

René Ebeling

**Bimodaler Ansatz einer
domänenübergreifenden
Informationsverwaltung
am Beispiel fotorealistischer
Visualisierungsdaten**

Schriftenreihe VPE

Band 26

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner

Bimodaler Ansatz einer domänenübergreifenden Informati- onsverwaltung am Beispiel fotorealistischer Visualisierungsdaten

Dem Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte
Dissertation

von
Herrn
René Ebeling

aus Stuttgart
2020

Betreuer der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner

René Ebeling

**Bimodaler Ansatz einer domänenübergreifenden
Informationsverwaltung am Beispiel fotorealistischer
Visualisierungsdaten**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8537-2

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG im Virtual Reality Center des Mercedes Benz Technology Centers in Sindelfingen.

Bei der wissenschaftlichen Ausarbeitung der Arbeit wurde ich von meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ing. Martin Eigner, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Virtuelle Produktentwicklung (VPE) der Technischen Universität Kaiserslautern, betreut.

An erster Stelle möchte ich mich vor allem bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner für die konstruktiven Diskussionen, Gespräche und Denkansätze sowie für die Möglichkeit zur Durchführung der Promotion bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer, Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik/CAD, für die Übernahme der Zweitberichtserstattung und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens C. Göbel, Inhaber des Lehrstuhls für Virtuelle Produktentwicklung (VPE) der Technischen Universität Kaiserslautern, für die Rolle als Vorsitzender der Prüfungskommission.

Für den erfolgreichen Abschluss meiner Promotion wurde ich durch verschiedene Kollegen der Daimler AG und Mitarbeiter des Lehrstuhls für Virtuelle Produktentwicklung unterstützt. Einen besonderen Dank möchte ich dabei an Herrn Ralf Specht für die fachliche und persönliche Förderung, das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung richten. Außerdem danke ich allen Kollegen des Virtual Reality Centers in Sindelfingen für die hervorragende Zusammenarbeit während meiner Zeit als Doktorand.

Zum Schluss möchte ich mich noch bei meiner Familie für die Unterstützung auf dem Weg zum Abschluss der Promotion bedanken. Ohne den Beistand meiner Großeltern und Eltern Kerstin und Holger Ebeling hätte ich diese Herausforderung nicht meistern können.

Ein besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Lisann Jenrich, die mich in all den Jahren begleitete, mich unterstützte und mich immer wieder motivieren konnte, um die vorliegende Arbeit zu einem erfolgreichen Abschluss bringen zu können.

Stuttgart, Mai 2021

René Ebeling

Kurzfassung

Durch umfangreiche technologische Weiterentwicklungen von Produkten, Geschäftsprozessen und Zusammenarbeitsmodellen entstehen diverse Herausforderungen im heutigen Umfeld eines Unternehmens.

Verstärkt wird dies durch einen zusätzlich steigenden Bedarf an kürzeren Innovationszyklen und individuellen Anpassungen von Systemen und Dienstleistungen. Hieraus folgt die Notwendigkeit zur Verkürzung von Produkt- bzw. Systementstehungsprozessen und entsprechender Lebenszyklen. Die Verkürzung von Prozessen unter der Prämisse individueller und somit variantenreicher Systeme fördert in ihrer Folge eine erhöhte Komplexität, die sich wiederum in der unternehmensinternen Arbeit durch höhere Änderungs- und Pflegeaufwände äußert. Dies führt zu Fehlern und Reklamationen, die neben monetär messbaren Verlusten ebenso Einbußen in Bezug zur Reputation des Unternehmens mit sich bringen.

Um dieser Komplexität entgegenzuwirken, stehen multidisziplinäre Systementwicklungsmethoden, wie z.B. Model-Based Systems Engineering (Abschnitt 2.2) zur Verfügung. Diese Methoden bieten Herangehensweisen zur Definition und Prüfung von Systemen beginnend von der initialen Anforderung bis hin zur Inbetriebnahme. In Kombination mit Product bzw. System Lifecycle Management (Abschnitt 2.1.2) sind umfassende Ansätze zur Verwaltung und Nutzung von Informationen entlang des Produktlebenszyklus vorhanden.

Zu den beschriebenen Einflussfaktoren können weitere einschränkende Aspekte hinzukommen, die auf einen steigenden internationalen Wettbewerb zurückzuführen sind. Dieser entsteht durch eine allgegenwärtige Verfügbarkeit von Systemen und Dienstleistungen sowie durch die damit einhergehende Volatilität der Märkte.

