

Reihe 20

Rechnerunter-  
stützte Verfahren

Nr. 464

Sebastian Schröck, M.Sc.,  
Königsbach-Stein

## Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automa- tisierter Anlagen

### Anforderungen, Konzept und Umsetzungen für die Prozess- industrie



*Professur für Automatisierungstechnik*

*Professur für Prozessdatenverarbeitung  
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der  
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

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte  
Verfahren

Sebastian Schröck, M. Sc.,  
Königsbach-Stein

Nr. 464

## Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automa- tisierter Anlagen

Anforderungen, Konzept und  
Umsetzungen für die Prozess-  
industrie



*Professur für Automatisierungstechnik*

*Professur für Prozessdatenverarbeitung  
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg

Schröck, Sebastian

## **Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen**

**– Anforderungen, Konzept und Umsetzungen für die Prozessindustrie –**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 464. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

222 Seiten, 61 Bilder, 52 Tabellen.

ISBN 978-3-18-346420-3, ISSN 0178-9473,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

**Für die Dokumentation:** Wiederverwendung – Interdisziplinäre Wiederverwendung – Engineering automatisierter Anlagen – Variabilität – Funktionsorientierung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der interdisziplinären Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen. Grundlage stellt eine ausführliche Anforderungserhebung anhand des Standes der Wissenschaft dar. Hierzu werden auch bestehende Wiederverwendungskonzepte aus dem Kontext der Automatisierungstechnik analysiert. Im Verlauf der Arbeit werden bewährte Herangehensweisen im Engineering mit Ansätzen anderer Wissenschaftsdomänen (bspw. Produktentwicklung und Software-Engineering) und Gewerke (bspw. Verfahrenstechnik) kombiniert. Das erarbeitete Konzept erlaubt die explizite Berücksichtigung von Variabilität, ermöglicht die gewerkeübergreifende Zusammenarbeit und differenziert zwischen projektunabhängigen und projektabhängigen Tätigkeiten. Mittels verschiedener Umsetzungsszenarien wird ein Transfer in die industrielle Praxis aufgezeigt und anhand industrieller Fallbeispiele evaluiert.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

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

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-346420-3

## Geleitwort des Herausgeber

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung komplexer Produktionsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Mit dem Ziel, den Aufwand für das Engineering einer automatisierten Anlage zu reduzieren, wird von allen am Engineering beteiligten Gewerken eine Wiederverwendung bewährter Teillösungen angestrebt. Diese Form der Wiederverwendung ist aber nur begrenzt hilfreich.

Herr Dr. Schröck hat in seiner hier veröffentlichten Arbeit stattdessen einen gewerkübergreifenden, funktionsorientierten Ansatz verfolgt, bei dem die Wiederverwendung zunächst anhand der geforderten Funktionen der Anlage erfolgt (funktionale Sicht im Problemraum), denen dann gewerkspezifische Lösungen zugeordnet werden (technologische Sicht im Lösungsraum). Zur Beherrschung der potentiell vielen Lösungsvarianten hat er die Methode des „variability management“, die dem Software Engineering entstammt, auf das Engineering von Anlagen konzeptionell übertragen, in Engineering-Werkzeugen implementiert und auf verschiedene verfahrenstechnische Systeme bzw. Anlagen angewandt.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

## **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

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>IX</b>
<b>GLOSSAR.....</b>	<b>X</b>
<b>KURZFASSUNG.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVATION.....	1
1.2. ZIELSETZUNG UND WISSENSCHAFTLICHER BEITRAG DER ARBEIT.....	3
1.3. STRUKTUR DER ARBEIT.....	4
<b>2. ENGINEERING AUTOMATISierter ANLAGEN IN DER PROZESSINDUSTRIE .....</b>	<b>6</b>
2.1. ENGINEERING: BEGRIFFE UND DEFINITIONEN.....	6
2.2. VORGEHENSMODELLE FÜR DAS ENGINEERING AUTOMATISierter ANLAGEN.....	8
2.3. STRUKTURIERUNG VON ANLAGEN.....	11
2.4. ZWISCHENFAZIT.....	14
<b>3. GRUNDLAGEN DER WIEDERVERWENDUNG IN DER ENTWICKLUNG</b>	
<b>TECHNISCHER SYSTEME.....</b>	<b>15</b>
3.1. STRUKTURIERUNG ALS VORAUSSETZUNG FÜR SYSTEMATISCHE WIEDERVERWENDUNG.....	15
3.1.1. BAUREIHEN.....	16
3.1.2. BAUKASTEN.....	16
3.1.3. MODULBAUWEISE.....	17
3.1.4. PLATTFORM.....	20
3.1.5. PRODUKTLINIEN.....	21
3.1.6. EINORDNUNG DER ANSÄTZE.....	23
3.2. GRUNDLEGENDE WIEDERVERWENDUNGSMECHANISMEN.....	24
3.2.1. COPY, PASTE & MODIFY.....	26
3.2.2. TYP-INSTANZ-KONZEPT.....	27
3.2.3. TEMPLATES.....	28
3.2.4. PATTERN.....	29
3.2.5. BIBLIOTHEKEN.....	30
3.3. VARIABILITÄT UND WIEDERVERWENDUNG.....	31
3.3.1. VARIABILITÄT: BEGRIFFE UND DEFINITIONEN.....	31
3.3.2. VARIABILITÄT IM KONTEXT DES SYSTEMS.....	37
3.3.3. MODELLIERUNG VON VARIABILITÄT.....	39
3.4. ZWISCHENFAZIT.....	42

