



NR. 876

Fortschritt-Berichte VDI

M. Sc. Torben Miny,
Aachen

Konzept für
die semantische
Interoperabilität
zwischen
Informationsmodellen

BAND
1|1

VOLUME
1|1



Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

**Konzept für die semantische Interoperabilität zwischen
Informationsmodellen**

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

Torben Miny, M. Sc.

Berichter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple
Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich
Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert

Tag der mündlichen Prüfung: 21.01.2022



REIHE 10
INFORMATIK/
KOMMUNIKATION



Fortschritt- Berichte VDI

M. Sc. Torben Miny,
Aachen

NR. 876

Konzept für
die semantische
Interoperabilität
zwischen
Informationsmodellen

BAND
1|1

VOLUME
1|1

ACPLT
AACHENER
PROZESSLEITTECHNIK

Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

Miny, Torben

Konzept für die semantische Interoperabilität zwischen Informationsmodellen

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 876. Düsseldorf: VDI Verlag 2022.

196 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18-387610-5, ISSN 0178-9627,

71,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 63,90

Für die Dokumentation: Semantic Interoperability – Model Transformation – Object Constraint Language – Asset Administration Shell – Asset Information Models

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen im Umfeld von Industrie 4.0. Sie befasst sich mit der semantischen Interoperabilität zwischen digitalen Asset-Repräsentationen. Hierbei liegt der Fokus auf dem Austausch von Asset-Informationen mit Hilfe von Informationsmodellen. Derzeit werden eine Vielzahl von Informationsmodellen von verschiedenen Organisationen entwickelt. Diese enthalten vielfach semantisch identische Informationen, modellieren diese ggf. aber jeweils unterschiedlich. Kern der Arbeit ist eine neue Modelltransformationssprache zur Erstellung von Transformationsdefinitionen zwischen Informationsmodellen, um (semi-)automatisch Informationsmodelle aus anderen zu erzeugen. Die Sprache basiert auf der Object Constraint Language, ist allgemein und vollständig spezifiziert und kann in bestehende Automatisierungssystemen verwendet werden.

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 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.

D82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2022

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.

ISBN 978-3-18-387610-5, ISSN 0178-9627

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessleittechnik an der RWTH Aachen University. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in dieser Zeit fachlich und persönlich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Epple. Seine Unterstützung für mein Promotionsvorhaben, die angenehme Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl und die vielen fachlichen Diskussionen und persönlichen Gespräche haben meine Arbeitsweise maßgeblich geprägt. Durch die vielfältigen Aufgaben am Lehrstuhl und die Teilnahme in diversen Gremien konnte ich mich frei entfalten und einen guten Überblick über die verschiedenen Facetten der Automatisierungstechnik und deren Schnittstelle zur Informatik erhalten.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Diedrich, Inhaber der Professur für Integrierte Automation an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, bedanke ich mich für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters. Die vielen fachlichen Diskussionen halfen mir in der Durchführung dieses Promotionsvorhabens sehr.

Zusätzlich danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Tobias Kleinert, Lehrstuhl-Nachfolger von Herrn Epple, für die Unterstützung in den letzten knapp 2 Jahren meiner Promotion. Herrn Professor Dr.-Ing. Herbert Pfeifer, Leiter des Instituts für Industrieofenbau und Wärmetechnik, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitz.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen am Lehrstuhl für die intensiven und teils kontroversen Diskussionen sowie den studentischen Hilfskräften und Studierenden, die bei mir eine Abschlussarbeit geschrieben haben. Besonders bedanken möchte ich mich (in alphabatischer Reihenfolge) bei Julian Grothoff, Leon Möller und Michael Thies. Ein herzlicher Dank gilt an Frau Margarete Milescu, die mich bei den diversen organisatorischen Tätigkeiten stets unterstützt hat.

Ein weiterer Dank gilt an die Mitglieder der verschiedenen Arbeitskreise, in denen ich mitarbeiten durfte (Plattform Industrie 4.0, DIN, DKE, VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, OPC Foundation). Die vielen Gespräche haben mir einen wertvollen Einblick in das Thema Industrie 4.0 und deren praktische Anwendung gegeben.

