

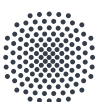
Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Felix Kretschmer

Architektur für einen Verzeichnisdienst in der serviceorientierten Produktionstechnik



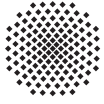
stuttgarter
maschinenbau
interdisziplinär und vielfältig



Universität Stuttgart

Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW)





Universität Stuttgart



Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Band 1

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Wortmann

Felix Kretschmer

**Architektur für einen Verzeichnisdienst in
der serviceorientierten Produktionstechnik**

Fraunhofer Verlag

Kontaktadresse:

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen ISW
Seidenstr. 36
70174 Stuttgart
info@isw.uni-stuttgart.de
<https://www.isw.uni-stuttgart.de>

Titelbild: Felix Kretschmer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISSN: 2750-655X

ISBN: 978-3-8396-1789-2

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Druck und Weiterverarbeitung:
Fraunhofer Verlag, Mediendienstleistungen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Geleitwort

Die deutsche Wirtschaft ist weltweit bekannt für ihren Anlagen- und Maschinenbau. Dabei ist die Universität Stuttgart mit ihren beiden Maschinenbau fakultäten – unter deren Dach sich 42 Institute befinden – die größte universitäre Einrichtung für den Maschinenbau in Deutschland. Unsere wissenschaftliche Exzellenz stützt sich dabei auf unsere zahlreichen Promovierenden und ihre hervorragenden Dissertationen. Viele dieser Dissertationen entstehen in lokaler, nationaler und internationaler Zusammenarbeit mit renommierten Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft. Dabei reicht das inhaltliche Spektrum der Dissertationen von Biotechnik, Energietechnik, Fahrzeugtechnik, Kybernetik und Systemtechnik, Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Produktionstechnik bis hin zur Verfahrenstechnik und stützt sich auf die sechs Forschungsschwerpunkte Advanced Systems Engineering, Autonome Produktion, Software-Defined Manufacturing, Resiliente Versorgung, Biointelligenz und Dekarbonisierung der Industrie. Die Ergebnisse aus den Dissertationen zielen darauf ab, kunden-, produkt-, prozess- und mitarbeiterorientierte Technologie zielgerichtet und zeitnah zu entwickeln und anzuwenden.

Viele der im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in diesen »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau« veröffentlicht. Die beiden Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus wünschen den Promovierenden, dass ihre Dissertationen aus dem Bereich des Maschinenbaus in der breiten Fachwelt als maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.

Für den Stuttgarter Maschinenbau



Stefan Weihe
Prodekan Fakultät 4



Oliver Riedel
Prodekan Fakultät 7

Vorwort der Herausgeber

Innerhalb der Reihe »Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau« berichtet das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen an der Universität Stuttgart (ISW) über seine Forschungsergebnisse. Das Institut beschäftigt sich in vielfältiger Form mit Steuerungs- und Automatisierungstechnik sowie dem Einsatz von modernen Methoden des Informationsmanagements. Dabei stehen Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Entwicklung in einem stetigen Austausch, wodurch ein kontinuierlicher Technologietransfer in die Praxis sichergestellt wird.

Die am ISW entstandenen Dissertationen werden damit unter erweitertem Namen und inzwischen in vierter Generation in der bewährten Konzeption, die der Gründer des ISW Prof. Stute und sein Nachfolger Prof. Pritschow 1972 begonnen haben, durch die heutige Institutsleitung fortgesetzt.

Herrn Dipl.-Ing. Felix Kretschmer möchten wir für die geleistete Arbeit danken, dem Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in sein Angebot und der Druckerei für die saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.



Alexander Verl



Oliver Riedel

**Architektur für einen Verzeichnisdienst in der serviceorientierten
Produktionstechnik**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung**

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Felix Kretschmer

aus Nürnberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2021

**Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart**

2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Ich bedanke mich herzlichst bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl für die persönliche sowie wissenschaftliche Betreuung und die Möglichkeit dieses Thema erforschen zu dürfen. Darüber hinaus bedanke ich mich für die sehr angenehme und offene Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger danke ich sehr für die Bereitschaft, den Mitbericht dieser Arbeit zu übernehmen und die wissenschaftliche Unterstützung sowie hervorragende und kollegiale Zusammenarbeit im zugrundeliegenden Forschungsvorhaben pICASSO.

Außerdem gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für die offene und insbesondere motivierende Zusammenarbeit über all die Jahre, die diese Zeit in konstruktiver und freundschaftlicher Atmosphäre geprägt haben und maßgeblich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Persönlich bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Armin Lechler und Dr.-Ing. Matthias Keinert für die fachliche und konstruktive Unterstützung bei der Arbeit.

Des Weiteren geht mein Dank an die Kollegen der Forschungsprojekte pICASSO und ForschFab (ARENA2036), in deren Rahmen diese Arbeit entstanden ist. Insbesondere möchte ich mich bei der Robert Bosch GmbH und namentlich bei Marian Vorderer für die Unterstützung und Bereitstellung eines realen Anwendungsfalls zur Demonstration bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Marion für die entgegengebrachte Geduld und die moralische Unterstützung während der Arbeit am Institut und bei der Erstellung dieser Ausarbeitung.

Felix Kretschmer

Kurzfassung

Nicht nur der Einzug von Hyperscalern wie Amazon, Google und Microsoft in das Produktionsumfeld, sondern auch Trends wie Industrie 4.0 zeigen die wachsende Bedeutung von IT-Technologien auf dem Shopfloor. Die Notwendigkeit flexibler Systeme zur Verwaltung von Betriebsmitteln und Produktionsressourcen wächst bei zeitgleichem Wachstum von Vernetzung und steigender Anzahl an Geräten durch den Einzug von Industrial IoT.

Die Historie und Modelle der Kommunikationstechnik zeigen die Entwicklung von IT und OT sowie die unterschiedlichen zugrundeliegenden Paradigmen. Durch den Einfluss von Industrie 4.0 entstehen Referenzarchitekturmodelle und Konzepte von Software Defined Manufacturing, die einen Ur-Bedarf nach standardisierten Kommunikationsprotokollen und Semantiken für den Datenaustausch besitzen um flexibel Betriebsmittel verwalten und nutzen zu können.

Diese Arbeit hat daher das Ziel eine Architektur zu entwerfen, welche diesem Ur-Bedarf in einer serviceorientierten Produktionstechnik gerecht wird und einen Verzeichnisdienst bereitstellt, der unter Adaption der serviceorientierten Architektur den Schulterschluss von IT und OT ermöglicht.

Hierfür werden zunächst verfügbare Technologien und Lösungen verglichen. Durch die weite Verbreitung von Verzeichnisdiensten in der IT existieren bereits zahlreiche Lösungen, welche sich mit sehr unterschiedlichem Erfolg durchgesetzt haben. In der OT hingegen existieren bisher keine vergleichbaren Lösungen, dennoch stehen standardisierte Technologien zur Verfügung, welche die Funktionalität eines Verzeichnisdienstes erfüllen können.

Auf Basis von OPC UA wird ein Verzeichnisdienst entworfen, welcher Fähigkeiten und Schnittstellen von cyber-physischen Systemen im Produktionsumfeld bereitstellt. Dies erfolgt über die Abbildung der Daten in Informationsmodellen, welche auf LDAP-Verzeichnisse in der Office-IT synchronisiert werden können.

Der Verzeichnisdienst wird an einer modularen Anlage für die wandlungsfähige Montage-technik demonstriert.

Abstract

Not only the entry of hyperscalers like Amazon, Google or Microsoft into the production environment, but also trends like Industry 4.0 show the growing importance of IT technologies on the shop floor. The need of flexible systems for the management of manufacturing equipment and production resources grows with the simultaneous growth of networking and the increasing number of devices by the entry of Industrial IoT.

The history and models of communication technology show the development of IT and OT and therefore the underlying paradigms. Reference architectures and concepts of software-defined manufacturing develop through the influence of Industry 4.0, which have the motivation of standardized communication protocols and semantics for the data exchange to manage and use manufacturing equipment flexible.

This work has the goal to design an architecture, which fulfills the motivation within a service-oriented production technology and provides a directory service that links IT with OT by adapting the paradigm of service-oriented architectures.

Therefore, available technologies and solutions will be compared at first. As a result of the wide spread of directory services within IT, there are numerous solutions existing, which have enforced with various success. Whereas in OT there are no comparable solutions existing. Nevertheless, a number of standardized technologies is available that might fulfill the functionality of a directory service.

A directory service based on OPC UA was designed, which provides skills and interfaces of cyber-physical systems within the production environment in the form of information models and synchronizes its information into LDAP directories of the office IT.

The directory service is demonstrated at a modular system for versatile assembly technology.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Kurzfassung.....	5
Abstract	7
Inhaltsverzeichnis.....	9
Abkürzungen	13
Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis.....	17
1 Einleitung.....	19
2 Begriffsdefinitionen und Anforderungen.....	21
2.1 Begriffe aus der Informations- und Softwaretechnik	21
2.2 Begriffe aus der Produktionstechnik	22
3 Stand der Technik und Wissenschaft.....	23
3.1 Grundlagen der Kommunikation in Informations- und Produktionstechnik..	23
3.1.1 Historie und Zusammenhang von IT, Software- und Produktionstechnik ..	23
3.1.2 OSI Referenzmodell.....	24
3.1.3 Netzwerk-Topologien	26
3.1.4 Industrielle Kommunikation (OT Kommunikation).....	28
3.1.5 IT Kommunikation.....	33
3.2 Serviceorientierte Architektur	34
3.2.1 Grundlagen von SOA.....	34
3.2.2 Entwurfsprinzipien von SOA.....	36
3.2.3 Aufbau von SOA und das SOA-Dreieck	38
3.2.4 Serviceverzeichnis	39
3.2.5 Einsatzgebiete von SOA	39
3.3 Einfluss durch Industrie 4.0 auf die Kommunikationstechnik	40
3.3.1 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	40
3.3.2 Software Defined Manufacturing	42
3.3.3 Paradigmenwechsel in der Kommunikation	44
3.3.4 OPC UA als Kommunikationsstandard	46
3.4 Zusammenfassung und Defizite aus Stand der Technik und Wissenschaft ...	51
3.5 Zielsetzung dieser Arbeit.....	53

4	Vergleich von Technologien und Lösungen für Verzeichnisdienste.....	57
4.1	Lösungen für Verzeichnisdienste	58
4.1.1	Office-IT	58
4.1.2	Produktions-IT	62
4.2	Nutzbare Technologien für Verzeichnisdienste	66
4.2.1	Office-IT	66
4.2.2	Produktions-IT	73
4.2.3	Remote Procedure Calls – COM & DCOM	74
4.3	Vergleichsmerkmale.....	75
4.3.1	Verbreitung	75
4.3.2	Aktualität	75
4.3.3	Entwicklungsreife (Reife).....	76
4.3.4	Quellcodeverfügbarkeit (Quellcode)	77
4.3.5	Unterstützte Betriebssysteme (Kompatibilität).....	77
4.3.6	Sicherheit	78
4.3.7	Kosten	79
4.3.8	Standardisierung	79
4.3.9	Einsatzzweck	79
4.4	Bewertung von Lösungen.....	80
4.4.1	Active Directory	80
4.4.2	OpenLDAP	81
4.4.3	OPC UA LDS-ME	83
4.4.4	OPC UA .NET-GDS.....	85
4.5	Bewertung von Implementierungen nutzbarer Technologien	86
4.5.1	Bonjour	86
4.5.2	LDAP.....	88
4.5.3	jabberd2	88
4.5.4	OPC UA – open62541	89
4.5.5	Unified Automation C++ based OPC UA SDK	90
4.5.6	COM/DCOM	92
4.6	Zusammenfassung und Entwurfsentscheidung	93
5	Architektur eines Verzeichnisdienstes für serviceorientierte Produktionstechnik .	95
5.1	Systemarchitektur	95
5.1.1	Systemübersicht	95
5.1.2	Übersicht der Komponenten und Kommunikation	98

5.2	Systementwurf	100
5.2.1	Informationsmodell	101
5.2.2	Abbildung von CPS Fähigkeiten	103
5.2.3	Verzeichnisdienst Server Logik	105
5.2.4	Verzeichnisdienst Client Logik	106
5.2.5	LDAP-Connector	108
5.3	Integration bestehender Companion Specifications	108
5.4	Zusammenfassung	110
6	Integration in vorherrschende IT Strukturen	111
6.1	Übersicht von OPC UA Knoten und Zusammenhang mit Namensräumen ..	111
6.2	Ansätze zur Abbildung von OPC UA-Servern in LDAP	113
6.2.1	Knoten als Liste unterhalb deren Namensräume	113
6.2.2	Knoten als Baum unterhalb deren Namensräume	114
6.2.3	Knoten als Baum außerhalb deren Namensräume	115
6.3	Vergleich der Ansätze	115
6.4	Mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten	117
6.5	LDAP-Schema für OPC UA	118
6.5.1	Abbildung der OPC UA-Informationen	118
6.5.2	Erweiterung für mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten	121
6.6	Zusammenfassung	122
7	Anwendung und Realisierung	123
7.1	Vorstellung des Anwendungsfalls: Wandlungsfähige Montagetechnik – CESA ³ R	124
7.2	Abbilden von Fähigkeiten in Informationsmodellen und Kommunikationsarchitektur	125
7.3	Integration in CESA ³ R Architektur	128
7.4	Einsatz des Verzeichnisdienstes in der wandlungsfähige Montagetechnik ..	129
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
9	Anhang	135
9.1	CVE-Bewertungen und Mittelwertberechnung	135
9.2	Entworfenes LDAP-Schema für OPC UA	136
10	Literaturverzeichnis	141

Abkürzungen

AD	Active Directory
API	Application Programming Interface (dt. Programmierschnittstelle)
CESA ³ R	Concept for Engineering free, Scalable, Advanced Automated Assembly systems for Rapid ramp up
CNC	Computerized Numerical Control (dt. rechnergestützte numerische Steuerung)
CPPS	Cyber-Physical Production System (dt. cyber-physisches Produktionssystem)
CPS	Cyber-Physical System (dt. Cyber-physisches System)
DN	Distinguished Name (dt. eindeutiger Name)
GDS	Global Discovery Server
HMI	Human Machine Interface (dt. Mensch-Maschine-Schnittstelle)
I/O	Input/Output (dt. Eingabe/Ausgabe)
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
IETF	Internet Engineering Task Force
IIoT	Industrial Internet of Things (dt. Industrielles Internet der Dinge)
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnik
LDAP	Lightweight Directory Access Protocol
LDIF	LDAP Data Interchange Format
LDS	Local Discovery Server
M2M	Machine-to-Machine (dt. Maschine zu Maschine)
MO	Mechatronisches Objekt
OID	Object Identifier