Um diesen Einflussfaktoren entgegenzuwirken, werden weltweit verteilte Produktions- und Entwicklungsstandorte auf- und ausgebaut, was zudem durch die Initiierung und Pflege von Kooperationen weitergetrieben wird.

Durch disziplinierte und unternehmensübergreifende Kooperationen entsteht als Folge ein erhöhter Kommunikations- und Koordinationsaufwand, der durch die Unternehmen mit möglichst geringerem Aufwand zu handhaben sein muss.

Das primäre Ziel der Arbeit geht hierzu konkret auf die Definition und Erläuterung einer einheitlichen, wiederverwendbaren, domänenübergreifenden Verwaltung von Informationen ein, wobei der Fokus auf Artefakte aus den Bereichen virtuelle bzw. erweiterte Realität sowie realitätsnahe Produktvisualisierung gelegt wird (Abschnitt 2.3). Die damit verbundenen Informationen werden über den gesamten Lebenszyklus für verschiedene Systeme betrachtet und bieten dadurch einen übergreifenden Ansatzpunkt zur Untersuchung. Zudem werden kontextbezogene Daten bzw. Informationen benötigt, um Szenarien zu definieren und Evaluierungen durchführen zu können.

Als Fundament der Erörterungen wird der eingangs beschriebene Stand der Technik genutzt, welcher auf unterschiedliche theoretische Grundlagen und praxisnahe Ansätze eingeht. Aufbauend auf diesem theoretischen und praxisbezogenen Fundament werden Handlungsbedarf und Anforderungen hinsichtlich eines ganzheitlichen Ansatzes zur einheitlichen, wiederverwendbaren, domänenübergreifenden Verwaltung von diversen visualisierungsrelevanten Informationen identifiziert (Abschnitt 3).

Zur Erreichung der gestellten Forschungsziele wird in der vorliegenden Arbeit ein konzeptioneller Rahmen definiert und detailliert dargelegt. Hierzu werden vier primäre Bestandteile identifiziert, die die Generierung und Bereitstellung von Informationen (1), die prozessuale Umsetzung (2), die zentrale Verwaltung (3) und Verteilung (4) beleuchten. Als Basis dienen etablierte und aufkommende Web-basierte Technologien, wie z.B. unter Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC) zu finden.

Die beschriebenen Konzeptbestandteile werden als Grundlage zur Implementierung in produktive und prototypische datenerzeugende und -verwaltende Systeme und zur weiteren Detailbetrachtung genutzt. Dabei wird bspw. die Bereitstellung von CAx-bezogenen Informationen ausführlich geschildert und Werkzeuge zur Bearbeitung bereitgestellt. In diesem Kontext werden ebenfalls Prozesse und Klassenstrukturen für den Austausch und die Verwaltung dieser Informationen adressiert. Dies umfasst ebenso eine Möglichkeit zur Verwaltung von Visualisierungsmaterialien und die Verteilung der verbundenen Artefakte.

Der konzeptionelle Rahmen und die Implementierungen werden anschließend diskutiert und an verschiedenen Untersuchungsumfängen kritisch bewertet und evaluiert.

Die gewonnenen Ergebnisse können zur Anwendung in weiteren selbstdefinierten Anwendungsfeldern oder zur Implementierung von Schnittstellen zu zusätzlichen Autoren- oder Verwaltungssysteme genutzt werden, um eine Vernetzung von Informationen im industriellen Umfeld kontinuierlich voranzutreiben.

Abstract

Recent technological developments of products, business processes and cooperation models create various challenges in today's business environment. This is reinforced by an additionally increasing need for shorter innovation cycles and individual adaptations of systems and services. This results in the need to shorten product and system development processes and corresponding life cycles. The shortening of processes under the premise of individual and thus systems with a high variation promotes an increased complexity, which is expressed in internal efforts related to change and maintenance request. This in turn leads to monetary losses caused by the mentioned errors and complaints as well as losses in relation to the reputation of the company.

Multidisciplinary system development methods such as Model-Based Systems Engineering (MBSE in Section 2.2) are used to counteract the described complexity. These related methods provide approaches to define and test systems from initial requirements to commissioning. In addition, product or system lifecycle management (Section 2.1.2) provides comprehensive approaches to manage information along the entire life cycle of products and systems.

Other aspects may be added to these described factors, which are influenced by an increased international competition, a ubiquitous availability of systems and services as well as the associated volatility of business markets.

In order to counteract these influencing factors, globally distributed production and development departments are being set up and expanded, which is also being driven forward through the initiation and usage of cooperation.

As a result of cross-discipline and cross-company cooperation, increased communication and coordination efforts have to be handled.