Meiner Ehefrau Luisa Miny möchte ich für die Unterstützung, Geduld und Motivation in den vergangenen Jahren und insbesondere in der intensiven Phase bedanken. Abschließend danke ich meinen Eltern Gabi Rohde-Deppe und Torsten Deppe, die mich immer mit Tat und Rat unterstützt und mich auf diesen Weg geführt haben.

Aachen, im Januar 2022

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	X
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Gliederung	5
1.3 Eigene Vorveröffentlichungen	6
2 Modellierung	8
2.1 Sprache und Metasprache	8
2.2 Modell und Metamodell	8
2.3 Modellsprachen	10
2.4 Typ und Instanz	13
2.5 Identifikation von Objekten	15
3 Object Constraint Language	16
3.1 Anwendung von OCL	17
3.2 Abstrakte Syntax von BasicOCL	19
3.3 Konkrete Syntax von BasicOCL	22
4 Interoperabilität	25
4.1 Stufen der Interoperabilität	26
4.2 Aktuelle Ansätze für Interoperabilität	30
5 Modelltransformation	33
5.1 Begriffswelt der Modelltransformation	33
5.2 Merkmale von Modelltransformationen	35
5.2.1 Allgemeine Merkmale	35
5.2.2 Merkmale der Quell- und Ziel-(meta-)modelle	37
5.2.3 Merkmale der Transformationsregeln	38
5.2.4 Merkmale der Regelnutzung	40
5.3 Modell-zu-Modell Transformationsansätze	41
5.3.1 Imperativer/Operationaler Ansatz	41
5.3.2 Relationaler/Deklarativer Ansatz	42
5.3.3 Graph-basierter Ansatz	43
5.3.4 Hybrider Ansatz	43

5.4 Transformationssprache und -system	44
5.4.1 Generische und domänenpezifische Transformationssprachen	44
5.4.2 Erstellung von Transformationssprachen	45
6 Modellierung und Austausch von Asset-Informationen	48
6.1 Aktuelle Normungslandschaft für Eigenschaften	49
6.2 Digital Factory Framework - International Electrotechnical Commission	50
6.2.1 Ziel und Anwendungsbereich	51
6.2.2 Informationsmodell	51
6.3 Asset Administration Shell - Plattform Industrie 4.0	54
6.3.1 Ziel und Anwendungsbereich	54
6.3.2 Informationsmodell	55
6.4 Thing Description - Web of Things	57
6.4.1 Ziel und Anwendungsbereich	58
6.4.2 Informationsmodell	58
6.5 Vergleich	60
6.5.1 Asset-Begriff	60
6.5.2 Ziel, Anwendungsbereich und Informationsmodell	61
6.6 Schlussfolgerung	62
7 Informationsaustausch bei Verwaltungsschalen	63
7.1 Erscheinungsformen	63
7.1.1 Typ 1	63
7.1.2 Typ 2	64
7.1.3 Typ 3	65
7.1.4 Vergleich	65
7.2 Nutzung von Verwaltungsschalen-Teilmödellen für semantische Interoperabilität: Offene Fragestellungen und mögliche Lösungsoptionen	66
8 Modelltransformationen für die semantische Interoperabilität zwischen verschiedenen Informationsmodellen	69
8.1 Syntaktische und semantische Transformationen	69
8.2 Klassifikation der Transformationen	71
8.3 Anforderungen an die zu entwickelnde Transformationssprache	72
8.3.1 Allgemeine Anforderungen	72
8.3.2 Benötigte Transformationssprachelemente	73
8.4 Evaluation bestehender Transformationssprachen	76
8.5 Fazit	77
9 Metamodell der Modelltransformationssprache	78
9.1 Benötigte Sprachelemente und deren Semantik	78
9.2 Syntaxregeln und konkrete Syntax	81
9.3 Evaluation der Sprache	86
10 Abbildung der Modelltransformationssprache für Verwaltungsschalen	87
10.1 Anpassungen des Informationsmodells	87
10.2 Makros für das vollständige Kopieren von SubmodelElement-Objekten	89