OPC	Open Platform Communications
OPC UA	OPC Unified Architecture
OT	Operational Technology (dt. Operative Technologien)
OU	Organizational Unit (dt. Organisationseinheit)
RPC	Remote Procedure Call (dt. Aufruf einer fernen Prozedur)
SOA	Serviceorientierte Architektur
SOAP	Simple Object Access Protocol (dt. Protokoll für einfachen Objektzugriff)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
UDDI	Universal Description, Discovery and Integration (dt. universelle Beschreibung, Entdeckung und Integration)
UML	Unified Modeling Language (dt. Vereinheitlichte Modellierungssprache)
VZD	Verzeichnisdienst
WSDL	Web Services Description Language (dt. Webservice Beschreibungssprache)
XML	Extensible Markup Language (dt. Erweiterbare Auszeichnungssprache)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Historische Entwicklung der Informations- und Steuerungstechnik	24
Abbildung 3.2: Aufbau des OSI-7-Schichten-Modells nach ISO/IEC 7498-1	25
Abbildung 3.3: Übersicht klassischer Netzwerk-Topologien	27
Abbildung 3.4: Automatisierungspyramide nach (Siepmann 2016).....	30
Abbildung 3.5: Kommunikation nach Wollschlaeger (Wollschlaeger et al. 2018)	31
Abbildung 3.6: Marktanteil industrieller Netzwerke (Herkommer 2017)	32
Abbildung 3.7: 3-Ebenen-Modell nach (Institut Interne Revision Österreich 2016).....	33
Abbildung 3.8: Übersicht zweier wichtiger Entwurfsprinzipien von SOA	37
Abbildung 3.9: Das Dreieck der serviceorientierten Architektur	38
Abbildung 3.10: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (DIN SPEC 91345).....	42
Abbildung 3.11: Architekturüberblick im SDM Konzept (Lechler et al. 2018).....	44
Abbildung 3.12: Wandel von hierarchischer Struktur zu Informationsmodellen	45
Abbildung 3.13: OPC UA Architektur im Schichtenmodell	48
Abbildung 3.14: Hierarchielose Kommunikationsarchitektur zwischen IT und OT	54
Abbildung 3.15: Fokus auf notwendige Schnittstellen eines Verzeichnisdienstes	55
Abbildung 4.1: Übersicht von Technologien und Lösungen für Verzeichnisdienste	58
Abbildung 4.2: Beispielhafte Unternehmensstruktur im Active Directory	60
Abbildung 4.3: Multi-Master Replikation eines LDAP-Verzeichnisses	61
Abbildung 4.4: Funktionsweise der OPC UA LDS-ME.....	64
Abbildung 4.5: Funktionsweise des OPC UA Global Discovery Servers	66
Abbildung 4.6: Aufbau eines LDAP-Verzeichnisses am Beispiel der Uni Stuttgart.....	69
Abbildung 4.7: Schema eines UDDI-Marktplatzkonzeptes.....	71
Abbildung 4.8: Übersicht der Bewertungen von Lösungen und Technologien.....	93
Abbildung 5.1: Systemübersicht der Gesamtarchitektur für einen Verzeichnisdienst ...	96
Abbildung 5.2: Sequenzdiagramm der Abläufe des Verzeichnisdienstes	97
Abbildung 5.3: Architekturdiagramm von Komponenten und Kommunikation.....	99
Abbildung 5.4: Legende der OPC UA-Notation zur Informationsmodellierung.....	100
Abbildung 5.5: OPC UA-Informationsmodell des Verzeichnisdienstes (Teil 1)	102
Abbildung 5.6: OPC UA-Informationsmodell des Verzeichnisdienstes (Teil 2)	103
Abbildung 5.7: Identifikation von Funktions- und Schnittstellenpaketen	104

Abbildung 5.8: Beispielhaftes Modell eines Funktions- und Schnittstellenpakets.....	104
Abbildung 5.9: Klassendiagramm der Klasse VZDType	105
Abbildung 5.10: Ablaufdiagramm der Client Logik für den Verzeichnisdienst.....	107
Abbildung 5.11: Beispiel der Integration einer Companion Specification.....	109
Abbildung 6.1: Nutzung verschiedener Namensräume in einem OPC UA-Server	112
Abbildung 6.2: Abbildung der Knoten als Liste im Namensraum	113
Abbildung 6.3: Abbildung der Knoten als Baum im Namensraum.....	114
Abbildung 6.4: Abbildung der Knoten als Baum außerhalb des Namensraums	115
Abbildung 6.5: Abbildung von Mehrfach-Referenzen eines Kindknoten in LDAP.....	117
Abbildung 6.6: Vererbungshierarchie des LDAP-Schema für OPC UA.....	119
Abbildung 6.7: LDAP-Schema der Objektklasse BaseNode.....	121
Abbildung 6.8: LDAP-Schema des Attributs NodeId	121
Abbildung 6.9: LDAP-Schema für die Objektklasse externer Knoten.....	121
Abbildung 7.1: SOA-Dreieck für die serviceorientierte Produktionstechnik	123
Abbildung 7.2: CESA ³ R Demonstrator mit mechatronischen Objekten	124
Abbildung 7.3: Kategorisierung des Informationsmodells mechatronischer Objekte ..	126
Abbildung 7.4: Kommunikation für MOs und Module der Master-Einheit	127
Abbildung 7.5: Schnittstellenidentifikation innerhalb der CESA ³ R Architektur	128
Abbildung 7.6: Informationsaustausch innerhalb der CESA ³ R Architektur	129
Abbildung 7.7: Sequenzdiagramm der Positionierung von CESA ³ R über VZD.....	130
Abbildung 7.8: LDAP-seitige Integration des VZD und Nutzen für IT	131
Abbildung 9.1: Schema zur Abbildung von OPC UA Servern in LDAP.....	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Vergleich von Standards nach Klein et al. (Klein et al. 2016).....	47
Tabelle 4.1: Bewertung für Active Directory	81
Tabelle 4.2: Bewertung für OpenLDAP	83
Tabelle 4.3: Bewertung für OPC UA LDS-ME.....	84
Tabelle 4.4: Bewertung für OPC UA .NET-GDS.....	86
Tabelle 4.5: Bewertung für Bonjour	87
Tabelle 4.6: Bewertung von jabberd2	89
Tabelle 4.7: Bewertung von open62541	90
Tabelle 4.8: Bewertung von Unified Automation C++ based OPC UA-SDK.....	92
Tabelle 4.9: Bewertung von COM/DCOM.....	93
Tabelle 6.1: Vergleich der Ansätze zur Abbildung von OPC UA in LDAP.....	116
Tabelle 6.2: Übersicht von OPC UA-NodeClasses.....	118
Tabelle 6.3: Übersicht der OPC UA-Attribute und deren Knotentypzugehörigkeit.....	120
Tabelle 9.1: CVE-Bewertung für Microsoft Active Directory	136
Tabelle 9.2: CVE-Bewertung für Bonjour	136
Tabelle 9.3: CVE-Bewertung für jabberd2	136
Tabelle 9.4: CVE-Bewertung für COM/DCOM.....	136

1 Einleitung

In Zeiten in denen sog. Hyperscaler wie Amazon, Google und Microsoft Einzug auf Fachmessen der Automatisierungstechnik (bspw. SPS in Nürnberg) erhalten haben, zeigt sich, dass operative Technologien (OT) heute nicht mehr ohne Informationstechnik (IT) auskommen. Neben dem Zugang zu einem unendlichen Ressourcenvorkommen (in der Wahrnehmung), ist die Methodik zur Datenauswertung und -verarbeitung in der IT bereits deutlich ausgereifter und findet in einem breiten Feld Anwendung.

Auch in der Automatisierungstechnik lassen sich Vorteile durch diese Technologie erkennen und führen zu einem Schulterschluss zwischen Unternehmen wie Microsoft und Amazon mit traditionellen Unternehmen der Automatisierungstechnik wie Beckhoff oder Siemens. Eine große Hoffnung liegt in der Steigerung der Flexibilität bei sinkenden Kosten zur Erfüllung einer individualisierten Produktion, die eine Fertigung bis zu Losgröße 1 erfordert (Schlechtendahl 2016; Schuh et al. 2017).

Das Ergebnis werden immer wandlungsfähigere Fabriken, die Auflösung von starren Takten und Linien in Zell- oder Matrixproduktionen und die Rekonfiguration solcher Anlagen innerhalb von Tagen oder gar Stunden (Koren 2010; Bauernhansl 2014). Diese schnellen Rekonfigurationszyklen und hohe Flexibilität in der Fertigung führen gleichzeitig zu einer steigenden Anzahl an vernetzten Komponenten (häufig mit Industrial Internet of Things (IIoT) verglichen). In der Literatur werden gerne Parallelen zum Mooreschen Gesetz gezogen und auf die Entwicklungen im IIoT angewendet. Das Mooresche Gesetz beschreibt die regelmäßige Verdopplung der Komplexität integrierter Schaltkreise mit minimalen Komponentenkosten in einem Zeitraum zwischen 12 und 24 Monaten. Ein ähnliches Verhalten wird für die Entwicklungen im IoT prognostiziert (Halladay 2018). Der Umsetzung liegt eine Auslagerung der Rechenleistung in immer kleiner werdende Module und eine Architektur aus dezentralen Systemen zugrunde (Xu 2012).

Auch die Bedeutung im Kontext von Industrial IT wächst. Unter Gewährleistung der Anforderungen wie Verfügbarkeit, Sicherheit und Echtzeitfähigkeit der Prozesssteuerung, haben sich in den vergangenen Jahren zahlreiche Forschungsprojekte mit der Integration von IT oder der Nutzung dieser Technologien in der Automatisierungstechnik befasst und

neue Produktionsparadigmen oder die Nutzung von Cloud Ressourcen ermöglicht. Insbesondere die öffentlichen Projekte „Industrielle cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit cyber-physischen Systemen“ (pICASSO) und „ARENA2036 – Forschungsfabrik“ gefördert durch das BMBF haben dabei als Grundlage für diese Arbeit gedient.

Aus den o.g. Projekten zeichnen sich das Defizit der Orchestrierung und der Informationsaustausch zwischen neuen Komponenten mittels IIoT-Lösungen ab. Im Vordergrund stand die Modularisierung von Prozessen bzw. die Auslagerung von Steuerungslogik auf Cloud Plattformen. Hierbei wurde die notwendige und flexible Zuordnung der Komponenten untereinander vernachlässigt (Kretschmer et al. 2015).

Die verfolgten Trends lösen starre Konfigurationen und starre Verbindungen zwischen Betriebsmitteln auf. Die einst vorhandene Übersicht zur Verschaltung aller Ressourcen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme ist nach dem ersten Rekonfigurationszyklus nicht mehr vorhanden und die Übersicht über Produktionsteilnehmer sowie deren Fähigkeiten wird zunehmend zur Herausforderung (Vorderer et al. 2016a). Eine Herausforderung, welche in der IT bereits durch Verzeichnisdienste gelöst erscheint.

Es stellt sich demnach die Frage, wie bei Verfolgung rekonfigurierbarer, flexibler und sich ändernder Produktionssysteme unter Anwendung neuartiger Entwurfsparadigmen und der losen Kopplung von Betriebsmitteln der Betriebsfluss gewährleistet werden kann. Wie kann hierbei die wachsende Zahl an vernetzten Ressourcen im Produktionsumfeld für OT und IT beherrschbar und bekannt gemacht werden?

Hier gilt es zunächst eine Begriffsdefinition zum einheitlichen Verständnis und zur Differenzierung von Begriffen aus den Bereichen Informations-, Software- und Produktionstechnik anzuführen. Im Anschluss befasst sich Kapitel 3 mit dem Stand der Technik und Wissenschaft und beleuchtet zunächst Grundlagen der Kommunikation aus IT und OT. Im Anschluss wird das Softwaredesign serviceorientierter Architektur beleuchtet und insbesondere auf die relevanten Elemente und Entwurfsparadigmen für diese Arbeit eingegangen. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung aktueller Entwicklungen in der Kommunikationstechnik für die Fertigung insbesondere unter dem Aspekt von Industrie 4.0. Basierend auf diesen Erkenntnissen kann die Zielsetzung und Struktur der Arbeit vorgestellt werden.

2 Begriffsdefinitionen und Anforderungen

Die Realisierung dieser Arbeit ist interdisziplinär über drei Fachbereiche aufgestellt. Die Informationstechnik, die Lösungen wie bspw. Verzeichnisdienste bereits jahrelang im produktiven Einsatz betreibt, um Ressourcen zu verwalten und organisieren. Die Softwaretechnik, welche Konzepte zur Lösung von Problemen mit Hilfe von Software bereitstellt. Zuletzt die Produktionstechnik, welche sich durch hohe Anforderungen bspw. an Langlebigkeit und Robustheit auszeichnet.

Für diese drei Disziplinen gilt es im Folgenden maßgebliche Begriffe dieser Arbeit zu definieren.

2.1 Begriffe aus der Informations- und Softwaretechnik

Die **Informationstechnologie (IT)** dient als Oberbegriff für Techniken der elektronischen Datenverarbeitung. Hierunter fallen bspw. Netzwerk- und Datenbankanwendungen sowie Aufgaben des Software Engineerings, etc. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Office-IT und die Produktions-IT Teilmengen dieses Oberbegriffs.

Die **Softwarearchitektur** beschreibt den Zusammenhang verschiedener Softwaremodule innerhalb eines Softwaresystems. Hierbei stehen nicht der detaillierte Entwurf jedes Moduls im Vordergrund, sondern die Verbindungen der Module sowie die Erfüllung von Anforderungen. Für die Realisierung existiert eine Vielzahl generischer Architekturmodelle zur Orientierung.

Ein **Softwaresystem** besteht aus unterschiedlichen Programmen (Haupt- und Unterprogrammen), welche durch Interaktion miteinander die Lösung eines Problems ergeben.