The primary goal of the following dissertation is the definition and explanation of a uniform, reusable, cross-domain approach for the management of information with a focus on artifacts with respect to virtual and augmented reality (VR/AR) as well as realistic product visualization (Section 2.3). The associated information is considered over the entire life cycle for different systems and thus offers an overarching point for a detailed investigation. In addition, context-related data is required in order to define scenarios and carry out holistic evaluations.

As a basis for discussions, the state of the art describes the theoretical background and different practical approaches. Based on this theoretical and practical knowledge base, the need for a holistic approach to a uniform, reusable, cross-domain management of various visualization-relevant information can be identified. This leads to a definition of requirements related to a holistic approach and an evaluation of existing approaches (Section 3).

In order to achieve the research goals set at the beginning, a conceptual framework is defined and presented in detail. For this purpose, four primary components are identified, which describe generation and supply of information (1), management processes (2), information administration (3) and distribution (4).

Established and emerging web-based technologies related to Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC) are used to meet the overall goal.

The described concept components are used as a basis for implementations in productive and prototypical data generating and managing systems and further detailed considerations. For example, the supply of CAx-related information is described in detail and related tools are provided. In this context, processes and class structures for the exchange and management of this information are also addressed. This includes a way to manage visualization materials and distribute the associated artifacts.

The conceptual framework and implementations are discussed and critically evaluated in various investigation areas.

The obtained results provide a basis for additional use cases and application within other self-defined fields or the implementation of interfaces to additional authoring or management systems. All in all it will lead to continuous enhancements of rich information networks within industrial environments.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2 Motivation	3
1.3 Forschungsansatz	6
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Stand der Technik	10
2.1 Grundlagen des Produkt- und Systemlebenszyklusmanagements	10
2.1.1 Phasen eines Produktlebenszyklus	10
2.1.2 Lebenszyklusmanagement von Produkten, Produktdaten und Systemen ..	11
2.1.3 Begriffe des Wissensmanagements	13
2.1.4 Software-Architektur im Bereich von PDM-/PLM-Systemen	14
2.1.5 Datenbankmanagementsysteme	17
2.1.6 Datensicherheit	18
2.1.7 Variantenmanagement	19
2.1.8 Konfigurationsmanagement	23
2.1.9 Geometriedaten und Begleitinformationen	24
2.1.10 Domänenübergreifender Informationsaustausch	31
2.2 Entwicklungsmethoden und -ansätze	39
2.3 Virtuelle Realität und andere Visualisierungsanwendungen	44
2.3.1 Anwendungsfelder	44
2.3.2 Übersicht zur technischen Umsetzung von virtuellen Szenarien	46
2.4 Software-Systeme und Ansätze zur Verwaltung von 3D Visualisierungsdaten	50
2.4.1 Forschungsansätze	50
2.4.2 Umsetzung in Konfigurationssoftware	52
2.4.3 Industriegetriebene Ansätze	53
2.4.4 PLM-Integration durch Software-Anbieter	55
3 Anforderungsdefinition und Handlungsbedarfe	57
3.1 Anforderungen hinsichtlich der Anwendungsintegration	57

3.2	Anforderungen hinsichtlich des Informationsaustauschs	57
3.3	Anforderungen hinsichtlich der Informationsverwaltung	58
3.4	Analyse zum Stand der Technik in Bezug zu den definierten Anforderungen.....	59
4	Konzeption einer bimodalen Informationsverwaltung.....	61
4.1	Begriffserläuterung in Bezug zum vorgestellten Konzeptrahmen	62
4.2	Rahmenwerk des Gesamtkonzepts.....	62
4.3	Umsetzung im Systemkontext.....	63
4.4	Definition und Einordnung im Systemlebenszyklusnetzwerk	64
4.5	Detailbetrachtung des Rahmenwerks.....	69
4.5.1	Generierung und Bereitstellung.....	69
4.5.2	Prozesse und Verwaltung	74
4.5.3	Systemarchitektur	86
4.5.4	Austausch und Darstellung von visualisierungsrelevanten Informationen..	94
5	Implementierung von Konzept-Bestandteilen	99
5.1	Einordnung und Ziele der Implementierung.....	99
5.2	Umsetzung der Generierung und Bereitstellung von Informationen	100
5.2.1	Konzeption, Bewertung und Auswahl einer persistenten Methodik zur Bereitstellung von kontextbezogenen Geometrie-Daten.....	100
5.2.2	Umsetzung der Strukturierungsmethodik in CAD-Systemen	103
5.2.3	Strukturierung im offenen 3D Standardformat	106
5.3	Prozesse und Verwaltung im etablierten PDM-System	108
5.3.1	Erweitertes Konfigurationsmanagement für Visualisierungsinformationen	108
5.3.2	Verknüpfung von Produkt- und Visualisierungsstruktur	109
5.4	Bestandteile einer domänenübergreifenden bimodalen Informationsverwaltung	110
5.4.1	Informationsvernetzung und Service-Struktur.....	111
5.4.2	Bimodale Verwaltung und Zugriff auf PDM-/PLM-bezogene Daten	114
5.4.3	Verwaltung von Visualisierungsmaterialien	116
5.4.4	Restriktion und Definition von Abhängigkeiten verknüpfter Ressourcen ..	119
5.5	Anbindung von Software-Modulen zur realistischen Visualisierung	122
5.5.1	Übertragung einer instanziierten Visualisierungsstruktur	122
5.5.2	Übertragung von Visualisierungsmaterialinformationen.....	122
5.5.3	Zugriff und Austausch von Informationen in Bezug zu Verhalten am Beispiel von Mehrkörpersimulationen (MKS)	124