10.3 Makros für den Zugriff auf ein SubmodelElement-Objekt	90
11 Transformationssystem	93
11.1 Allgemeiner Aufbau eines Transformationssystems	93
11.2 Umsetzung in Python	95
12 Evaluation	98
12.1 Anwendungsfall 1: Firmenspezifische Informationsmodelle	98
12.2 Anwendungsfall 2: Verschiedene Versionen standardisierter Informationsmodelle	99
12.3 Anwendungsfall 3: Integration von Komponenten und zugehörigen Informationsmodellen	102
12.4 Benötigte Zeit für die Erstellung einer Transformationsdefinition	104
12.5 Optimierung der Funktionsaufrufe im Lebenszyklus einer Komponente bei Nutzung des entwickelten Transformationssystems	104
13 Zusammenfassung	108
13.1 Ausblick	109
Anhang	111
A Makro-Definitionen für Verwaltungsschalen	111
B Grammatikdefinition der Transformationssprache	117
B.1 Grammar_ocl.lark	117
B.2 Grammar_mtl.lark	124
C Python-Klassendefinition der abstrakten Syntaxklassen	126
C.1 ast_ocl.py	126
C.2 ast_mtl.py	145
D Anwendungsfall 1: Firmenspezifische Informationsmodelle	156
D.1 ZVEI Digital Nameplate for industrial equipment (Version 1.0)	156
D.2 Digital Nameplate for Galaxie®Actuator der Firma WITTENSTEIN galaxie GmbH	157
D.3 Transformationsdefinition zwischen dem WITTENSTEIN und dem ZVEI Teilmodell-Template	158
E Anwendungsfall 2: Verschiedene Versionen eines Informationsmodells	159
E.1 Version 1 des Teilmodell-Templates ManufacturerDocumentation basierend auf der VDI 2770 Spezifikation	159
E.2 Version 2 des Teilmodell-Templates ManufacturerDocumentation basierend auf der VDI 2770 Spezifikation	160
E.3 Version 3 des Teilmodell-Templates ManufacturerDocumentation basierend auf der VDI 2770 Spezifikation	161
E.4 Transformationsdefinition zwischen den Versionen 1 und 2	161
F Anwendungsfall 3: Integration von Komponenten und zugehörigen Informationsmodellen	164
G Testergebnisse der Versuchreihen	166
Literaturverzeichnis	170

Abkürzungen

ADT Abstrakter Datentyp

API Application Programming Interface

ATL Atlas Transformation Language

DF Framework Digital Factory Framework

DSL Domain Specific Language

DSTL Domain Specific Transformation Language

EBNF Erweiterte Backus-Naur-Form

ETL Epsilon Transformation Language

ETSI European Telecommunications Standards Institute

GPL General Purpose Language

GPTL General Purpose Transformation Language

GUID Globally Unique Identifier

IEC International Electrotechnical Commission

IEC61360-CDD IEC 16360 - Common Data Dictionary

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT Internet of Things

IRI Internationalized Resource Identifier

ISO International Organization for Standardization

IT Informationstechnologie

MOLA Model Transformation Language

OCL Object Constraint Language

OMG Object Management Group

OPC UA OPC Unified Architecture

OWL Web Ontology Language

QVT Query View Transformation

RAMI4.0 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

RDF Resource Description Framework

RDFS Resource Description Framework Schema

SDK Software Development Kit

SQL Structured Query Language

TGG Triple Graph Grammatik

UML Unified Modeling Language

URI Uniform Resource Identifier

UUID Universally Unique Identifier

VIATRA Visual Automated Model Transformations

W3C World Wide Web Consortium

WoT Web of Things

ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Kurzfassung

Im Rahmen des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ der Hightech-Strategie der Bundesregierung wird das Konzept der Verwaltungsschale entwickelt. Das Ergebnis ist eine einheitliche Schnittstelle und ein Metamodell für den Zugriff auf die Informationen eines Assets. Diese Informationen werden in Informationsmodellen zusammengefasst, die jeweils einen Aspekt eines Assets darstellen und für einen konkreten Anwendungsfall verwendet werden. Durch die steigende Anzahl an kommunizierenden Geräten im industriellen Kontext, die vermehrte Nutzungen von Informationen für Mehrwertdienste (value-added services) und die Integration zu komplexen, intelligenten Maschinen und Anlagen rücken Konzepte für die Interoperabilität in den Fokus. Die semantische Interoperabilität ist ein wesentliches Ziel beim Austausch von Asset-Informationen.