Softwaremodule sind Komponenten einer Software, welche Klassen bzw. Funktionen zur Lösung bestimmter Probleme zur Verfügung stellen. Eine Software besteht meist aus verschiedenen Softwaremodulen.

Der Begriff **Office-IT** wird in dieser Arbeit für die Teilmenge der IT genutzt, welche sich ausschließlich mit dem Betrieb in Büroumgebungen und den dafür notwendigen Hinter-

grund-Aufgaben beschäftigt. Im Fokus stehen hierbei klassische Workstations (PCs, Laptops, etc.) sowie Büroressourcen (Drucker, Scanner, etc.) und Server (Mail-, Datenbankserver, etc.).

Ein **Verzeichnisdienst** ist ein Dienst, welcher Informationen über (technische) Ressourcen, eine Organisation, deren Einheiten und Personen bereitstellt und deren Verwaltung ermöglicht.

2.2 Begriffe aus der Produktionstechnik

Ein **cyber-physisches System (CPS)** beschreibt die Verbindung aus mechanischen und elektrischen Komponenten ergänzt um einen Softwareanteil, welcher über Datennetze mit anderen Softwaresystemen kommunizieren kann. Im Vordergrund steht hierbei die Erfüllung einer physischen Aufgabe unter Zuhilfenahme datengetriebener Sollwerte.

Operational Technology (OT) ist analog zum Begriff IT zu sehen. Der Begriff wird aus der Automatisierungstechnik geprägt und erweitert die Definition der IT um strenge Anforderungen an Zykluszeiten (Zeitdeterminismus), Robustheit, Zuverlässigkeit, Performance und ggf. funktionale Sicherheit.

Die **Produktions-IT** beschreibt die Teilmenge von IT-Systemen, welche nicht der Office-IT angehören, sondern maßgebliche Produktionsaufgaben übernehmen. Hierzu gehören bspw. MES-Systeme, Datenbankanwendungen oder die Netzwerkinfrastruktur auf innerhalb der Produktionsumgebung.

Produktionsteilnehmer sind definiert als aktive geschlossene Systeme mit klaren Schnittstellen, welche ein Glied in der Wertschöpfungskette darstellen. Diese können aus cyber-physischen Systemen oder reinen Softwaresystemen bestehen.

3 Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik und Wissenschaft, der dieser Arbeit zugrunde liegt, zusammengefasst. Hierbei wird zunächst auf die Grundlagen der Kommunikationstechnik hinsichtlich Informations- und Produktionstechnik eingegangen. Des Weiteren wird das Konzept serviceorientierter Architekturen erläutert und die grundlegenden Elemente vorgestellt. Es werden die aktuellen Entwicklungen der Kommunikationstechnik sowie der Einfluss durch Industrie 4.0 in der Produktionstechnik beleuchtet und die zugrundeliegenden Architekturmodelle vorgestellt. Im letzten Teil werden Möglichkeiten zur Beschreibung von Fähigkeiten und Schnittstellen vorgestellt und das Kapitel mit einer Zusammenfassung der Defizite sowie der Definition der Ziele dieser Arbeit abgeschlossen.

3.1 Grundlagen der Kommunikation in Informations- und Produktionstechnik

Im Folgenden werden die Grundlagen der technischen Kommunikation aus Informations- und Produktionstechnik beleuchtet. Einleitend wird ein kurzer Überblick über die Historie zwischen den beiden Branchen mit Hinblick auf die Softwaretechnik, welche Grundlage jeder technischen Kommunikation ist, gegeben. Nach Einführung des OSI Referenzmodells und Netzwerk-Topologien wird die industrielle Kommunikation bzw. OT Kommunikation aus der Produktionstechnik und abschließend die IT Kommunikation betrachtet.

3.1.1 Historie und Zusammenhang von IT, Software- und Produktionstechnik

Vergleicht man die historische Entwicklung der IT mit der Produktionstechnik erkennt man eine Adaptiondiskrepanz von durchschnittlich zehn Jahren. Entwicklungen der Informationstechnik, die bereits im Einsatz sind, finden bei Maschinen und Anlagen der Produktionstechnik mit deutlicher Verspätung Anwendung. Abbildung 3.1 zeigt ausgewählte Meilensteine der Informationstechnik und korrelierende Ereignisse in der Produktionstechnik (Levi et al. 2003; Pritschow 2006; Schallehn 2008; Paul 2009). Es wird ersichtlich, dass die Adaption von Meilensteinen der Informationstechnik im Schnitt zehn

Jahre benötigt, um einen Meilenstein in der Produktionstechnik darzustellen. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10-15 Jahren bei Anlagen im Produktionsumfeld, führt dies zu einem Stand der IT, der mit 20-25 Jahren lange überholt ist (Kretschmer 2017b).

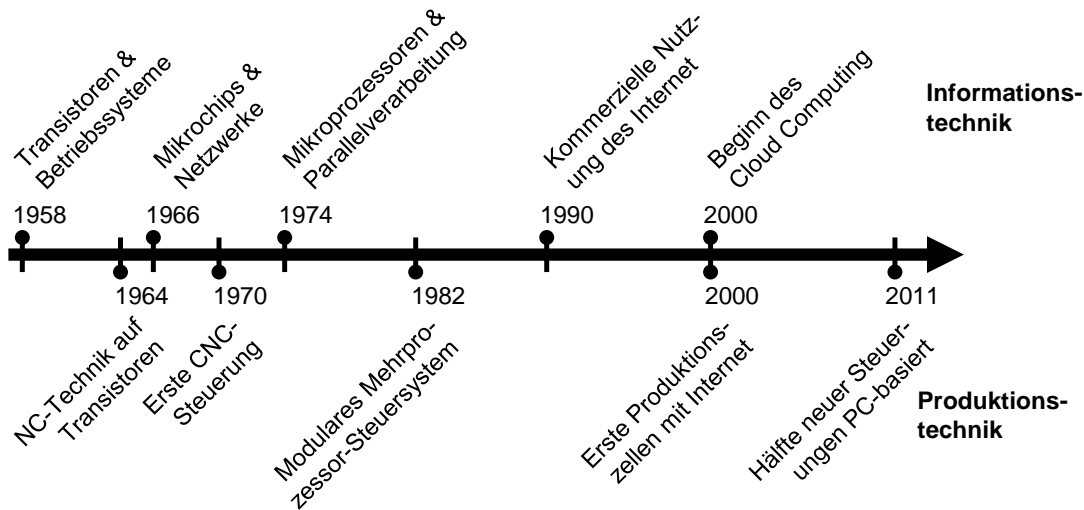


Abbildung 3.1: Historische Entwicklung der Informations- und Steuerungstechnik

Gleichzeitig sinkt der bisher hohe Anteil an Spezial-Hardware bei Steuerungen für Maschinen und Anlagen und wird durch handelsübliche Hardware aus der IT ersetzt. Software gewinnt zunehmend an Bedeutung und beinhaltet das Innovationspotential (Deuter 2014). Dies ist gleichzusetzen mit der sinkenden Anzahl an Sonderlösungen und führt zu einer vermehrten Adaption von Technologien für die Produktionstechnik (Kretschmer 2017a). Der steigende Software-Anteil folgt hierbei zusätzlich dem Trend der Modularisierung und führt zu neuen Architektur-Paradigmen, die Softwaremodule in dezentralen Strukturen auslagern. Für die Gewährleistung der Produktionsprozesse steigt mit diesen Paradigmen der Kommunikationsbedarf, um Daten zwischen Softwaremodulen untereinander und mit Produktionssystemen austauschen zu können (Schlechtendahl et al. 2015; Birkhofer et al. 2018).

3.1.2 OSI Referenzmodell

Technische Kommunikation zur Datenübertragung zwischen zwei oder n Systemen lässt sich in Schichten des Open Systems Interconnection (OSI) Models einteilen, welche in

Abbildung 3.2 dargestellt sind. Dabei handelt es sich um ein Referenzmodell für Netzwerkprotokolle mit sieben Schichten, innerhalb welcher unterschiedliche Funktionen erfüllt werden (ISO 7498). Der Funktionsumfang jeder Schicht ist klar definiert und wird als Dienst für unter- oder übergeordnete Schichten bereitgestellt. Das Referenzmodell abstrahiert den technischen Datenfluss innerhalb von Kommunikationssystemen und verdeutlicht die isolierte Nutzung eines Kommunikationsprotokolls für eine Schicht (Lechler 2011).

Als weitere Unterteilung können die Schichten 1-4 als Transportsystem und die Schichten 5-7 als Anwendungssystem betrachtet werden (vgl. Abbildung 3.2). Das Transportsystem ermöglicht und gewährleistet den Transportweg von Daten zwischen zwei Systemen. Die Anwendungsschicht fokussiert den Kommunikationsaufbau und Datenaustausch zwischen zwei Systemen. Hierbei wird kein Bezug zur eigentlichen Anwendungssoftware (Programm oder Prozess) hergestellt. Die folgende Beschreibung der für diese Arbeit relevanten Schichten erfolgt nach der Definition von Kersken und Stein (Stein 2008; Kersken 2013).

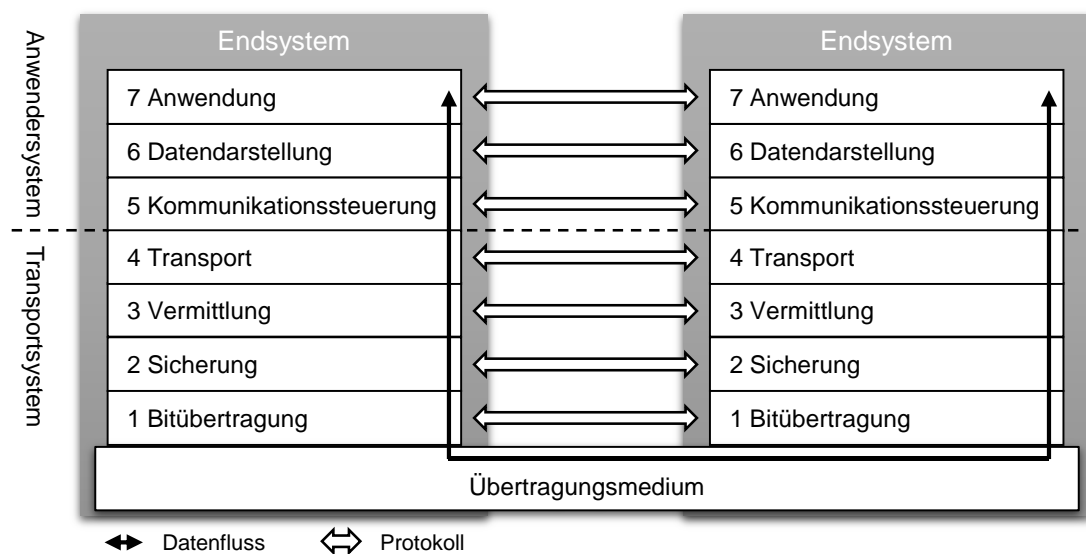


Abbildung 3.2: Aufbau des OSI-7-Schichten-Modells nach ISO/IEC 7498-1

Die Schichten 1-2 befinden sich innerhalb des Transportsystems und dienen der Beschreibung des physikalischen Übertragungsmediums sowie der Sicherstellung des Datenstroms. Diese Schichten sind für den technischen Zusammenhang innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht unmittelbar relevant und werden daher nicht näher beschrieben.

Die Schicht 3 ist die Vermittlungs- oder Netzwerkschicht und beinhaltet die Protokolle zur Adressierung und das Routing durch verschiedene Transitsysteme, um eine Verbindung zum Zielsystem herzustellen. Durch die Nutzung der Schichten 1-3 kann eine Ende-zu-Ende Verbindung zwischen zwei Systemen hergestellt werden. Das Internet Protocol (IP) ist in dieser Schicht am weitesten verbreitet und stellt die technische Grundlage für die meisten Lokal- und Weitverkehrsnetze dar (Kersken 2013).

Die Transportschicht ist Schicht 4 im OSI Referenzmodell und sorgt für die Anbindung der Datenpakete an konkrete Prozesse innerhalb eines Endsystems. Dies erfolgt beispielsweise über Portnummern (TCP und UDP) oder über Connection-IDs (SPX). Protokolle innerhalb dieser Schicht können unter anderem ebenfalls die fehlerfreie, vollständige und korrekte Reihenfolge der Datenpakete gewährleisten.

Die Schichten 5-7 des Anwendersystems werden häufig innerhalb eines Protokolls behandelt und nur anwendungsfall-spezifisch separat betrachtet. Für den technischen Zusammenhang im Rahmen dieser Arbeit sind sie nicht weiter relevant.

Basierend auf dem „DoD Internet Architecture Model“ (Cerf et al. 1983) werden innerhalb von IT-Netzwerken wie dem Internet, Unternehmens-Intranet oder privaten Netzwerken vorwiegend unterschiedliche Protokolle erst innerhalb des Anwendungssystems genutzt. Schicht 1 und 2 werden meist durch vorherrschende Infrastruktur oder die Nutzung eines Fremdnetzwerks bestimmt. Innerhalb Schicht 3 findet das Internet Protocol in Version 4 (weit verbreitet) oder Version 6 (Marktanteil wachsend) globale Anwendung (Belson 2017). Abhängig vom Anwendungsfall werden in Schicht 4 meist das Transmission Control Protocol (TCP) für verbindungsorientierte und das User Data Protocol (UDP) für verbindungslose Verbindungen eingesetzt. Alternative Protokolle werden meist nur in Sonderfällen und geschlossenen Netzwerken eingesetzt.

3.1.3 Netzwerk-Topologien

Die Topologie eines Netzwerks beschreibt die physikalische Grundform und die Organisation der Systeme zueinander. Neben verschiedenen Mischformen lassen sich die drei Grundformen Bus, Ring und Stern unterscheiden. Abbildung 3.3 stellt diese Grundformen grafisch dar und verdeutlicht mit Punkten für Netzwerkteilnehmern und Linien die Verbindungen dieser untereinander. Die zugrundeliegende Topologie bildet dabei das

Rückgrat eines jeden Netzwerks und lässt sich meist nur mit großem Aufwand verändern (Riggert 2012).