6	Eigenschaftsabsicherung des entwickelten Konzepts und implementierter Bestandteile.....	127
6.1	Validierung des entwickelten Konzepts und kritische Diskussion	127
6.1.1	Betrachtung und Diskussion der Anwendungen in verschiedenen Unternehmen	129
6.1.2	Entwicklungsprozessoptimierung	132
6.1.3	RDF Eignung der betrachteten Visualisierungsmaterialverwaltung	134
6.1.4	OSLC Service-Architektur Nutzung und Standardisierung.....	135
6.1.5	Zugriff und Datenübertragung mittels Hypertext Transfer Protocol (HTTP)	136
6.2	Verifikation der implementierten Software-Bestandteile	137
6.2.1	CAX-Aufbereitungsprozess.....	137
6.2.2	PDM-Konfiguration.....	143
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	146
7.1	Zusammenfassung	146
7.2	Ausblick	147
7.2.1	Aufbau und Ausbau von digitalen Systemlebenszyklus-Netzwerken	147
7.2.2	Zusammenführung der Standardisierungsvorgehen.....	148
7.2.3	Adaption innerhalb weiterer digitaler Lebenszyklusprozesse.....	148
8	Anhang.....	149

Abkürzungsverzeichnis

3D-PDF	3D Portable Document Format
ACID	atomar (engl. Atomicity), konsistent (engl. Consistency), isoliert (engl. Isolation), beständig (engl. Durability)
AEAD	Authenticated Encryption with additional Data Encryption
API	Application Programming Interface
BLOB	Binary Large Object
BRep	Boundary Representation
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAID	Computer-Aided Industrial Design
CAS	Computer-Aided Styling
CAX	Computer-Aided X (Everything)
CRM	Customer Relationship Management
CRUD	Erstellen, Lesen, Aktualisieren und Löschen (engl. Create, Read, Update, Delete)
CSG	Constructive Solid Geometry
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DMU	Digital Mock-Up
DTLS	Datagram Transport Layer Security (Protocol)
DXF	Drawing Interchange Format (deutsch Zeichnungsaustauschformat)
ECM	Änderungsmanagement (engl. Engineering Change Management)
ERP	Enterprise Resource Planning
FBX	Filmbox Format
FTP(S)	File Transfer Protocol Secure
GUMID	Global Unique Material Identifier

HSTS	HTTP Strict Transport Security
HTTP(S)	Hyper Text Transfer Protocol Secure
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IRI	Internationalized Resource Identifier
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
JT	Jupiter Tessellation (3D Datenformat)
KBE	Knowledge-Based Engineering
LOD	Level-of-Detail
MBSE	Model-Based Systems Engineering
NoSQL	„nicht nur SQL“ (engl. not only SQL)
OASIS	Organization for the Advancement of Structured Information Standards
OAuth	Open Authentication
OBJ	Object Files Format
OData	Open Data Protocol
ODBMS	objektorientierte Datenbank
ODETTE	Organization for Data Exchange by Tele Transmission in Europe
OFTP(2)	ODETTE File Transfer Protocol
OSI	Open System Interconnection
OSLC	Open Services for Lifecycle Collaboration
OWA	Open World Assumption
OWL	Web Ontology Language
PDM	Product Data Management