<b>4. WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE UND RESULTIERENDE ANFORDERUNGEN .....</b>	<b>43</b>
4.1. WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE FÜR DAS ENGINEERING AUTOMATISierter ANLAGEN .....	43
4.1.1. MULTIKRITERIELLE MODULARISIERUNG VERFAHRENSTECHNISCHER ANLAGEN NACH HADY ET AL. ....	43
4.1.2. WISSENSBASIERTER ANSATZ ZUR MODULBASIERTEN ERSTELLUNG VON R&I-FLIEßBILDERN NACH UZUNER ET AL. ....	45
4.1.3. MODULARISIERUNG IM PLANUNGSPROZESS VON ANLAGEN NACH BRAMSIPE ET AL. ....	47
4.1.4. EFFIZIENTES ENGINEERING DURCH DIE MODULARISIERUNG IN PACKAGE UNITS NACH ROTTKE ET AL. ....	49
4.1.5. WISSENSBASIERTES ASSISTENZSYSTEM FÜR MODULARES ENGINEERING NACH OBST ET AL. ....	50
4.1.6. MODULARE OFFENE VERTEILTE FUNKTIONSBLOCKSYSTEME FÜR DIE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK .....	51
4.1.7. ADAPTIERBARES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPT NACH MAGA ET AL. ....	53
4.1.8. AUTOMATISIERUNGSENGINEERING NACH MAHLER .....	55
4.1.9. INTERDISZIPLINÄRER PRODUKTLINIENANSATZ FÜR MASCHINEN- UND ANLAGENBAU NACH FUCHS ET AL. ....	56
4.1.10. FUNCTION BASED ENGINEERING NACH HIMMLER ET AL. ....	57
4.2. ZUSAMMENFASSUNG DER WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE .....	59
4.3. ANFORDERUNGSERMITTLUNG FÜR EIN INTERDISZIPLINÄRES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPT .....	61
4.3.1. USE-CASES FÜR WIEDERVERWENDUNG IM ENGINEERING AUTOMATISierter ANLAGEN .....	62
4.3.2. ANFORDERUNGEN AN INTERDISZIPLINÄRE SYSTEMATISCHE WIEDERVERWENDUNG IM ENGINEERING .....	65
4.4. ÜBERPRÜFUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG BESTEHENDER WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTE ..	68
<b>5. GRUNDGEDANKEN DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES .....</b>	<b>71</b>
5.1. TRENNUNG ZWISCHEN PROJEKTUNABHÄNGIGEN UND PROJEKTABHÄNGIGEN TÄTIGKEITEN .....	71
5.2. KONSEQUENTE FUNKTIONSORIENTIERUNG ÜBER DIE GWERKEGRENZEN .....	72
5.3. EXPLIZITE MODELLIERUNG VON VARIABILITÄT .....	73
5.4. SCHRITTWEISE INTEGRATION IN BESTEHENDE PROZESSE .....	76
5.5. ZWISCHENFAZIT .....	77
<b>6. DEFINITION WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....</b>	<b>78</b>
6.1. GRANULARITÄT DER WIEDERVERWENDBAREN EINHEITEN .....	78
6.2. DEFINITION DER FUNKTIONALITÄT WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....	82
6.3. VARIABILITÄT IN WIEDERVERWENDBAREN EINHEITEN .....	83
6.3.1. VARIABILITÄT WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN IM PROBLEMRAUM .....	84
6.3.2. VARIABILITÄT WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN IM LÖSUNGSRAUM .....	85
6.3.3. RELATIONEN INNERHALB WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....	86
6.3.4. KONFIGURATION WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....	89
6.4. FORMALES MODELL UND BESTANDTEILE DER WIEDERVERWENDBAREN EINHEITEN .....	89