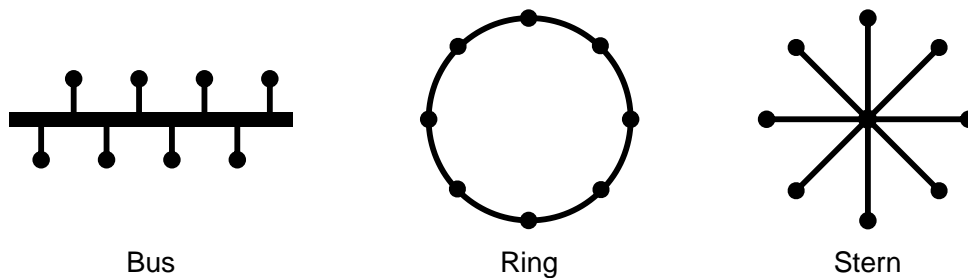


Abbildung 3.3: Übersicht klassischer Netzwerk-Topologien

Die Bus-Topologie besteht aus einzelnen Systemen, welche über ein zentrales Kabel miteinander verbunden sind. Jedes System kann am Netzverkehr teilnehmen, welcher zumeist von einem Master-System initiiert und verwaltet wird. Ist die Verbindung des zentralen Kabels unterbrochen, kommt die Kommunikation im gesamten Netzwerk zum Erliegen (Riggert 2012).

Ring-Topologien sind vergleichbar mit Bus-Topologien, da sie die offenen Bus-Enden des zentralen Kabels miteinander verbinden, um ein Netzwerk in Form eines geschlossenen Rings zu erhalten. Meist besteht in Ring-Topologien eine zentrale Datenstromrichtung, in welcher die Pakete zum nächsten System übertragen werden. Ring-Topologien können als redundante Form eines Bussystems genutzt werden, um einfache Unterbrechungen des Kabels zu kompensieren (Kersken 2013).

Bei Stern-Topologien hat jedes System eine Verbindung zu einem zentralen System, welches für die Netzwerkverwaltung zuständig ist. Der erhöhte Verkabelungsaufwand steht bei dieser Form der Ausfallsicherheit gegenüber, da jedes System eine eigene Verbindung besitzt.

Durch die hohe Skalierbarkeit und Ausfallsicherheit hat sich die Stern-Topologie heutzutage als „State-of-the-Art“ durchgesetzt, da sich jede Technologie auf diese Grundform abbilden lassen kann (Riggert 2012).

Betrachtet man große Lokal- und Weitverkehrsnetze (bspw. Unternehmensnetzwerke oder das Internet) liegt oft eine Mischform (z.B. viele Stern-Topologien, welche zu einem großen Baum werden) der o.g. Grundformen vor. Durch die hohe Zahl an Systemen und

Verantwortungsbereichen im Internet ist die Topologie schwer beherrschbar und verbindet nicht mehr nur verschiedene Netzwerke via Stern-Topologie, sondern bildet redundante Pfade zugunsten der Ausfallsicherheit und Übertragungsgeschwindigkeit ab. Der dezentrale Ansatz dieses öffentlichen Netzes ermöglicht eine Vielzahl an Querverbindungen, welche die klassischen Topologie-Paradigmen in einem großen vermaschten Netz vereinen (Calvert et al. 1997; Siamwalla et al. 1998). Demgegenüber stehen Anwendungsfälle mit isolierten Netzwerken, welche auf die Eigenschaften bestimmter Topologien angewiesen sind. Diese Formen finden sich häufig in industriellen Applikationen wieder.

3.1.4 Industrielle Kommunikation (OT Kommunikation)

Kommunikation von operativen Technologien (OT) bzw. industrielle Kommunikation beschreibt die Datenübertragung zwischen Systemen in der Produktionstechnik (meist in der Fertigungs- und Prozessautomation). Den Anwendungsfällen liegt meist ein physikalischer Prozess mit Steuerungen, Aktorik und Sensorik zugrunde. Die hierzu eingesetzten Protokolle sind meist abhängig vom Anwendungsfall. So kann bei nicht-echtzeit-relevanten Anwendungen auf herkömmliche Standards (bspw. aus der IT) zurückgegriffen werden. Bei strengen Anforderungen an zeitdeterministisches Verhalten sind jedoch spezielle industrielle Protokolle notwendig, welche für diesen Einsatz entwickelt wurden (Decotignie et al. 1993).

Industrielle Kommunikation kann in vertikale und horizontale Kommunikation unterschieden werden. Vertikale Kommunikation beschreibt den Datenaustausch mit über- oder untergeordneten Systemen (bspw. SPS zu I/O-Klemmen). Horizontale Kommunikation beschreibt den Datenaustausch mit Systemen innerhalb einer Ebene (bspw. SPS zu CNC-Steuerung). Die unterschiedlichen Ebenen, um Kommunikationswege zu identifizieren, können dabei nach dem Paradigma der Automatisierungspyramide klassifiziert werden (Wollschlaeger et al. 2017).

3.1.4.1 Automatisierungspyramide

Zur Darstellung der Relationen hinsichtlich der Kommunikation verschiedener Komponenten und Systeme zueinander, hat sich über die Historie der Automatisierungstechnik

das Modell der Automatisierungspyramide durchgesetzt (Forstner et al. 2014). Hierbei werden IT-Prozesse innerhalb fertiger Unternehmen und dazugehörige Kommunikationsteilnehmer in hierarchische Ebenen kategorisiert, um die Komplexität durch diese Unterteilung besser beherrschbar zu machen. Das heute vorherrschende Modell der Automatisierungspyramide basiert auf der sog. „CIM-Pyramide“ aus den 70er und 80er Jahren und setzt sich zumeist aus fünf Ebenen zusammen. Es wurde in der DIN EN 62264 – basierend auf der ISA-95 Spezifikation – normiert (DIN 62264). In Folge des Trends der Digitalisierung erweitert Siepmann das DIN-Modell um eine Ebene auf folgende sechs Ebenen der Automatisierungspyramide:

- Ebene 5: Unternehmensebene - Enterprise-Resource-Planning (ERP)
- Ebene 4: Betriebsebene - Manufacturing Execution System (MES)
- Ebene 3: (Prozess-) Leitebene - Human-Machine-Interface (HMI) / Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
- Ebene 2: Steuerungsebene - Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)
- Ebene 1: Feldebene - Feldgeräte bestehend aus Aktoren und Sensoren
- Ebene 0: Prozessebene – Fertigung / Produktionsprozess

Abbildung 3.4 zeigt den klassischen Aufbau einer Automatisierungspyramide mit den dazugehörigen Ebenen nach Siepmann (Siepmann 2016). Die Hierarchien unterscheiden sich hierbei deutlich hinsichtlich der Planung (erfolgt zumeist nach dem Top-Down-Prinzip) und der Datenerfassung (erfolgt zumeist nach dem Bottom-Up-Prinzip). Für die Informationsweitergabe aus Ebene 5 in Ebene 0 müssen demnach alle Ebenen durchlaufen werden. Ein direkter, bilateraler Austausch zwischen zwei nicht benachbarten Ebenen ist nicht möglich. Eine detaillierte Betrachtung der Ebenen zeigt auch deutliche Unterschiede hinsichtlich des Kommunikationsverhaltens. Das charakteristische Datenvolumen nimmt von Ebene 5 zu Ebene 0 sukzessive ab. So werden aus Aufträgen mit Dokumentationen in Ebene 5, Bearbeitungsprogramme, welche innerhalb von Ebene 1 als digitale Signale verarbeitet werden. Über diesen Verlauf nimmt die Frequenz der Datenübertragung jedoch zu. Die Kommunikation innerhalb von Ebene 5 erfolgt mit Zykluszeiten von mehreren Stunden. Mit jeder tieferen Ebene wird die Übertragung schneller bis hin zu Millisekunden-Zyklen in Ebene 0 (Heinrich et al. 2015).

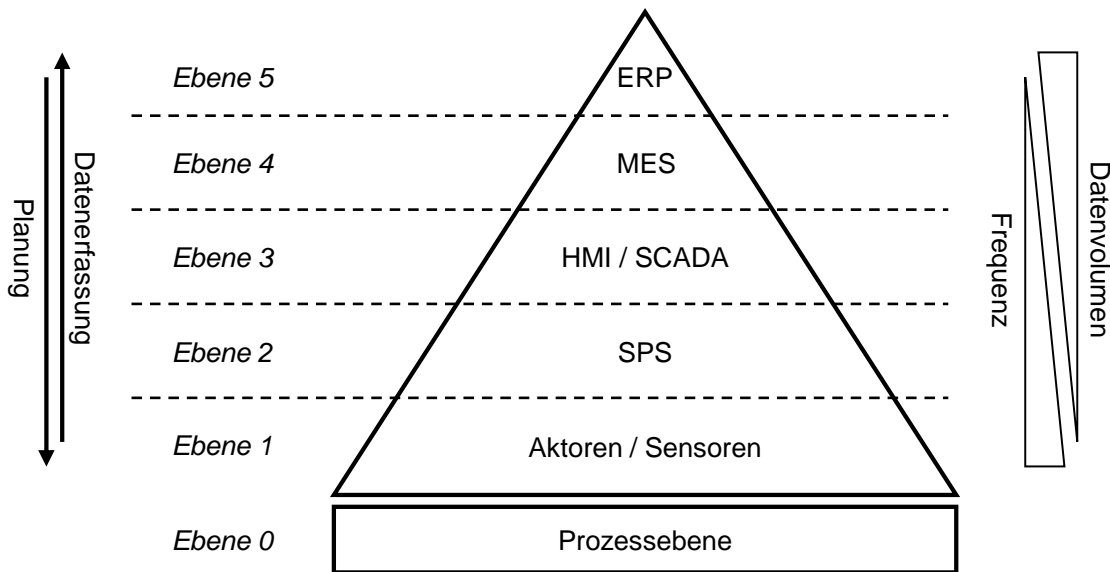


Abbildung 3.4: Automatisierungspyramide nach (Siepmann 2016)

Diese klassische Betrachtungsweise geht einher mit zumeist wenigen Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen. Im heutigen Produktionsumfeld erfolgt die Steuerung der einzelnen Ebenen isoliert auf Basis verfügbarer Eingangsdaten. Folglich ist eine Verketten und Vernetzung von Ebenen und unterschiedlichen IT-Systemen meist statisch realisiert, da über den Lebenszyklus der Systeme keine Anpassung hinsichtlich der Schnittstellen oder Kommunikation mit anderen Kommunikationspartnern notwendig ist (Bauernhansl et al. 2014).

3.1.4.2 Machine-to-Machine Kommunikation in der Automatisierungstechnik

Die Vernetzung von Systemen durch die Ebenen der Automatisierungspyramide ist durch eine Vielzahl von Kommunikationsprotokollen der Machine-to-Machine (M2M) Kommunikation geprägt. Die strengen Anforderungen der Produktionstechnik erfordern oft den Einsatz spezieller industrieller Feldbusse. Durch die Gewährleistung zeitdeterministischer Eigenschaften sowie der proprietären Spezifikation, lassen sich diese selten in bestehende IT-Infrastrukturen integrieren. Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel für die vertikale und horizontale Kommunikation durch die verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide und verdeutlicht dabei den sich ändernden Einsatz von Kommunikationsprotokollen durch die Ebenen (Zahn et al. 2017; Wollschlaeger et al. 2018).

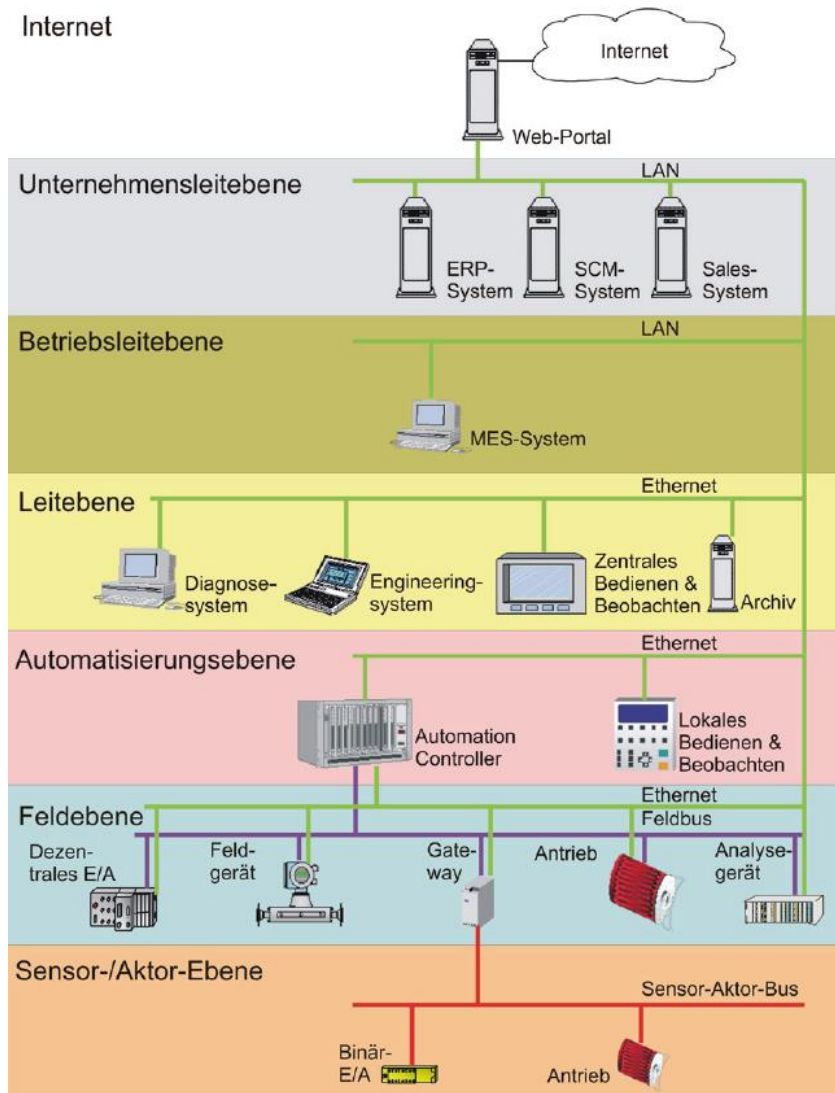


Abbildung 3.5: Kommunikation nach Wollschlaeger (Wollschlaeger et al. 2018)

Von der Unternehmensleitebene (Ebene 5) bis zur Leitebene (Ebene 3) kommt für die Kommunikation zwischen den Systemen oft das vorliegende Lokalverkehrsnetz (LAN) und standardisierte Kommunikationsprotokolle aus der IT zum Einsatz.