PLM	Product Lifecycle Management
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem
RDF	Resource Description Framework
RDFS	Resource Description Framework Schema
REST	Representational State Transfer
RFC	Request for Comments
SaaS	Software as a Service
SCM	Supply Chain Management
SDK	Software Development Kit - Software-Entwicklungswerkzeug
SE	Systems Engineering
SOA	Service-orientierte Architektur
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPARQL	SPARQL Protocol And RDF Query Language
SSL	Secure Sockets Layer (Protocol)
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
SysLM	System Lifecycle Management
SysML	System Modelling Language
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Team Data Management
TLS	Transport Layer Security (Protocol)
U3D	Universal 3D
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
VaaS	Visualization as a Service
VDAIS	Vereinigung Deutsche Automobilindustrie IGES Subset

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRML	Virtual Reality Markup Language (Dateiformat)
W3C	World Wide Web Consortium
X3D	Extensible-3D (Dateiformat)
XML	Extensible Markup Language
YAML	YAML Ain't Markup Language (Dateiformat)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundlegende Darstellung von Informations- und Datenflüssen im Zusammenspiel von CAx-, PDM-/PLM- und Visualisierungssystemen (Vis) in Unternehmensnetzwerken	3
Abbildung 2: Zu betrachtender Kontext der Forschungsarbeit	6
Abbildung 3: Aufbau der Arbeit angelehnt an den „Eightfold Path“ von Eckert [EcStCl03]	8
Abbildung 4: Mehrdimensionale Zusammenarbeit im Rahmen von Entwicklungsprojekten [EiSt09].....	10
Abbildung 5: Beispiel eines derzeit üblichen Architekturkonzept zur software-technischen Umsetzung einer PLM-Strategie nach [EiSt09].....	12
Abbildung 6: Vernetzung einer heterogenen Systemlandschaft in Anlehnung an [EiKoMu17].....	13
Abbildung 7: Beziehungen zwischen den Ebenen der Begriffshierarchie im Kontext Wissen [PrRaRo12]	13
Abbildung 8: Übersicht einer Wissenstaxonomie nach [VaWeHe09]	14
Abbildung 9: Vier-schichtige Client-Server-Architektur eines PDM-Systems nach [VDI16] ...	15
Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Orchestrierung und Choreografie [Pel03, S. 46–52]	16
Abbildung 11: Gerichtete (links) und ungerichtete (rechts) Beziehungen zwischen Knoten im Netzwerk- bzw. Graphen-Datenmodell [Ed11].....	21
Abbildung 12: Hierarchisches Datenmodell am Beispiel der generischen Produktstruktur nach [MäPeMa98, S. 1111–1118].....	22
Abbildung 13: Basiselemente der Datenstruktur eines randkurvenbasierten (BRep) Geometrieobjekt [StNa11].....	25
Abbildung 14: Gegenüberstellung einer VRML (links) und X3D Repräsentation (rechts) einer Dreiecksfläche im Raum	28
Abbildung 15: Schematische Darstellung von Datenaustausch und Kommunikation zwischen verschiedenen Software-Systemen [SN11, S. 399].....	31
Abbildung 16: Auszug aus dem OSI Referenzmodell für den offenen Datenaustausch zwischen Systemen mit Beispiel-Protokollen [ISO94a], [Fri07, FiRe14b, HoLu97].....	32
Abbildung 17: Architektur-Schichten des Semantic Web in Anlehnung an [Obi07]	34
Abbildung 18: Konzepte und Relationen der OSLC Hauptspezifikation [OSL13]	37
Abbildung 19: Abstrakter Ressourcenzugriff mittels OAuth [Har12]	38
Abbildung 20: Das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren im Kontext des Produktkreislaufs mit den Lebensphasen eines Systems [VDI93], [Gil14].....	39