<b>7. PROJEKTUNABHÄNGIGER ANTEIL DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES .....</b>	<b>92</b>
7.1. ERMITTLUNG DER ANFORDERUNGEN .....	93
7.2. ANALYSE UND BEWERTUNG DER EIGNUNG ZUR WIEDERVERWENDUNG .....	97
7.3. ENTWICKLUNG DER FUNKTIONEN UND FUNKTIONSSTRUKTUR .....	100
7.4. ENTWICKLUNG DER TECHNISCHEN LÖSUNG .....	103
7.4.1. ENTWICKLUNG WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN OHNE BESTEHENDE LÖSUNG .....	104
7.4.2. ENTWICKLUNG WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN BASIEREND AUF BESTEHENDEN LÖSUNGEN .....	107
7.5. KONSISTENZPRÜFUNG WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....	108
7.6. ERSTELLUNG DER DOKUMENTATION .....	109
7.7. FREIGABE, SPEICHERUNG UND WARTUNG DER WIEDERVERWENDBAREN EINHEITEN .....	111
<b>8. PROJEKTABHÄNGIGE KONZEPTBAUSTEINE DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES 115</b>	
8.1. KLÄRUNG UND AUFBEREITUNG DER (KUNDEN-)ANFORDERUNGEN .....	116
8.2. FUNKTIONALER ENTWURF UND FUNKTIONALE KONFIGURATION DER EINHEITEN .....	117
8.3. TECHNISCHER ENTWURF .....	120
8.4. KONSISTENZPRÜFUNG KONFIGURIERTER WIEDERVERWENDBARER EINHEITEN .....	122
8.5. UNTERSTÜTZUNG DER ANGEBOTSERSTELLUNG .....	123
<b>9. WERKZEUGTECHNISCHE UMSETZUNG DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES .....</b>	<b>125</b>
9.1. VERWENDETE SOFTWARE-WERKZEUGE .....	125
9.2. UMSETZUNGSSZENARIO I UNTER VERWENDUNG EINES VARIANTENMANAGEMENT-WERKZEUGES...	128
9.3. UMSETZUNGSSZENARIO II OHNE VERWENDUNG EINES VARIANTENMANAGEMENT-WERKZEUGES...	131
9.4. ZWISCHENFAZIT .....	132
<b>10. EVALUATION UND ÜBERPRÜFUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG.....</b>	<b>134</b>
10.1. ANWENDUNG DES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPTES .....	134
10.1.1. FALLBEISPIEL „MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ .....	134
10.1.2. FALLSTUDIE „MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ .....	136
10.1.3. FALLBEISPIEL „EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ .....	139
10.1.4. FALLSTUDIE „EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ .....	140
10.2. ÜBERPRÜFUNG DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG.....	142
<b>11. ZUSAMMENFASSUNG, KRITISCHE REFLEXION UND AUSBLICK .....</b>	<b>146</b>
11.1. ZUSAMMENFASSUNG .....	146
11.2. KRITISCHE REFLEXION.....	148
11.3. AUSBLICK.....	150
<b>ANHANG A: USE-CASES ZUR GEWINNUNG DER ANFORDERUNGEN.....</b>	<b>152</b>
<b>ANHANG B: ANFORDERUNGEN AN EIN INTERDISZIPLINÄRES WIEDERVERWENDUNGSKONZEPT .....</b>	<b>160</b>
<b>ANHANG C: MERKMAL- UND ENTSCHEIDUNGSBASIERTE VARIABILITÄTSMODELLIERUNG .....</b>	<b>169</b>

**ANHANG D: ERGEBNISSE UND MODELLE DER FALLSTUDIE**  
**„MEERWASSERENTSALZUNGSANLAGE“ .....171**

**ANHANG E: ERGEBNISSE UND MODELLE DER FALLSTUDIE**  
**„EXTRAKTIVER GASANALYSATOR“ .....177**

**LITERATURVERZEICHNIS.....184**

LITERATUR ..... 184

NORMEN, RICHTLINIEN UND EMPFEHLUNGEN ..... 200

VERÖFFENTLICHUNGEN DES AUTORS ..... 202

STUDENTISCHE ARBEITEN..... 203

REFERENZIERTER INTERNETQUELLEN ..... 204

REFERENZIERTER SOFTWARE ..... 205

**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.
Anlagenteil	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 <sup>@</sup> ].

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 einer 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.