Von der Leitebene abwärts findet die Kommunikation bereits auf Industrial Ethernet-basierten Feldbussen (OSI Schicht 2) statt und kann ab der Feldebene von anderen Feldbussen (OSI Schicht 1) ersetzt werden.

Betrachtet man den Marktanteil (vgl. Abbildung 3.6) industrieller Netzwerke, erkennt man eine starke heterogene Landschaft unterschiedlicher und proprietärer Standards mit unterschiedlicher Technologiebasis (Ethernet, Wireless, etc.). Die jährlichen Wachstumsraten (Feldbus: 4%, Ethernet: 22%, Wireless: 32%) lassen bisher keine Homogenisierung

und Integration in übergeordnete IT-Architekturen erkennen, weisen jedoch einen deutlichen Trend zu Ethernet- und Wireless-basierten Lösungen auf (Decotignie 2009; Herkommer 2017).

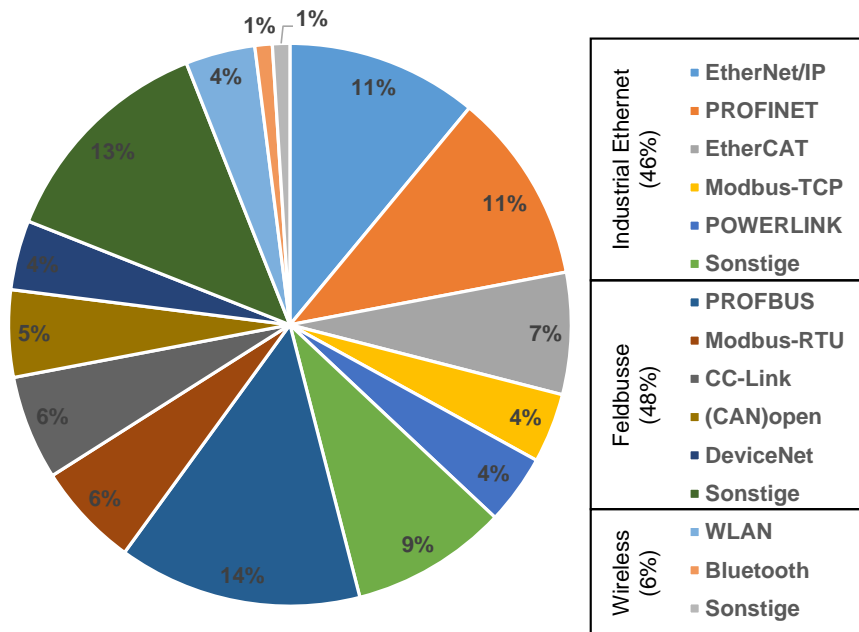


Abbildung 3.6: Marktanteil industrieller Netzwerke (Herkommer 2017)

Bei Systemen ohne zeitdeterministische Anforderungen oder zur Synchronisierung von Prozessabläufen zwischen zwei Systemen unterschiedlicher Hersteller, wird auf Kommunikationsprotokolle aus der IT zurückgegriffen. Oftmals werden hierfür anwendungsfall-spezifische Nachrichtenstrukturen in OSI Schicht 4 entworfen und für den Datenaustausch genutzt. Einfache Protokolle aus der IT, wie bspw. Representational State Transfer (REST) für den Informationsaustausch und Web Service Description Language (WSDL) für die Schnittstellenbeschreibung, finden meist aus zwei Gründen keine Anwendung (Hoppe 2017):

Erstens bieten die genannten Technologien nur eine Standardisierung auf dem Transport-Layer und keine Interoperabilität hinsichtlich der Beschreibung der Daten (sog. Semantik). Das heißt, dass ein System von Hersteller A eine andere WSDL-Schnittstellenbeschreibung enthalten kann als das System von Hersteller B (Chinnici et al. 2007).

Zweitens sind Lösungen von Webservices, integriert in SPS-Systeme bspw. mit Patenten belegt und daher mögliche Lösungen den Patentinhabern vorbehalten (Lindner et al. 2000).

3.1.5 IT Kommunikation

Zur Einordnung von IT und der dazugehörigen IT Kommunikation eignet sich ein 3-Ebenen-Modell nach dem Institut für Interne Revision aus Österreich (IIA Austria 2016).

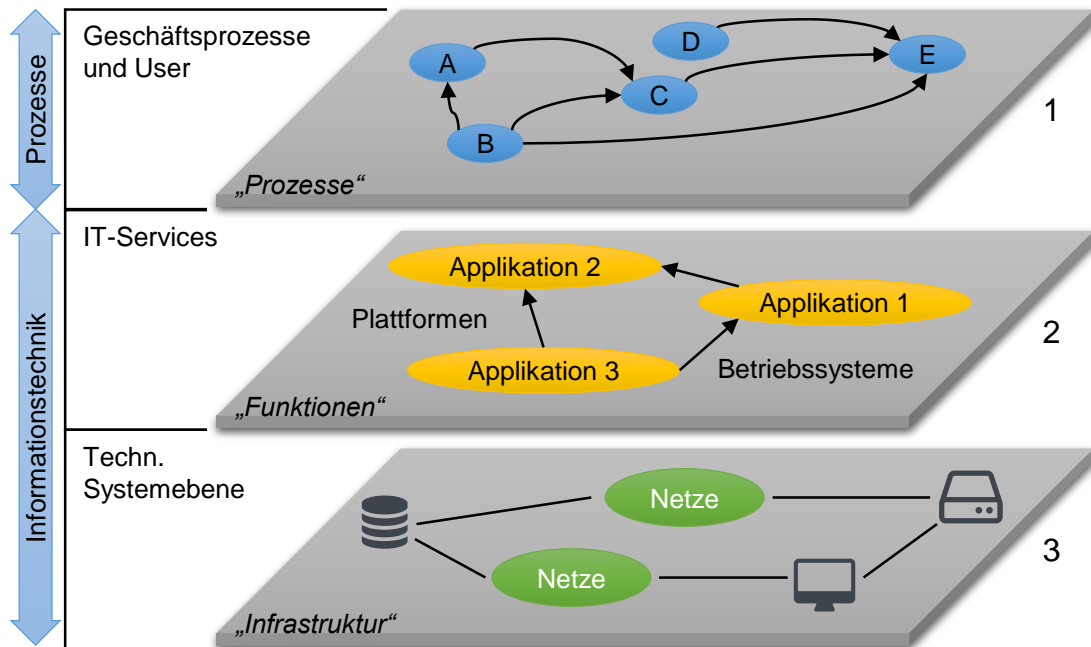


Abbildung 3.7: 3-Ebenen-Modell nach (IIA Austria 2016)

Die erste Ebene in Abbildung 3.7 bildet hierbei Geschäftsprozesse eines Unternehmens ab, welche mit Hilfe von IT Ressourcen realisiert werden sollen. Die zweite Ebene stellt Funktionen in Form von Applikationen zur Verfügung, welche nach verschiedenen Architekturdesigns der Softwaretechnik miteinander verbunden werden können. Maßgebliche Ressourcen sind hierbei Betriebssysteme und Plattformen. Die Basis des Modells stellt die technische Systemebene mit Infrastruktur, welche einen Betrieb und die Vernetzung aller Systeme gewährleistet. Innerhalb dieser Ebene findet maßgeblich die IT Kommunikation statt und ermöglicht den Austausch von Informationen zwischen Applikationen. Als Kommunikationsprotokolle haben sich heute maßgeblich TCP und http als Standards durchgesetzt (Hoppe 2017). Standards für die IT Kommunikation basieren auf dem o.g. DoD Internet Architecture Model nach Cerf und betrachten meist nur Protokolle für die Anwendung oberhalb der TCP/IP oder UDP/IP Ebene (Cerf et al. 1983). Für das Design und die Planung der Infrastruktur sind jedoch weiterhin alle Ebenen des OSI-Modells

von Relevanz, da Anforderungen an die Kommunikation (Distanz, Bandbreite, Umgebungsstörungen, etc.) Einfluss auf die eingesetzten physikalischen Medien haben. Um Aufwände in der Übersetzung von Protokollen zu vermeiden, sollten bevorzugt Technologien mit hohem Marktanteil in Betracht gezogen werden (Stein 2008).

3.2 Serviceorientierte Architektur

Im folgenden Abschnitt wird das aus der Softwaretechnik-stammende Paradigma serviceorientierte Architektur (SOA) vorgestellt. Zunächst werden die Grundlagen, eine Definition und Vorteile einer solchen Architektur geschildert, anschließend auf Entwurfsprinzipien eingegangen, der klassische Aufbau und Einsatzgebiete außerhalb von IT-Architekturen beleuchtet sowie die Aufgaben und Bedeutung des Serviceverzeichnisses (eng. Service Registry) erläutert.

3.2.1 Grundlagen von SOA

Serviceorientierung oder serviceorientierte Architektur ist ein Architekturdesign aus der Softwaretechnik. Neben der Microservice-Architektur und dem domänengetriebenen Entwurf beschreibt SOA ein Architekturdesign für verteilte Softwaresysteme (Erl 2006). Das Architekturdesign stellt IT-Funktionalitäten in einzelnen, geschäftsorientierten Diensten (sog. Services) bereit, welche für verschiedene Geschäftsprozesse die jeweilige Geschäftslogik (eng. Business Logic) beinhalten. Die Auslegung der Funktionalität eines Service wird daher zumeist an einem Geschäftsprozess des Unternehmens orientiert, um diesen möglich isoliert abzubilden. Aus technischer Perspektive bezeichnet man einen Service als eine Softwarefunktionalität, welche innerhalb eines Netzwerks jederzeit zur Verfügung steht, um über geeignete Schnittstellen die abgebildete Geschäftslogik bereitzustellen. Der Service kann somit von anderen Services über diese Schnittstellen im Netzwerk erreicht, aufgerufen und genutzt werden.

Nach Dostal et al. ist SOA wie folgt definiert:

„Unter einer SOA versteht man eine Systemarchitektur, die vielfältige, verschiedene und eventuell inkompatible Methoden oder Applikationen als wiederverwendbare und offen zugreifbare Dienste repräsentiert und dadurch eine plattform- und sprachenunabhängige Nutzung und Wiederverwendung ermöglicht.“ (Dostal 2005)

Gewachsene IT-Landschaften in Unternehmen sehen sich oft den Herausforderungen monolithischer Strukturen und komplizierter Gebilde verschiedener Applikationen gegenüber (Takai 2017). Das Architekturdesign nach SOA soll diesen Herausforderungen begegnen und bringt nach Zeppenfeld et al. unter Berücksichtigung von Übersichtlichkeit und geordneter Strukturen folgende Vorteile mit sich (Zeppenfeld et al. 2009):

- Durch die Isolierung zu einzelnen Services besteht eine **flexible Änderbarkeit** durch Nutzung alternativer oder zusätzlicher Services innerhalb eines Geschäftsprozesses.
- Die Wiederverwendung und Mehrfachnutzung der Services verhindert den redundanten Einsatz ähnlicher Geschäftslogik und **vereinfacht die Wartung**.
- Vorhandene Software kann durch neue Technologien erweitert werden, um als Services bereitgestellt zu werden. Damit müssen **bestehende Systeme nicht modifiziert** werden, sondern werden über Schnittstellen als eigener Service verfügbar gemacht.
- Services können auch außerhalb der Unternehmensgrenzen genutzt und angeboten werden. Somit ergeben sich **neue Vertriebswege** durch die Nutzung oder das Verkaufen von Geschäftslogik.
- Durch den serviceorientierten Ansatz wird die gesamte Architektur **skalierbar**, da neue Komponenten bei Bedarf flexibel eingebunden werden können. Eine aufwendige Rekonfiguration ist nicht notwendig.
- Der Architekturstil schreibt keine Technologie für Orchestrierung, Verwaltung und Kommunikation vor. Trotz des Trends zu XML-basierten Technologien basiert das Design auf **Offenheit** und die Anforderungen können durch viele moderne Middleware-Systeme erfüllt werden.

SOA ist daher ein Architekturdesign für verteilte Softwaresysteme, welches durch weitere Technologien unterstützt wird und diese nutzt, um dem Paradigma gerecht zu werden. Die Auswahl der eingesetzten Technologien bleibt dem Nutzer überlassen, welcher diese zumeist auf Basis des Anwendungsfalles entscheidet. Des Weiteren haben sich bis heute verschiedene Ansätze zur Definition von Begrifflichkeiten, Eigenschaften und Referenzarchitekturen von SOA etabliert (Liebhart 2007).

3.2.2 Entwurfsprinzipien von SOA

SOAs stellen für die Abbildung von Geschäftsprozessen in verschiedenen Services ein Paradigma der verteilten Lösungslogik dar. Nach Erl gibt es hierfür acht Entwurfsprinzipien, die für eine Architektur gelten sollen, um als serviceorientierte Architektur zu gelten (Erl 2010; Takai 2017):

- **Standardisierte Serviceverträge** sind die Grundlage der Kommunikation zwischen Services und bestehen meist aus technischen und nicht-technischen Beschreibungen (bspw. in Form von XML-Dokumenten). Sie beschreiben den Service selbst sowie dessen Nutzung.
- Die **lose Kopplung** von Services verhindert starke Abhängigkeiten und erhöht die Austauschbarkeit von Services. Eine Abhängigkeit von Services untereinander ist häufig unvermeidbar, sollte jedoch soweit möglich vermieden werden.
- **Serviceabstraktion** beschreibt die Reduzierung der extern bereitgestellten Informationen über den Servicevertrag auf ein Minimum. Serviceabstraktion verhindert, dass unnötig viele Informationen preisgegeben werden und ausschließlich innerhalb eines Services zur Verfügung stehen. Hiermit wird zeitgleich die o.g. lose Kopplung begünstigt.
- **Servicewiederverwendbarkeit** gilt als Kernbestandteil von SOA und ist auch bereits aus der objektorientierten Softwareentwicklung bekannt. Im Fokus steht die Verwendung eines Services durch eine Vielzahl von Servicenutzern. Der Einsatz eines Serviceverzeichnisses begünstigt die Wiederverwendbarkeit.
- Das Prinzip der **Serviceautonomie** beschreibt die Unabhängigkeit eines Services von Ressourcen und Umgebung hinsichtlich der Laufzeitumgebung. Je unabhängiger ein Service entworfen ist desto stabiler ist sein Laufzeitverhalten.
- Die **Servicezustandslosigkeit** beschreibt das Verarbeiten und Vorhalten von möglichst wenigen Zustandsinformationen, welche Servicenutzern vor einem Aufruf des Services bekannt sein müssen. Die Zustandslosigkeit begünstigt die Skalierbarkeit und Verfügbarkeit eines Services, da mehrere Instanzen ohne Kenntnis über vorhergegangene Events aufgerufen werden können.