Abbildung 21: V-Modell des Makrozyklus mit den generellen Aufgaben während des Systementwurfs und der Systemintegration [VDI04]	40
Abbildung 22: Prozessrahmenwerk für die cybertronische Produkte (CTP) und Produktionssysteme (CTPS) nach [EiKoMu17]	42
Abbildung 23: Systementwicklungsmethodik ^{VPE} SystemDevelopmentMethodology mit Prozess und Tool Unterstützung [EiDiAp18]	43
Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zwischen reiner Realität und Virtualität [MiTaUt95, S. 282–292]	45
Abbildung 25: Auszug von Datenquellen und –Nutzung entlang des Lebenszyklus und deren beeinflussende Domänen in Anlehnung an [EiRoZa14] und [EbSpEi16]	45
Abbildung 26: Übersicht einer Szenengraph-Architektur mit typischen Knoten, wie Blattknoten (rechts) für i.d.R. visuelle und auditive Effekte und Gruppenknoten zur Strukturierung (links) [BrDöGr13]	49
Abbildung 27: Konfiguration von und Darstellungsteuerung in einer VRML Umgebung [JeHrGo02, S. 503–508]	50
Abbildung 28: Ansatz zur Aufteilung in CAD-Modellierung, 3D Aufbereitung und Nutzung [Er12]	51
Abbildung 29: Teamcenter4DeltaGen-Ansatz [Spe12]	53
Abbildung 30: vPLM-Ansatz	54
Abbildung 31: Datenaustausch zwischen CAx-Software zu Visualisierungsanwendungen mittels PLM-/SysLM-Backbone	61
Abbildung 32: Gesamtkonzept des Rahmenwerks basierend auf [EbSpEi16]	63
Abbildung 33: Einordnung des Rahmenwerks in einen RFLP-basierten Systemkontext [EbEi17]	64
Abbildung 34: Datenaustausch zwischen Kollaborationsbeteiligten im Zusammenhang mit realitätsnahen Produktvisualisierungen	65
Abbildung 35: Verteilte System-Artefakte eines heterogenen Systemlebenszyklusnetzwerks in Anlehnung an [EiSt09], [PoLi11], [See17]	68
Abbildung 36: Verknüpfung von 3D Objektelementen mit Visualisierungsinformationen, vgl. [EbEi17]	71
Abbildung 37: Schematische Darstellung der netzwerkbasierter Verknüpfung versionierbarer VisIDs	71
Abbildung 38: Verknüpfung von Visualisierungsverhalten und –Trigger mit Objekten (oben) und beispielhafte Verwendung anhand einer Kinematik (unten)	73
Abbildung 39: Gegenüberstellung der fünf Kernbereiche für die Aufbereitung von visualisierungsrelevanten Datenumfänge	75

Abbildung 40: Verknüpfung von Objektklassen zur Zuordnung und Verwaltung von zugrundeliegenden Visualisierungsparametern am Beispiel von Visualisierungsmaterialien	77
Abbildung 41: Gegenüberstellung der Varianz von Geometrie und Materialität	78
Abbildung 42: Instanziiertes Visualisierungsobjekt unter den Bedingungen Geometrie und Materialität	78
Abbildung 43: Die Visualisierungsstruktur als generische Zusammenstellung von Visualisierungsszenarios aus der Kombination von System-Artefakten verschiedener Domänen.....	80
Abbildung 44: Zuordnung zwischen logisch, generischer System- und instanziiertes Visualisierungsstruktur unter Konfigurationsgesichtspunkten.....	81
Abbildung 45: Zugriff auf aktuelle, verteilte Informationen über RESTful Micro-Services.....	82
Abbildung 46: Schematischer Ablauf zur kontinuierlichen Bereitstellung aktueller Datenstände	82
Abbildung 47: Abfrage-Prozess einer aktuell gültigen Dokumentenversion analog zur Abfrage einer Web-Seite, vgl. [IET17], [FiRe14a], [FiRe14c]	83
Abbildung 48: Abfrage-Prozess zur Prüfung und zum Aktualisieren von Dokumenten mit gleichem Stand auf Seiten des Datennutzers und -erzeuger (oben) und unterschiedlichen Ständen auf beiden Seiten (unten).....	84
Abbildung 49: Mehrfache Authentifizierung als etablierte Herangehensweise für den Zugriff auf verteilte Informationen innerhalb eines Systemstehungsnetzwerks.....	85
Abbildung 50: Autorisierung mittels OAuth Ansatz für den Zugriff auf verteilte Informationen innerhalb eines Systemstehungsnetzwerks	86
Abbildung 51: XML Darstellung einer Variantenmenge mittels RDF Vokabularen (rot).....	88
Abbildung 52: JSON Darstellung (kein JSON-LD) einer Variantenmenge mittels RDF Vokabularen (rot).....	88
Abbildung 53: Verwaltungsarchitektur für eine heterogene Systemlandschaft zur Bereitstellung von Visualisierungsinformationen	89
Abbildung 54: Abfragen und Verknüpfen von Informationen mittels Verwaltungsanwendung .	90
Abbildung 55: Exemplarische RDF XML Serialisierung bzw. Deserialisierung im idealen und realen Fall für die Betrachtung von zwei Datenverwaltungssystemen.....	91
Abbildung 56: Grundlegender Datenaustausch basierend auf den zwei Austauschstrategien zwischen System zu System und mittels Neutral-Formaten nach [EiKoMu17], [SN11, S. 399], [Hof16].....	94
Abbildung 57: Zusammenführung von Informationen zur Nutzung in einer Anwendungssoftware	95
Abbildung 58: Grundlegender Ablauf zum Austausch von visualisierungsrelevanten Daten ...	96