Da verschiedene Stakeholder unterschiedliche Informationsmodelle benötigen, wird es eine Vielzahl dieser Informationsmodelle geben. Diese Informationsmodelle können semantisch die gleichen Informationen enthalten, jedoch anders modelliert oder zusammengestellt sein. Zusätzlich wird es verschiedene Versionen dieser Informationsmodelle geben. Dies führt zu einem Problem bei der semantischen Interoperabilität und ist durch manuelles Transformieren der Daten wegen der Vielzahl an Informationsmodellen und Assets, die digital verwaltet werden, nur noch schwer zu bewerkstelligen.

Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit ein Konzept für die semantische Interoperabilität zwischen Informationsmodellen vorgestellt. Basierend auf einer Analyse existierender Methoden und Ansätze zur Erreichung der semantischen Interoperabilität wird das Konzept der Modelltransformation zur Lösung des Problems verwendet. Für den Asset-bezogenen Informationsaustausch werden aktuelle standardisierte Modelle miteinander verglichen und das Konzept der Verwaltungsschale als Anwendungsbeispiel herangezogen. Anhand dieses Anwendungsbeispiels wird der Unterschied zwischen syntaktischen und semantischen Transformationen vorgestellt sowie eine Klassifikation der Transformation mit Hilfe zuvor definierter Merkmale durchgeführt. Auf dieser Basis werden Anforderungen an eine Transformationssprache ermittelt und existierende Sprachen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit evaluiert.

Das Ergebnis der Anforderungsanalyse ist, dass bisher keine Sprache existiert, die alle Anforderungen erfüllt. Daher wird eine neue Modelltransformationssprache hergeleitet. Diese ist generisch beschrieben und wird für das Konzept der Verwaltungsschale konkretisiert. Es werden sowohl die abstrakte als auch die konkrete Syntax sowie die benötigten Syntaxregeln vorgestellt. Eine prototypische Realisierung eines Transformationssystems zeigt die Anwendung der Sprache und ermöglicht die Durchführung von Modelltransformationen zwischen beliebigen Informationsmodellen. Abschließend wird die Sprache anhand von drei ausgewählten Anwendungsfällen evaluiert.

Abstract

As part of the future project Industry 4.0 of the High-Tech Strategy of the German Federal Government, the concept of the asset administration shell is being developed. The result is a uniform interface and a metamodel for accessing the information of an asset. This information is summarized in information models, each of which represents an aspect of an asset and is used for a specific use case. Due to the increasing number of communicating devices in the industrial context, the increased use of information for value-added services and the integration to complex, intelligent machines and plants, concepts for interoperability are coming into focus. Semantic interoperability is a key goal in the exchange of asset information.

Since different stakeholders require different information models, a variety of these information models will exist. These information models may semantically contain the same information, but may be modeled or compiled differently. Additionally, there will be different versions of these information models. This leads to a semantic interoperability problem and is difficult to manage by manually transforming the data because of the large number of information models and assets that are digitally managed.

For this reason a concept for semantic interoperability between information models is presented in this thesis. Based on an analysis of existing methods and approaches to achieve semantic interoperability, the concept of model transformation is used to solve the problem. For asset-related information exchange, current standardized models are compared and the concept of the asset administration shell is used as an application example. Based on this application example, the difference between syntactic and semantic transformations is introduced and a classification of the transformation is performed using previously defined features. On this basis, requirements for a transformation language are determined and existing languages are evaluated with respect to their usability.

The result of the requirements analysis is that so far no language exists that fulfills all requirements. Therefore a new model transformation language is derived. This is described generically and is concretized for the concept of the asset administration shell. Both the abstract and the concrete syntax as well as the required syntax rules are presented. A prototypical realization of a transformation system shows the application of the language and enables the execution of model transformations between arbitrary information models. Finally, an evaluation of the language is presented based on three selected use cases.

