

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 8

Mess-,  
Steuerungs- und  
Regelungstechnik

Nr. 1266

M.Sc. Constantin Wagner,  
Karben

Konzept zur Unter-  
stützung der  
dezentralen Wieder-  
verwendung in  
komponentenbasierten  
Systemen der  
operativen Leittechnik



Lehrstuhl für  
Prozessleittechnik  
der RWTH Aachen



“Konzept zur Unterstützung der dezentralen Wiederverwendung in komponentenbasierten Systemen der operativen Leittechnik“

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **M. Sc.**

**Constantin August Wilhelm Wagner**

aus Berlin.

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2019



# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 8**

Mess-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

M.Sc. Constantin Wagner,  
Karben

**Nr. 1266**

Konzept zur Unter-  
stützung der  
dezentralen Wieder-  
verwendung in  
komponentenbasierten  
Systemen der  
operativen Leittechnik



Lehrstuhl für  
Prozessleittechnik  
der RWTH Aachen

Wagner, Constantin

## **Konzept zur Unterstützung der dezentralen Wiederverwendung in komponentenbasierten Systemen der operativen Leittechnik**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1266. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

160 Seiten, 54 Bilder, 3 Tabellen.

ISBN 978-3-18-526608-9 ISSN 0178-9546,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Prozessleittechnik – Wiederverwendung – Variantenmodell – Komponentensysteme – Delta-Modellierung

Die Wiederverwendung von Teillösungen in komponentenbasierten Systemen der Automatisierungstechnik findet in der Praxis, wenn überhaupt, wenig systematisch statt. In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Beschreibung und Wiederverwendung von Komponentensystemen vorgestellt. Grundlagen des Konzepts sind eine auf Delta-Modellen basierende Variantenbeschreibung und ein Modell zur Abstraktion von Komponentensystemen. Dadurch ist es möglich, Komponentensysteme unabhängig von deren konkreter Realisierung zu beschreiben und wiederzuverwenden. Für die Anwendung in der Praxis wird zusätzlich ein Mechanismus zur Bekanntmachung und Verteilung der Wiederverwendungsgegenstände vorgestellt. Dieser besteht aus Prozessen zur Anwendung der Modelle sowie der dafür notwendigen Dienste. Das Konzept wurde prototypisch realisiert und an Software- und hybriden Systemen erprobt.

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

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.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  
[www.dnb.de](http://www.dnb.de).

D82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)  
Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2019

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-526608-9

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessleittechnik der RWTH Aachen. Auf diese Jahre blicke ich mit Dankbarkeit für die Unterstützung und die gewährten Chancen zurück. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mir während dieser Zeit zur Seite gestanden haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Epple für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Die konstruktive Atmosphäre am Lehrstuhl und der ausgezeichnete fachliche Austausch mit ihm bildeten die Basis für den erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit. Durch die gebotenen Freiräume konnte ich unterschiedliche Facetten der Automatisierungstechnik kennenlernen und so meinen Horizont erweitern.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Alexander Fay, Inhaber der Professur für Automatisierungs-technik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, möchte ich mich für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters und lehrreichen Gespräche bedanken.

Ich danke meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und die interessanten, teils auch kontroversen, Diskussionen. Bei Frau Milescu bedanke ich mich insbesondere für die organisatorische Hilfe und die gute Zusammenarbeit bei der Lehrstuhlverwaltung.

Bei den Mitgliedern des Arbeitskreises 2.2 „Prozessführung“ der NAMUR bedanke ich mich für den lehrreichen fachlichen Austausch. Durch die Gespräche habe ich wertvolle Einblicke in die Praxis erhalten.

Bei meiner Freundin Katharina Schüller möchte ich mich für die Unterstützung während der vergangenen Jahre bedanken. Insbesondere während der intensiven Phasen war sie mir ein großer Rückhalt.

Abschließend danke ich meinen Eltern Albertine und Michael Wagner sowie meiner Schwester Charlotte für die Unterstützung während meines Studiums und anschließend während meiner Promotion. Immer standen sie mir mit Rat und Tat zur Seite.