Abbildung 59: Implementierung des Konzeptrahmens mittels zweistufiger Umsetzung	99
Abbildung 60: Unternehmensinterne Architekturbasis für eine Strukturierung im CAD-Umfeld	103
Abbildung 61: NX Add-on zur Zuordnung von VisIDs zu Geometrie-Elementen	104
Abbildung 62: Anfrage zum Erstellen einer neuen VisID innerhalb der CAD-Anwendung	105
Abbildung 63: Zuweisen einer VisID in der CAD-Anwendung	105
Abbildung 64: Attribute-Tag zur Sicherung einer VisID innerhalb einer XML-basierten X3D Datei	106
Abbildung 65: Zuweisen von Visualisierungsinformationen mittels VisIDs zu JT Daten innerhalb eines Lieferantenprozesses	107
Abbildung 66: Verknüpfung von VisIDs im offenen und standardisierten 3D Austauschformat am Beispiel von JT Daten mittels Daimler JT Supplier Package® Software	107
Abbildung 67: Einstellung und Anwendung einer Visualisierungsmaterial-Konfiguration im PDM-System	108
Abbildung 68: Verknüpfung einer generischen Produktstruktur und einer spezifischen Visualisierungsstruktur mittels Objekt-IDs innerhalb des Daimler PDM-/PLM-Systems Smaragd®	109
Abbildung 69: Grundlegender Zusammenhang von betrachteten Service Providern für eine prototypische Implementierung des Konzeptrahmens	110
Abbildung 70: Service-Struktur für die umgesetzte verteilte Informationsverwaltung	111
Abbildung 71: Funktion zum Abfragen von Transformationsdaten zu einem spezifischen Bauteil mittels RESTful HTTP GET und Antwort als RDF-basierte XML	113
Abbildung 72: Beispiel für das Anlegen von RDF-basierten Objekten auf Basis von Daten aus einer relationalen Datenbank und Zugriff mittels RESTful Service	115
Abbildung 73: Thin-Client-Anwendung mittels Web-Oberfläche zur Interaktion mit der Visualisierungsmaterial-Datenbank	116
Abbildung 74: Beispiel einer Materialbeschreibung im JSON Format	118
Abbildung 75: Zuordnung von Relationen und Options-Codes zwischen VisID (Variantenbündel) und konkreten Visualisierungsmaterialien auf Basis der OSLC Resource Shape	120
Abbildung 76: Ausschnitt einer RDF/XML Darstellung eines Szenengraph auf Basis von RDF-Vokabularen des ARVIDA Projekts und der OSLC Spezifikation	120
Abbildung 77: OSLC Resource Shape für die Eigenschaft sg:partOfNode eines Szenenknotens	121
Abbildung 78: RDF/XML Darstellung eines Teile-Knotens auf Basis von RDF-Vokabularen des ARVIDA Projekts und der OSLC Spezifikation	121

Abbildung 79: RDF/XML Darstellung von Knoten für Variantenbündel, Variante und Options-Codes auf Basis von RDF-Vokabularen des ARVIDA Projekts und der OSLC Spezifikation	121
Abbildung 80: Austauschformat zum Visualisierungsdatenaustausch am Beispiel einer schematischen JSON Formatierung	123
Abbildung 81: Ausschnitt einer RDF/XML Darstellung eines Szenengraph für eine Mehrkörpersimulation auf Basis von RDF-Vokabularen des ARVIDA Projekts und der OSLC Spezifikation.....	124
Abbildung 82: Ausschnitt einer RDF/XML Darstellung eines Transformationsgruppenknotens und dazugehöriger Translation für eine Mehrkörpersimulation auf Basis von RDF-Vokabularen des ARVIDA Projekts und der OSLC Spezifikation.....	125
Abbildung 83: Deserialisierung RDF-Daten in Python-Objekte für die Software VRED Autodesk	125
Abbildung 84: Initialisierung von Namespaces mit Python RDFLIB	126
Abbildung 85: Simple TransformationGroupNode Klasse in Python	126
Abbildung 86: Entwicklungs- und Nutzungsschritte für das kundensichtbare Oberflächenmaterialkonzept eines Fahrzeugs am Beispiel der Daimler AG vor der Prozessanpassung, in Anlehnung an [Bra07]	132
Abbildung 87: Entwicklungs- und Nutzungsschritte für das kundensichtbare Oberflächenmaterialkonzept eines Fahrzeugs am Beispiel der Daimler AG nach der Prozessoptimierung	133
Abbildung 88: Visualisierung des Fahrzeug-Außenlacks Cavansitblau in Siemens Teamcenter Visualization Mock-Up 11.2 (oben links), ESI IC.IDO 10.2 (oben rechts), 3DEXCITE DELTAGEN 2017 (unten links), Autodesk VRED 2017 (unten rechts)	134
Abbildung 89: CAD-Modell eines Kurbelgehäuses eines <i>Reihensechszylindermotors (M256) konstruiert im CAD-System NX (links) und CAD-Modell eines Kurbelgehäuses eines Reihenvierzylindermotors (OM651) konstruiert im CAD-System CATIA V5</i>	137
Abbildung 90: Rückverfolgung von Änderung mittels GUID und EntityID im JT Format bei Hinzufügen (oben) und Löschen von Elementen (unten) nach [Sie16].....	141
Abbildung 91: Übertragung einer Konstruktionsänderung basierend auf JT von einer Ausgangsgeometrie mit zwei VisIDs (links; rot umrandet VisID 1, restliche Flächen VisID 2), der geänderten Geometrieversion (Mitte) und der automatisierten Zuordnung (rechts) – (transparente Flächen = eineindeutig	