- Die **Serviceauffindbarkeit** beschreibt das verständliche und automatische Auffinden von Services durch Servicenutzer unter Verwendung eines Serviceverzeichnisses. Im Vergleich zu einem manuellen Vorgang begünstigt die automatische Nutzung eines Serviceverzeichnisses die Servicewiederverwendbarkeit und lose Kopplung. Durch das automatische Auffinden verfügbarer Services können sich jederzeit neue lose Kopplungen ergeben oder lösen. Das Serviceverzeichnis dient zeitgleich als zentrales Nachschlagewerk, um vorhandene Services hinsichtlich Wiederverwendbarkeit zu nutzen.
- **Servicekomposition** beschreibt die Kombination der Lösungslogik verschiedener Services, um komplexe Problemstellungen zu lösen. Hierzu werden die Fähigkeiten verschiedener Services miteinander kombiniert, um bspw. einen Geschäftsprozess vollständig abzubilden.

Abbildung 3.8 verdeutlicht zwei der wichtigsten Entwurfsprinzipien. Abbildung 3.8a ist die Servicekomposition auf Basis verfügbarer Services im Serviceverzeichnis dargestellt. Abbildung 3.8b zeigt die feste Kopplung (oben) durch direkte Beziehung von Service A zu Service B und die lose Kopplung (unten) nach einer Auswahl, welche auf Basis gestellter Anforderungen und angebotener Fähigkeiten getroffen wird.

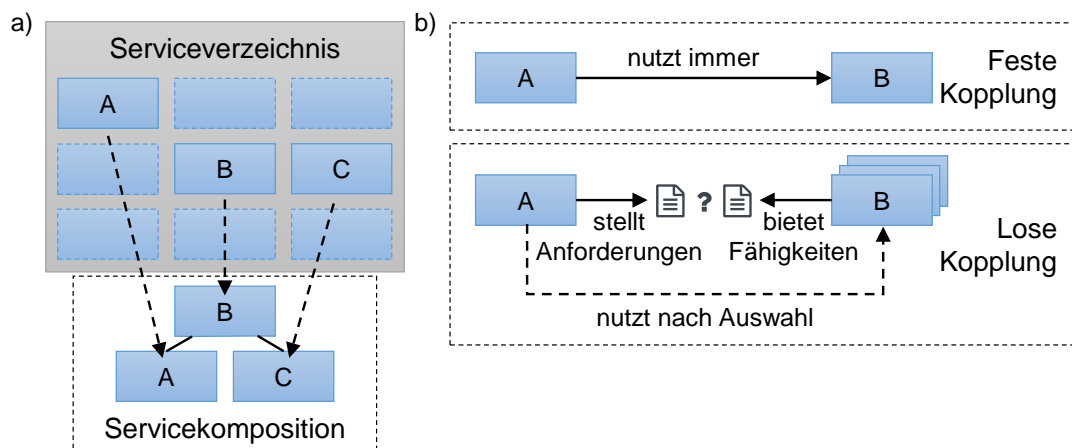


Abbildung 3.8: Übersicht zweier wichtiger Entwurfsprinzipien von SOA

3.2.3 Aufbau von SOA und das SOA-Dreieck

Unter Betrachtung der o.g. Entwurfsprinzipien kann das Architekturdesign im sog. SOA-Dreieck (vgl. Abbildung 3.9) beschrieben werden. Hierbei stehen sich die drei Kernkomponenten Serviceanbieter, Serviceverzeichnis und Servicenutzer gegenüber (Melzer 2010).

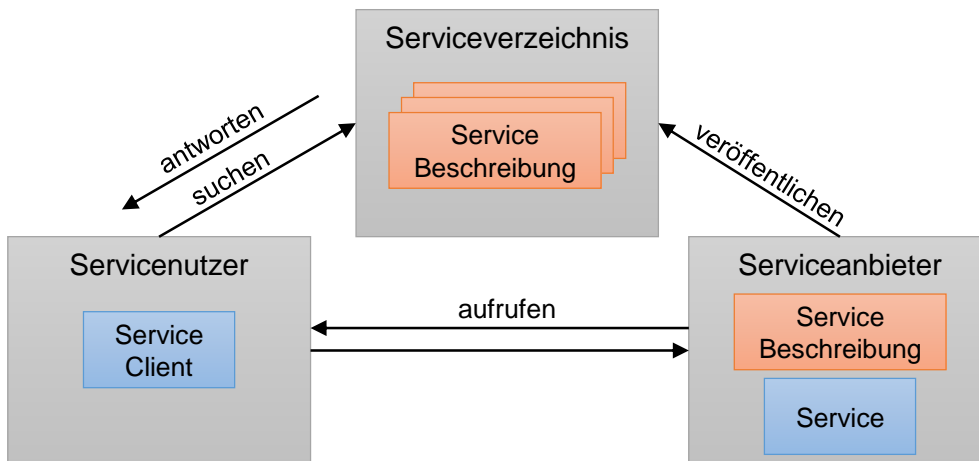


Abbildung 3.9: Das Dreieck der serviceorientierten Architektur

Zur Gewährleistung der Serviceauffindbarkeit spielen Serviceanbieter und Serviceverzeichnis eine besondere Rolle. Stellt ein Service Fähigkeiten bzw. Lösungslogik innerhalb eines Netzwerks bereit, muss diese auffindbar sein. Im Rahmen der standardisierten Serviceverträge (siehe Abschnitt 3.2.2) verfügt jeder Service über eine Servicebeschreibung. Diese veröffentlicht jeder Service am zentralen Serviceverzeichnis innerhalb eines Netzwerks.

Sucht ein Servicenutzer innerhalb des Netzwerks nach Services mit bestimmten Fähigkeiten so stellt er nach dem Prinzip der losen Kopplung Anforderungen auf, welche er innerhalb des Serviceverzeichnisses in Form von Servicebeschreibungen erfüllt bekommen kann. Das Serviceverzeichnis antwortet mit den kompatiblen bzw. verfügbaren Services, welche die angeforderten Fähigkeiten bereitstellen. Der Aufruf erfolgt im Anschluss direkt von dem Akteur über das Netzwerk und unter Nutzung der Informationen zur Schnittstelle aus der Service Beschreibung (Gómez 2012; Westkämper et al. 2013).

3.2.4 Serviceverzeichnis

Das Serviceverzeichnis stellt für das SOA Paradigma eine maßgebliche Komponente dar. Im Vergleich zu monolithischen und starren Strukturen ist sie jedoch ein neues Modul, welches integriert und generisch verfügbar sein muss, um allen bestehenden und zukünftigen Anforderungen zur Bekanntmachung von Services gerecht zu werden. SOA schreibt zur Realisierung eines Serviceverzeichnisses und dessen Funktionsumfang keine Technologie vor, da SOA als offenes Konzept mit verschiedenen Technologien realisiert werden kann (Liebhart 2007). Es müssen lediglich Beschreibungssprachen für die Servicebeschreibung sowie eine Schnittstelle für die Vermittlung von Serviceanbieter und Servicenutzer vorhanden sein. Innerhalb von IT-Architekturen wird für die Realisierung von SOA häufig auf Technologien wie WSDL, UDDI oder SOAP zurückgegriffen (Papazoglou 2003; Schroth et al. 2007).

3.2.5 Einsatzgebiete von SOA

Das Architekturdesign SOA wird heute in erster Linie zur Abbildung von Geschäftsprozessen in Geschäftssystemen genutzt, welche von Menschen genutzt werden (Lehman 1980). Der Einsatz beschränkt sich daher meist auf den Bereich der IT zur Realisierung verteilter Softwaresysteme. Die Vorteile von SOA können jedoch auch in anderen Domänen Anwendung finden, wie beispielsweise in der Produktionstechnik (Boyd et al. 2008). Nach Boyd et al. existieren Technologien zur Realisierung von SOA Paradigmen in der Produktionstechnik, werden jedoch von den meisten Herstellern bisher mit geringem Fortschritt realisiert und eher evolutionär als revolutionär adaptiert werden. Der Fokus auf Standardisierung für Protokolle durch SOA stellt hierbei nach Boyd et al. eine maßgebliche Herausforderung dar.

Die Adaption von SOA wurde bereits im Rahmen des Projekts „SIRENA“ sowie der Arbeit von Minguez und Wu et al. untersucht. Hierbei wurde die Adaption des SOA Paradigmas für die Produktionstechnik unter Berücksichtigung einheitlicher Servicespezifikationen bis in die Applikationsebene und der Unabhängigkeit von Technologien, Betriebssystemen, Netzwerken und Protokollen beleuchtet. Im Fokus stand dabei jederzeit die Adaption von Lösungen aus der IT bzw. aus den Web Service Technologien. Ein direkter Bezug zu Technologien aus der Produktionstechnik sowie die Einbindung bereits

existierender Produktionsumgebungen (sog. Brownfield) wurde nicht geschlossen. Des Weiteren wurden keine Standards für Protokolle und Beschreibungen der Produktionstechnik betrachtet (ITEA 2006; Wu et al. 2008; Mínguez 2012).

Mathes et al. konzentrieren sich auf die Adaption des SOA Architekturdesigns für zeit-deterministische Applikation innerhalb der Systemgrenze von Industrial PCs (IPC) und angebundenen Feldbuskomponenten (Mathes et al. 2009).

Abel et al. stellt einen Ansatz vor, SOA-Paradigmen für die automatisierte Inbetriebnahme von Bearbeitungsmaschinen zu nutzen. Unter Anwendung der SOA Entwurfsprinzipien können Komponenten von Bearbeitungsmaschinen als Services betrachtet werden und beliebig komponiert werden (Abel et al. 2013).

3.3 Einfluss durch Industrie 4.0 auf die Kommunikationstechnik

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss durch Industrie 4.0 auf die Kommunikationstechnik vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf der Produktionstechnik und stellt das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0, das Konzept des Software Defined Manufacturing sowie den Paradigmenwechsel in der Kommunikation und den dafür möglichen Standard OPC UA vor.

3.3.1 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) ist das Ergebnis verschiedener Fachausschüsse mit Vertretern und Mitgliedsunternehmen der Verbände BITKOM, VDMA und ZVEI. Ziel des RAMI 4.0 ist das Vereinen unterschiedlicher Aspekte zu einer gemeinsamen Referenzarchitektur für Industrie 4.0. Zu Beginn wurde ein Überblick vorhandener Ansätze und Methoden im Kontext von Industrie 4.0 erstellt, welcher verschiedene Teilaspekte einer ganzheitlichen Sicht auf Industrie 4.0 beschreibt. Diese Teilaspekte lassen sich in die folgenden vier Kategorien untergliedern, innerhalb welcher unten genannte existierende Standards und Technologien betrachtet wurden:

- Ansatz für die Realisierung eines Communication Layers
 - OPC UA: Basis IEC 62541

- Ansatz für die Realisierung des Information Layers
 - IEC Common Data Dictionary (IEC 63160 Series / ISO 13584-42)
 - Merkmale, Klassifikation von Werkzeugen nach eCI@ss
 - Electronic Device Description (EDD)
 - Field Device Tool (FDT)
- Ansatz für die Realisierung von Functional und Information Layer
 - Field Device Integration (FDI) als Integrationstechnologie
- Ansatz für das durchgängige Engineering
 - AutomationML
 - ProSTEP iViP
 - eCI@ss (Merkmale)

Bei dem RAMI 4.0 handelt es sich um ein dreidimensionales Modell, welches sich am Smart Grid Architecture Model orientiert (Adolphs et al. 2015). Es sorgt für einheitliche Begriffe und soll verdeutlichen, wie ein Produktionssystem über seinen gesamten Lebenszyklus erfasst und virtuell abgebildet wird. Hierfür wurde in die folgenden drei Achsen unterschieden, welche in Abbildung 3.10 dargestellt werden (Hankel 2015; Hankel et al. 2016):

- Hierarchy Levels (dt. Hierarchie Ebenen) lehnen sich an die Ebene der klassischen Automatisierungspyramide an (vgl. Abschnitt 3.1.4.1) und wurden durch die Ebenen Field Device, Product und Connected World ergänzt, um den Anforderungen erhöhter Vernetzung gerecht zu werden.
- Life Cycle & Value Streams (dt. Lebenszyklus und Wertstrom) ist eine zeitliche Achse und beschreibt die durchgängige Datenerfassung über den Lebenszyklus eines Produktionssystems von der Planung und Entwicklung (Typen) über die Herstellung, Inbetriebnahme und Nutzung (in Form mehrerer Instanzen) bis zur Stilllegung und möglichem Recycling.
- Layers (Schichten) erfassen Produktionssysteme mit den dazugehörigen Daten, Funktionen, Schnittstellen und möglichen Geschäftsbeziehungen. Diese werden innerhalb der sechs Layer zugeordnet.