Karben, im Mai 2019

*Constantin Wagner*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b>	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>X</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Problemdefinition und Lösungsweg . . . . .	5
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>8</b>
2.1 Grundlagen der Automatisierungstechnik . . . . .	8
2.1.1 Aufbau von Dezentralen Prozessleitsystemen . . . . .	10
2.1.2 Package Units und Modulare Anlagen in der Prozessindustrie . . . . .	17
2.1.3 Engineering von automatisierten Systemen . . . . .	19
2.1.4 Quo vadis Automatisierungstechnik? – Ein Ausblick im Zeitalter von Industrie 4.0 . . . . .	22
2.2 Komponentenbasierte Architekturen . . . . .	24
2.2.1 Der Komponentenbegriff . . . . .	24
2.2.2 Komponentenbasierte Architekturen in der Automatisierungstechnik . . . . .	30
2.3 Zwischenfazit . . . . .	32
<b>3 Anforderungen an das Konzept im Kontext der Automatisierungstechnik</b>	<b>34</b>
3.1 Besonderheiten in der Automatisierungstechnik . . . . .	34
3.2 Anforderungen an das Konzept . . . . .	36
<b>4 Stand der Wissenschaft</b>	<b>39</b>
4.1 Eigene Vorarbeiten . . . . .	39
4.2 Grundlagen der Wiederverwendung . . . . .	40
4.2.1 Gegenstand der systematischen Wiederverwendung . . . . .	41
4.2.2 Arten der Wiederverwendung . . . . .	43
4.2.3 Versionen und Versionierung . . . . .	43
4.2.4 Wiederverwendung in der Automatisierungstechnik . . . . .	45
4.3 Grundlagen der Variantenbeschreibung . . . . .	46
4.3.1 Varianten und Variabilität . . . . .	47
4.3.2 Variabilitätsmodelle . . . . .	51
4.3.3 Delta-Modelle in der Softwaretechnik . . . . .	55

## Inhaltsverzeichnis

4.4	Modellierungsgrundlagen . . . . .	59
4.4.1	Ebenen der Modellierung - Metamodelle als Wegbereiter der Interoperabilität . . . . .	61
4.4.2	Modellierungssichten . . . . .	67
4.4.3	Modelle in der Automatisierungstechnik . . . . .	69
4.5	Diskussion des Stands der Wissenschaft . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Wiederverwendung in komponentenbasierten Architekturen</b>	<b>76</b>
5.1	Komponenten-Metamodell - Basis für die Wiederverwendung . . . . .	78
5.1.1	Modellbeschreibung . . . . .	78
5.1.2	Anwendungsregeln für die Komponenten-Metamodelle . . . . .	82
5.1.3	Einordnung des Komponenten-Metamodells . . . . .	84
5.1.4	Abgebildete Implementierungen . . . . .	84
5.2	$\Delta$ – Metamodell . . . . .	87
5.2.1	Modellbeschreibung . . . . .	88
5.2.2	Variantenbeschreibung mit Delta-Modellen . . . . .	90
5.2.3	Verketten von Delta-Modellen . . . . .	92
5.2.4	Visualisierung . . . . .	95
5.2.5	Mapping in den Problemraum . . . . .	96
5.3	Gesamtkonzept für die variantenbasierte Wiederverwendung . . . . .	97
5.3.1	Überblick über das Konzept . . . . .	97
5.3.2	Modelltransformationen . . . . .	100
5.3.3	Gegenstand der Wiederverwendung . . . . .	104
5.3.4	Die verteilte Nutzung der Modelle . . . . .	105
5.3.5	Verwendung in der Praxis . . . . .	108
5.4	Kritische Betrachtung des Konzepts . . . . .	111
5.4.1	Added Values . . . . .	111
5.4.2	Randbedingungen . . . . .	112
5.4.3	Handlungsempfehlungen . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Prototypische Realisierung und Anwendungsfälle</b>	<b>115</b>
6.1	Implementierung in ACPLT/RTE . . . . .	115
6.1.1	Umsetzung der Modelle . . . . .	116
6.1.2	Realisierung der dezentralen Struktur . . . . .	117
6.2	Anwendungsfälle . . . . .	120
6.2.1	PID-Regler-Baustein . . . . .	120
6.2.2	Prozessführungskomponenten . . . . .	121
6.2.3	Modulare Anlage M4P.AC . . . . .	125
6.3	Evaluierung der Implementierung . . . . .	126
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>129</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>132</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>133</b>

