* Microsoft Corporation, 2010. https://products.office.com/de-de/visio/flowchart-software.
PCS7	*PCS7:* Siemens AG, 2014. http://w3.siemens.com/mcms/process-control-systems/de/simatic-pcs-7/pages/simatic-pcs-7.aspx.
pure::variants	*pure::variants:* pure-systems GmbH, 2003-2015. http://www.pure-systems.com.
Typical-Configurator	*Typical-Configurator (Prototypisches Add-on zu Engineering Base):* Aucotec AG, 2015.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Sebastian Schröck
Geburtsdaten:	06.06.1987 in Pforzheim

Berufserfahrung

Seit 04/2016	**Robert Bosch GmbH**, Renningen Forschungsingenieur
05/2012 – 12/2015	**Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität** Hamburg Wissenschaftlicher Mitarbeiter
03/2010 – 09/2011	**Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung**, Stuttgart Wissenschaftliche Hilfskraft
10/2006 – 01/2010	**Carl Benzinger Präzisionsmaschinen GmbH**, Pforzheim Werkstudent

Ausbildung

10/2010 – 04/2012	**Hochschule Pforzheim** Studium der Produktentwicklung, Abschluss: Master of Science (M.Sc.)
10/2006 – 02/2010	**Hochschule Pforzheim** Studium des Maschinenbaus, Abschluss: Bachelor of Engineering (B.Eng.)
08/2008 – 12/2008	**University of Applied Science Jyväskylä**, Finnland Auslandssemester
09/1997 – 07/2006	**Lise-Meitner-Gymnasium Königsbach** Abschluss: Allgemeine Hochschulreife