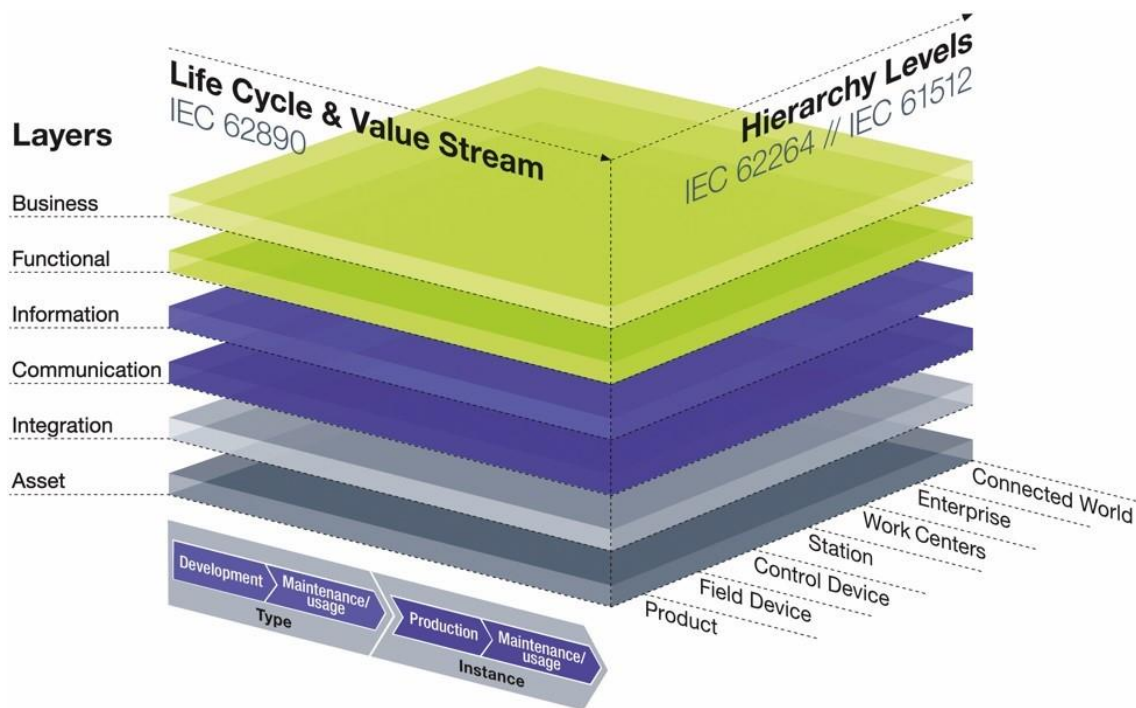


Abbildung 3.10: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (DIN SPEC 91345)

3.3.2 Software Defined Manufacturing

Bei Begriffen wie Software Defined Networking oder Software Defined Radio wird in Anwendungsfällen zur Realisierung von Netzwerkinfrastrukturen oder der Funkübertragung auf Software gesetzt. Diese dient dazu den jeweils zugrundeliegenden Anforderungen jederzeit bedarfsoptimiert gerecht zu werden.

Ähnliche Konzepte haben sich unter dem Dachbegriff „Software Defined X“ zusammengefasst und beschreiben Konzepte – primär aus der IT – zur Realisierung und Zentralisierung von IT-Fragestellungen. Ähnlich wie beim Einzug von Server-Virtualisierung, sollen Ressourcen als Service zur Verfügung gestellt werden (Herrmann et al. 2014). Diese Entwicklungen unterstützen unmittelbar Trends hinsichtlich des Cloud Computings, um Endnutzern Ressourcen „einfach, zuverlässig, skalierbar und mit hoher Qualität nach dem einfachen Abo-Prinzip“ zur Verfügung zu stellen (Herzog et al. 2016).

Durch vergleichbare Paradigmenwechsel in der Produktionstechnik hat sich die Adaption von Software Defined X in einem Konzept manifestiert: Software Defined Manufacturing (SDM). Ähnlich der Einführung einer virtuellen Schicht in der IT, welche maßgeblich durch Software getrieben ist, soll für die Produktionstechnik eine Entkopplung von der

Hardware stattfinden. Die Wertschöpfungskette produzierender Unternehmen soll von der Planung bis zur Produktion durch Software anpassbar und von technischen Eigenschaften entkoppelt sein. Analog dem Konzept Software Defined Networking können alle Planungsschritte virtuell ausgelegt, durchgeführt und getestet werden. Die eigentliche Inanspruchnahme von Ressourcen (Instanziierung) ist erst zum Zeitpunkt des Bedarfs notwendig und erfordert im Vorfeld keine Ressourcen. Nach SDM werden die physischen Produktionsmittel in Abhängigkeit der Produktbeschreibung geplant und mittels Software definiert, dass notwendige Produktionsschritte ausgeführt werden können (Lechler et al. 2017; Lechler et al. 2018).

Zur Realisierung von SDM müssen Produktions- und Betriebsmittel stark modularisiert werden und als separate Komponenten betrachtet werden können. Die starke Bindung an Software erfordert eine nahtlose Integration der physischen Produktionsmittel in Informationsnetzwerke zur Repräsentanz in einem sog. virtuellen Abbild (vgl. Abbildung 3.11). SDM beschreibt ein Konzept für eine ganzheitliche Abbildung aller physischen Fertigungsschritte als virtuelle Modelle, um diese bereits frühzeitig in die Planung und zur individuellen Bereitstellung eines Produktionsprozesses einsetzen zu können. Hierzu müssen alle Betriebsmittel bekannt und als virtuelle Modelle (Daten- bzw. Informationsmodelle) vorhanden sein.

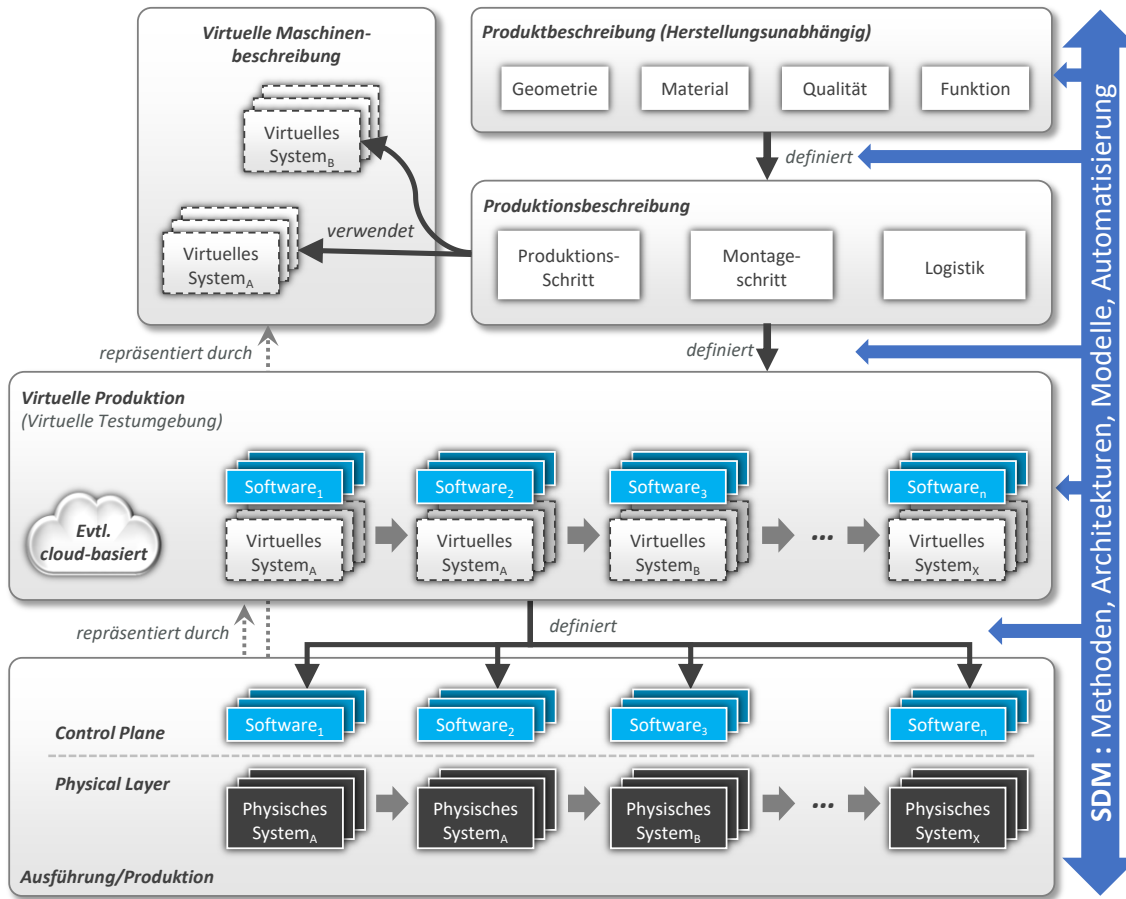


Abbildung 3.11: Architekturüberblick im SDM Konzept (Lechler et al. 2018)

3.3.3 Paradigmenwechsel in der Kommunikation

Der Trend durch Industrie 4.0 führt zu einer Zunahme an Komplexität und Heterogenität hinsichtlich der Vernetzung und Kommunikation von Systemen innerhalb der Wertschöpfungskette. Eine Vielzahl von Technologien zur Gewährleistung der hohen Anforderungen der Produktionen (bspw. Echtzeitkommunikation via industrieller Feldbusse) führt zu eng vermaschten Kommunikationsnetzen, welche einerseits auf der technischen Transportschicht und andererseits in der semantischen Beschreibung der Daten unterschiedlich kommunizieren. Des Weiteren ist die Kommunikation meist hierarchisch aufgebaut und folgt der Referenzarchitektur der Automatisierungspyramide (vgl. Abschnitt 3.1.4). In dieser Architektur besteht die Kommunikation meist aus statischen Verbindungen zwischen den einzelnen Ebenen, welche nur zu benachbarten Ebenen Daten übertragen können (Wollschlaeger et al. 2018).

Dem hohen Anspruch und Anforderungen an die Vernetzung muss durch adaptive und dynamische Konzepte begegnet werden, bei welchen der Informationsaustausch im Vordergrund steht. Folglich sollte die Kommunikation auf der semantischen Beschreibung der Daten in sog. Informationsmodellen aufbauen und sich von hierarchischen und statischen Strukturen lösen.

Vogel-Heuser et al. skizziert hierzu eine Referenzarchitektur auf Basis von Informationsmodellen. Abbildung 3.12 verdeutlicht hierbei die skizzierte Transition von Vogel-Heuser von der hierarchischen Automatisierungspyramide zu einer flachen Vernetzung basierend auf Informationsmodellen zwischen IT und OT. Voraussetzung ist, dass verschiedene Stakeholder aus Automatisierungstechnik und IT, interdisziplinär an der Entwicklung von technischen Kommunikationsstandards sowie Informationsmodellen maßgeblich beteiligt sind (Vogel-Heuser et al. 2008).

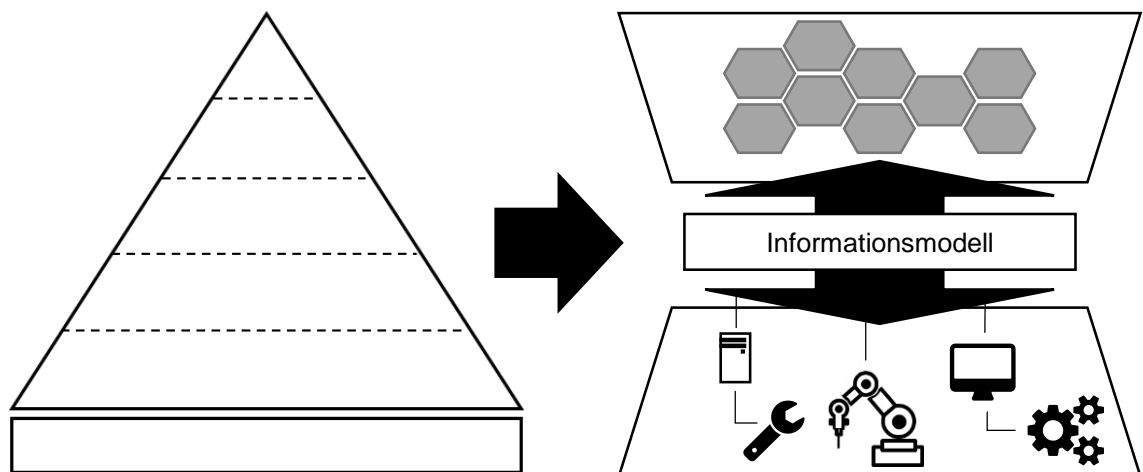


Abbildung 3.12: Wandel von hierarchischer Struktur zu Informationsmodellen

Im Vordergrund steht die Schicht der Informationsmodelle, welche eine Kommunikation von Prozess- bis Unternehmensebene ohne Rücksicht auf dazwischenliegende Ebenen ermöglichen. Informationsmodelle beschreiben dabei alle relevanten Daten für die Produktion in semantischer Form und mit gleichbleibenden Strukturen.

Unter Nutzung solcher Informationsmodelle stellt der VDI/VDE die These auf, dass die heute vorherrschende Struktur der Automatisierungspyramide zu einem dezentralen Netz aus Knoten verfällt, welches aus Services und Hardwarekomponenten besteht. Jeder Knoten kann als isoliertes funktionales Modul mit einem bestimmten Funktions- und Schnittstellenumfang betrachtet werden und die Teilmenge verschiedener Knoten bilden in

Summe ein Automatisierungssystem (sog. Cyber-Physical Production Systems (CPPS)), welches Aufgaben innerhalb der Wertschöpfungskette erfüllt. Vorgelagerte Prozesse wie bspw. das Engineering können auf das dezentrale Netz an Knoten zugreifen und beliebige neue Teilmengen orchestrieren, um den Produktionsprozess zu rekonfigurieren, optimieren oder ergänzen (VDI/VDE April 2013).

3.3.4 OPC UA als Kommunikationsstandard

Im Kontext von Industrie 4.0 sowie der einhergehenden Kommunikationsparadigmen erfordert es neue Kommunikationsprotokolle insbesondere für die Machine to Machine (M2M)-Kommunikation. Diese müssen den Anforderungen an Flexibilität, Sicherheit, und Datensemantik gerecht werden sowie hersteller- und plattformunabhängig sein (OPC Foundation a; Deiretsbacher et al. 2016).

Zur Realisierung von Applikationen und Use Cases nach Industrie 4.0 hat sich das Protokoll „Open Platforms Communication Unified Architecture“ (OPC UA) als Kommunikationsstandard für die Produktionstechnik durchgesetzt und wird von Kagermann et al. im Rahmen der „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ als Basistechnologie für die „Unterstützung der Wandlungsfähigkeit und zur Flexibilisierung im Anlagenbetrieb“ genannt (Kagermann et al. 2013).