# Abkürzungen

**DDS** Data Distribution Service

**ERP** Enterprise Resource Planning

**I4.0** Industrie 4.0

**MES** Manufacturing Execution System

**MTP** Module Type Package

**MPC** Model Predictive Control

**NAMUR** Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie

**OMG** Object Management Group

**OPC UA** OPC Unified Architecture

**PLS** Prozessleitsystem

**POE** Programmorganisationseinheit

**SOA** Service orientierte Architektur

**SPS** Speicherprogrammierbare Steuerung

**UML** Unified Modeling Language

# Kurzfassung

Im Rahmen der Entwicklung von Automatisierungslösungen sind der überwiegende Anteil der durchgeführten Arbeiten repetitiver Art. Diese wiederholenden Arbeiten sind fehleranfällig und entscheiden nur in geringem Maße über den Projekterfolg. Daher lohnt es sich, die Mitarbeiter bei diesen Arbeiten zu unterstützen, so dass mehr Ressourcen für andere Tätigkeiten zur Verfügung stehen. Die entwickelten Automatisierungslösungen ähneln sich sehr häufig funktional oder auch ihre Implementierung betreffend. Dies führt zur Wiederverwendung von Lösungen bzw. Teillösungen. Diese Wiederverwendung ist meist unsystematisch und nicht explizit dokumentiert. Daraus ergeben sich Herausforderungen für die Erweiterung oder Änderung von mehrfach genutzten Lösungen. Im Zuge des demografischen Wandels und der damit einhergehenden Verknappung von qualifizierten Arbeitskräften muss die Arbeit effizienter werden. Eine Möglichkeit die Effizienz zu verbessern ist die Nutzung von Methoden und Tools zur Unterstützung der Wiederverwendung.

In der Automatisierungstechnik ist der Einsatz von komponentenbasierten Systemen (z. B. Funktionsbausteine IEC 61131 oder Package Units) sehr verbreitet. Dabei handelt es sich um hybride Systeme, d.h. sowohl um Hard- als auch um Softwaresysteme. Der Fokus der Automatisierungstechnik liegt auf der Betrachtung von hybriden Systemen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept zur Unterstützung der Wiederverwendung in komponentenbasierten Architekturen vorgestellt. Als erstes wird dafür der Begriff der Komponente sowohl für Hard- als auch für Softwarekomponenten gleichermaßen definiert. Damit ist es möglich, die unterschiedlichen Komponentenarten gleich zu behandeln. Ergebnis dieser Betrachtung ist ein Metamodell für die Beschreibung von Komponentensystemen. Das Komponenten-Modell besteht aus einem Teil zur Beschreibung von Komponententypen und einem zweiten Teil zur Beschreibung von Systemen, die aus Instanzen zusammengesetzt sind. Kern des Konzepts zur Unterstützung der Wiederverwendung ist das Delta-Modell aus der Informatik. Dieser Ansatz beschreibt die Variabilität im Problemraum. So können implementierungspezifische Unterschiede zwischen Varianten modelliert werden. Für die Beschreibung der Delta-Modelle wird ein objektorientiertes Delta-Modell vorgestellt. Auf Basis des Delta-Modells wird ein Abstandsmaß für die Beschreibung der Unterschiedlichkeit von Varianten vorgestellt.

Aufbauend auf dem Komponenten- und dem Delta-Modell wird ein Mechanismus zur Nutzung der beschriebenen Varianten in der dezentralen Entwicklung und Verwendung von Automatisierungslösungen vorgestellt. Grundlage für den Mechanismus ist eine Server-Client Architektur. Auf dem Server werden alle für den Kontext relevanten Typ- und Delta-Modelle gespeichert. Aus diesen können für den konkreten Anwendungsfall die Instanz-Modelle gebildet und auf den Client heruntergeladen werden. Mit den auf dem Client vorhandenen Typ-Modellen, den darin enthaltenen Referenzen zwischen Komponenten-Typ-Modellen und ihren Implementierungen können die konkreten Komponentensysteme

aufgebaut werden. Der Manager des Clients führt eine Liste der verwendeten Varianten und bietet die Möglichkeit, nach neueren Varianten auf dem Server zu suchen und diese herunterzuladen.

Das Konzept unterstützt den Nutzer bei der Wiederverwendung in komponentenbasierten Systemen. Es bietet mit dem Delta-Modell einen Mechanismus zur abstrakten Beschreibung des Wiederverwendungsgegenstands. Durch das Komponenten-Modell können sowohl die Komponenten-Typen als auch die Systeme aus Instanzen unabhängig von ihrer konkreten Implementierung beschrieben werden. Durch diese Trennung zwischen dem konkreten System und der Variabilitätsbeschreibung wird das in den Komponentensystemen enthaltene Wissen leicht in neue Systeme übertragbar. Dazu müssen die Typ-Modelle auf die jeweiligen Implementierungen projiziert werden. Zusätzlich wird eine Trennung zwischen den Versionen einer Komponente und den Varianten eines Komponentensystems geschaffen.