	Zuordnung; rote Flächen = Zuordnung neuer Flächen möglich; blaue Flächen = keine eindeutige Zuordnung möglich).....	142
Abbildung 92:	Vergleich einer bereits mit VisIDs aufbereiteten Geometrie (links) mit einem neuen Geometrie-Versionsstand (rechts); (transparente Flächen = eindeutig Zuordnung; rote Flächen = Zuordnung neuer Flächen möglich; blaue Flächen = keine eindeutige Zuordnung möglich)	142
Abbildung 93:	Außenansicht einer Fahrzeugtür in CAD-Darstellung (links), in realitätsnaher Darstellung für eine Materialkonfiguration einer Ecktyp-Fahrzeug-Variante (Mitte) und in realitätsnaher Darstellung für eine Materialkonfiguration einer vollausgestatteten Fahrzeug-Variante (rechts).....	143
Abbildung 94:	Innenansicht einer Fahrzeugtür in CAD-Darstellung (links), in realitätsnaher Darstellung für eine Materialkonfiguration einer Ecktyp-Fahrzeug-Variante (Mitte) und in realitätsnaher Darstellung für eine Materialkonfiguration einer vollausgestatteten Fahrzeug-Variante (rechts).....	144
Abbildung 95:	Zwei geometrisch identische Fahrzeugtürgriffe mit Visualisierungsmaterialien einer normalen und einer „KEYLESS-GO“ Fahrzeugkonfiguration.....	145
Abbildung 96:	Zusammenhang zwischen Szene, Variantenbündel, Varianten und Regel.....	151
Abbildung 97:	Zusammenhang zwischen Szeneknoten, Teilen und Transformationen.....	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von relationalen und Nicht-relationalen DBMS nach [Pie11], [Edl11].....	18
Tabelle 2: Erfüllungsgrad der gestellten Anforderungen	59
Tabelle 3: Bewertung offener und standardisierter Formate in Hinblick auf Anreicherungsmethoden unter Berücksichtigung von Datenaustauschkriterien [EbEi17]	102
Tabelle 4: Service Provider für PDM/PLM und dazugehörige Basis an RESTful Services für die Verwaltung und Nutzung von PDM-bezogenen Artefakten	112
Tabelle 5: Service Provider für das Visualisierungsdaten-Management und dazugehörige Basis an RESTful Services für die Verwaltung und Nutzung von visualisierungsbezogenen Artefakten	114
Tabelle 7: Übersicht genutzter Parameter eines Materialbeschreibungsdokumentes	117
Tabelle 8: Abgleich des entwickelten Konzepts und der implementierten Bestandteile mit den gestellten Anforderungen und in Gegenüberstellung zu anderen ganzheitlichen Ansätzen	127
Tabelle 9: Gegenüberstellung von verschiedenen, fiktiven Unternehmensszenarios mit den gestellten Anforderungen an ein ganzheitliches Konzept.....	130
Tabelle 10: Vergleich von CAD-Daten im Zusammenhang mit der Datenaufbereitung mit VisIDs	138
Tabelle 11: Verhältnis von VisIDs zu Visualisierungsmaterialien einer Fahrzeugtür	144
Tabelle 12: Export-Möglichkeiten von 3D Modellierungswerkzeugen	149
Tabelle 13: Import-Möglichkeiten von VR-/ AR- und anderen Visualisierungswerkzeugen ..	149
Tabelle 14: Übersicht zu Schwellenwerten zur Bestimmung des Status eines Unternehmens [EU-13].....	159