Für die Wiederverwendung von Lösungen ist es erforderlich, dass der potentielle Nutzer von einer bereits bestehenden Lösung Kenntnis hat. Zur Förderung der Bekanntheit von bestehenden Lösungen und zur Unterstützung von deren Austausch zwischen verschiedenen Systemen dient der Mechanismus zur dezentralen Nutzung. Nutzer können so die vorhandenen Lösungen erkunden und die Zusammenhänge zwischen ihnen erkennen.

Das vorgestellte Konzept wurde in am Lehrstuhl für Prozessleittechnik der RWTH Aachen entwickelten Laufzeitumgebung ACPLT/RTE prototypisch umgesetzt und erprobt. Die beschriebenen Modelle wurden in Bibliotheken der Laufzeitumgebung realisiert. Die Architektur mit den Managern für Server und Client, sowie die notwendigen Transformationen der Modelle, wurden ebenso implementiert. An drei Anwendungsfällen wurde das Konzept erprobt. Erster Anwendungsfall ist die Beschreibung von Bausteinen für PID-Regler. Die verschiedenen Ausprägungen der Prozessführungskomponenten des Lehrstuhls sind der zweite Anwendungsfall. Als Testfall für ein hybrides System diente die modulare Anlage des Lehrstuhls für Prozessleittechnik.

# Abstract

A huge part of the tasks conducted in the development of automation solutions is repetitive. Those repetitive work is error-prone and mostly not that relevant for the success of projects. Hence, it is beneficial to support the user to fulfill these repetitive tasks such that more resources can be used for tasks that are more relevant for the project's success. Most of the developed automation solutions are similar regarding their functionality or their implementation. This leads to the reuse of solutions or solution parts. Nowadays, this reuse is mostly unsystematic and not documented explicitly. As a result, extending or modifying solutions that are used more than once is challenging. Considering the demographic change and the resulting reduction of manpower, working must be more efficient. One way to increase the efficiency is to use methods and tools to support the reuse of solutions in an appropriate way.

Component-based systems are very much used in the automation domain. Examples are function blocks of the IEC 61131 or package units. Regarding the focus of the automation domain, most systems are hybrid systems. Those systems can consist of hard and software components.

In this thesis, a concept to support the reuse in component-based architectures is introduced. First, the definition for components used in this thesis are presented. These cover both hard and software components. Starting from the definition a metamodel for the description of component systems. It consists of a part for describing component types and another part to describe the systems built of the instances. Core element of the concept to support the reusability is the delta model that is well-known in the software development domain. Those delta models are used to describe the variability in the solution space. The great advantage of these models is that implementation specific differences between variants can be considered. The delta models are described by an object-oriented model and are the basis for an approach to calculate the differences between variants.

Additionally to the component and delta model, a mechanism to use the variants of automation solutions in a decentralized development and usage is presented. Basis for this mechanism is a server- client architecture. Inside the server, all relevant type and delta models are stored. By combining these models, the concrete instance models describing a specific variant can be generated and sent to a client. By mapping between the types and corresponding components on the client, the instance model can be transformed in a component model. The client's manager holds a list of all variants used on the client and provides the feature to search for new variants on the server. Found variants can be downloaded from the server by the client manager.

This concept supports users with the reuse in component-based systems. The delta model is provided as a mechanism for the abstract description of the subject of reusability. The component model allows it to handle solutions in an abstract manner, independent from

their concrete realization. By this separation, the knowledge included in component-based systems can easily be transferred into new systems. Only the transformation of types into new implementations is required. Additionally, the concept supports the separation between variants and versions. Different realizations of the same component type are versions of the component. Because those realizations are compatible to each other their change has no effect on a component system. Change in the structure or the types of components in a component system leads to a new variant.

In order to reuse solutions, it is necessary that a potential user is aware of an existing solution. To support the prominence of existing solutions and their exchange between different systems the mechanism for the decentralized usage is introduced. Users can explore existing solutions and the relations between them.

The concept was prototypically implemented in the runtime environment of the Chair of Process Control Engineering at RWTH Aachen University. The introduced models have been implemented in the object-oriented structure of the runtime environment. The decentralized approach along with the managers for the server and client have been realized as well. Three use cases have been used to test the concept. The first one is modeling and handling the different variants of a PID control block. The description of the various types of process control blocks of the Chair of Process Control Engineering is the second use case. As the third testcase for hybrid systems the chairs modular plant was utilized.