In einem Vergleich der M2M-Kommunikationstechnologien MQTT, MTConnect OPC Classic und OPC UA von Klein et al. hebt sich OPC UA ebenfalls von den anderen Protokollen ab (vgl. Tabelle 3.1). Insbesondere der Schulterschluss aus hoher Anpassbarkeit mit Interoperabilität machen OPC UA zu einer flexiblen und vielseitig einsetzbaren Technologie in der Produktionstechnik. Während andere Protokolle zumeist für den Einsatz innerhalb einer Ebene der Automatisierungspyramide konzipiert sind, spielt der Inhalt der Daten für OPC UA keine Rolle und erlaubt den Einsatz der Technologie von der Prozess- bis zur Unternehmensebene (OPC Foundation b; Klein et al. 2016).

Kriterien	MQTT	MTCConnect	OPC Classic	OPC UA
Interoperabilität	-	+	-	+
Skalierbarkeit	-	-	-	+
Sicherheit	-	-	+	+
Transportfähigkeit	+	+	-	+
Modellierung	-	-	-	+
Plug-and-Produce-Tauglichkeit	+	+	+	+
Konformität	-	-	+	+
Bekanntheitsgrad	Facebook Messenger	Primär in den USA	In Europa hoch	Nachfolge von OPC, viele Piloten

Tabelle 3.1: Vergleich von Standards nach Klein et al. (Klein et al. 2016)

OPC UA zeichnet sich durch die Spezifikation der technischen Transportebene (hinsichtlich Skalierbarkeit und Sicherheit) und die semantische Beschreibung der Daten in sog. Informationsmodellen aus. Basierend auf Abbildung 3.13 werden im Folgenden die Aufgaben dieser beiden Ebenen beschrieben.

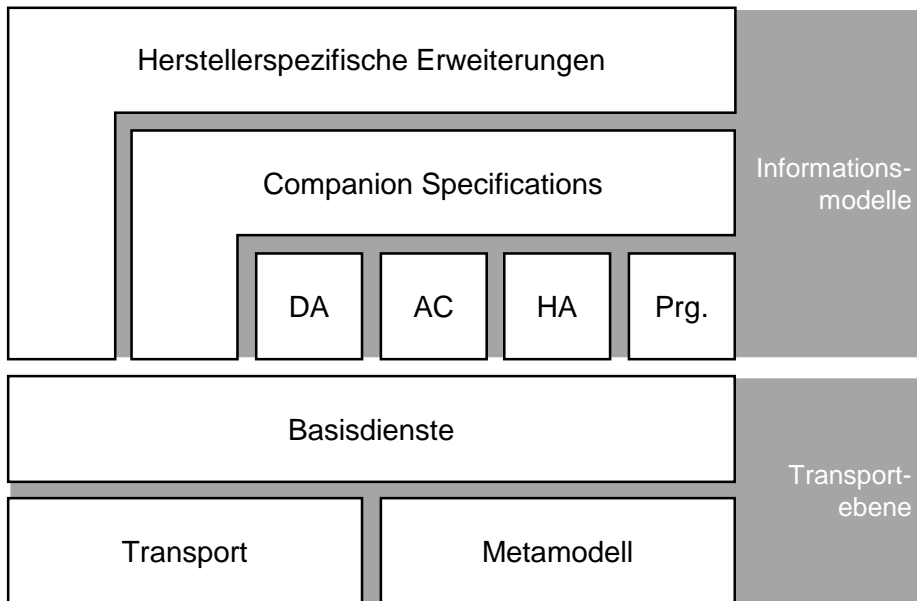


Abbildung 3.13: OPC UA Architektur im Schichtenmodell

3.3.4.1 Transportebene

Die Transportebene bei OPC UA ist in der DIN EN 62541 definiert und kann in die drei Elemente Transport, Metamodell und Basisdienste gegliedert werden (DIN EN 62541).

Der **Transport** beschreibt die technische Übertragung der Daten bzw. die Serialisierung/Deserialisierung in Protokolle oberhalb von OSI Schicht 4 (also oberhalb von TCP/IP). OPC UA spezifiziert ein performantes Protokoll mit Binärkodierung und ein auf Webservices basierendes Protokoll innerhalb des Anwendersystems des OSI Modells (ascolab GmbH). Mit Ausnahme der jungen Erweiterung der DIN EN 62541-14 (Part 14), findet die Übertragung ausschließlich auf TCP/IP Basis statt. DIN EN 62541-14 soll aufgrund des jungen Alters, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Das **Metamodell** beschreibt die generischen Modellierungsregeln und das Nodeset aus Basistypen, um ein Informationsmodell innerhalb von OPC UA für Clients zu beschreiben. Im Metamodell werden die möglichen Arten und Attribute von Nodes beschrieben sowie die möglichen Relationen zwischen Nodes festgelegt. Das Metamodell legt daher fest, welche Regeln einem Informationsmodell zugrunde liegen. Nodes können bspw. als Objekte oder Methoden modelliert werden und erhalten auf Basis des Metamodells unterschiedliche Attribute. Die Organisation der Informationen innerhalb eines Servers wird

nicht durch das Metamodell beschrieben, sondern ist je nach Realisierung zu lösen (OPC Foundation 2014).

Die **Basisdienste** beschreiben elementare Funktionen, welche innerhalb des Standards definiert sind. Neben der Beschreibung des verschlüsselten und unverschlüsselten Verbindungsaufbaus sind bspw. die Verwaltung der Sessions, die Überwachung von Nodes, die Ausführung von Methoden und das Adressraummanagement festgelegt.

Ein - für diese Arbeit besonders relevanter - Basisdienst ist die „Discovery“ (dt. Entdeckung). In großen OPC UA-Umgebungen können eine Vielzahl verschiedener Server mit mehrfachen Endpunkten existieren, welche unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich Kommunikation, Verschlüsselung und Sicherheit aufweisen. Des Weiteren können die Server in verschiedenen Netzen, Segmenten oder geographischen Standorten betrieben werden. Um Clients das Auffinden von Servern zu ermöglichen spezifiziert OPC UA den Discovery Basisdienst in Form eines Discovery Servers. Dieser ermöglicht Clients sich über verfügbare Server zu informieren, Informationen über die Konfiguration einzuholen und selbsttätig eine Verbindung aufzubauen. Bei OPC UA wird zwischen Local Discovery Server (innerhalb einer Maschine/eines Subnetzes kann ein Discovery Server durch verschiedene OPC UA-Server genutzt werden) und Global Discovery Server (Server hinter einer bekannten URL oder IP, welcher innerhalb des Netzwerks Informationen über OPC UA-Server bereitstellt) unterschieden. Diese beiden Discovery Server werden in Form verfügbarer Implementierungen in Kapitel 4 detailliert vorgestellt (OPC Foundation 07.02.18; Mahnke et al. 2009).

3.3.4.2 Informationsmodelle

Neben der Beschreibung der technischen Transportebenen zeichnet sich OPC UA besonders durch eine Vorgabe der Datensemantik in sog. Informationsmodellen aus. Diese sind herstellerübergreifend nutzbar, verfolgen einen objektorientierten Aufbau aus unterschiedlichen Typenmodellen und können auf Basis unterschiedlicher Anforderungen individuell erweitert werden. Abbildung 3.13 verdeutlicht den möglichen Aufbau von Informationsmodellen aufeinander. Als Basis werden durch die DIN EN 62541 die Informationsmodelle für den Data Access (DA), Alarms & Conditions (AC), Historical Data Access (HA) und Programs (Prg.) beschrieben.

Data Access beschreibt die Modellierung von Automatisierungsdaten in Variablen und dazugehörigen Datentypen. Diese können durch Metainformationen (Einheit, Qualität, etc.) ergänzt werden.

Alarms & Conditions definiert, wie Events auf Basis von Zuständen und mögliche Alarme gehandhabt werden. Einerseits werden die Zustandsüberwachung und anschließend ein möglicher Alarm und dessen Struktur definiert. Durch OPC UA-Clients kann auf diese Events zugegriffen werden, um Zustandsänderungen in Form der Alarme (z.B. Meldungstext, Quittierverhalten, etc.) zu erhalten.

Historical Access erlaubt den Zugriff auf historische Variablenwerte und Events, welche in der Vergangenheit liegen. Clients haben Zugriff auf Werte, welche bspw. innerhalb einer Datenbank oder einem Dateiarchiv durch den OPC UA-Server gespeichert wurden.

Mit Hilfe von **Programms** können komplexe Abläufe in Form eines Zustandsautomaten innerhalb des OPC UA-Servers abgebildet werden. Zustandsübergänge werden durch Meldungen an den Client ausgegeben (OPC Foundation 2014).

Diese vier Modelle können innerhalb von Objekten und Ordnern als Typen oder Instanzen beliebig kombiniert bereitgestellt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit eigene, komplexe Datentypen zu definieren. Durch die strenge Objektorientiertheit ist es einem Client möglich, Strukturen abzuleiten und Daten zu erfassen, ohne vollständige Kenntnis des zugrundeliegenden Informationsmodells zu haben. Dies stellt sich bei umfangreicheren Informationsmodellen in Form von **Companion Specifications** als sehr vorteilhaft heraus. Wird für eine konkrete Anwendung oder Branche ein möglichst vollständiges Informationsmodell entwickelt, welches Anwendungsszenarien über Hersteller hinweg abbilden kann, um die Interoperabilität zu fördern, spricht man von einer OPC UA-Companion Specification. Diese erfasst alle relevanten Daten, Methoden und Zustände des betrachteten Anwendungsfalls und stellt sie in verschiedenen Typen zur Verfügung. Bei Nutzung einer Companion Specification werden aus den Typen die erforderlichen Instanzen gebildet, welche mit erforderlichen und optionalen Parametern eindeutig spezifiziert sind. Diese Companion Specifications können jederzeit durch **herstellerspezifische Informationen** erweitert werden, um beispielsweise individuelle Informationen über OPC UA bereitzustellen (Lechler et al. 2013).

Seit der Veröffentlichung von OPC UA im Jahr 2006 konzentrierten sich die Aktivitäten und Produkte auf herstellerspezifische Informationsmodelle. Eine Interoperabilität war zumeist nur auf den Grundmechanismen des technischen Transports gewährleistet (Verbindungsaufbau, Basis Datenmodell, etc.). Der zunehmende Trend von Interoperabilität hinsichtlich Industrie 4.0-Ansätzen lässt die Zahl der Arbeitsgruppen zur Erarbeitung einer Companion Specification deutlich ansteigen und verdeutlicht die Wichtigkeit und Bedeutung einheitlicher Informationsmodelle zur standardisierten Beschreibung von Anwendungen (Kretschmer et al. 2018a).

3.4 Zusammenfassung und Defizite aus Stand der Technik und Wissenschaft

Zusammenfassend haben sich die Kommunikation in der IT und OT unabhängig voneinander entwickelt. Während die IT durch schnelle Innovationszyklen geprägt ist, wurden in der industriellen Kommunikation häufig Technologien aus der IT adaptiert unter Berücksichtigung der hinzukommenden Anforderungen wie bspw. nachhaltigen Einsatz und zeitdeterministisches Verhalten. Hinsichtlich der Topologien und unter Berücksichtigung des OSI Referenzmodells bestehen IT-Netzwerke aus heterogenen und vermaschten Strukturen. Die Kommunikationsprotokolle sind daher primär im Anwendersystem angesiedelt und bauen auf der Familie der Internetprotokolle (IP) auf. OT-Netzwerke sind den hierarchischen Ebenen der Automatisierungspyramide unterworfen und weisen – insbesondere in den prozessnahen Schichten – eine Netzwerktopologie mit homogenen und proprietären Protokollen auf. Innerhalb eines Unternehmens können jedoch bereits bei Anlagen unterschiedliche und nicht kompatible Technologien zum Einsatz kommen, welche zu einer sehr heterogen und zumeist proprietär aufgestellten OT-Architektur mit statischen Verbindungen führen.

Neben den vermaschten Netzwerken fordern neue Paradigmen, wie die serviceorientierte Architektur, eine einheitliche Grundlage im OSI Modell und die Beschränkung eigener Protokolle auf das Anwendersystem. Die Modularisierung nach SOA erfordert einen hohen Grad einheitlicher Vernetzung und Standardisierung in der Datenübertragung. Es handelt sich primär um ein Paradigma aus der IT-geprägten Softwaretechnik und wird den Anforderungen an die Produktionstechnik nicht gerecht. Innerhalb einer serviceori-

entierten Produktionstechnik ist es daher notwendig, einerseits eine flexible Datenübertragung und Vernetzung (nach dem Ansatz der losen Kopplung) zu ermöglichen und andererseits die Brücke zu klassischen IT-Systemen zu schlagen.

Losgelöst von der IT erfährt die Produktionstechnik getrieben durch die vierte industrielle Revolution aktuell einen Trend zu hochgradig vernetzten Systemen, Interoperabilität und dem bevorzugten Einsatz herstellerunabhängiger Standards. Die hierarchische Kommunikation auf Basis der Automatisierungspyramide soll aufgebrochen und durch eine Kommunikation basierend auf Informationsmodellen ersetzt werden. Die Motivation hierzu ist dem Trend zur softwarebasierten Produktion (software-defined) bzw. den Vorteilen durch Erhöhung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit geschuldet. Systeme innerhalb der Produktionstechnik sollen losgelöst von Ebenen bei Bedarf miteinander kommunizieren können und keinen Rekonfigurationsaufwand erfordern. Hierfür etablieren sich Machine to Machine-Protokolle, welche technisch und semantisch die Datenübertragung beschreiben sollen. Als bevorzugter Vertreter hat sich OPC UA in diesem Rahmen durchgesetzt, da es die technischen und semantischen Eigenschaften mitbringt und hersteller- sowie plattformunabhängig eingesetzt werden kann. Durch die Nutzung von Informationsmodellen wächst auch die Bedeutung der digitalen und virtuellen Abbildung realer Produktionsprozesse, um eine Verarbeitung der erzeugten Daten auf IT-Architekturen zu ermöglichen (Vogel-Heuser 2017).

Betrachtet man aktuelle Forschungsprojekte, welche sich mit diesen Themen befassen erkennt man eine deutliche Diskrepanz zwischen Trendentwicklungen in der IT und OT. Zu IT werden oft nur Softwarelösungen und Produktionsplanungssysteme aus der Automatisierungstechnik gezählt, welche unter den neuen Konzepten betrachtet und validiert werden (Silcher 2014). Die Adaption SOA-ähnlicher Paradigmen bis zur Prozessebene führt jedoch zu einer serviceorientierten Produktionstechnik, welche aus verschiedenen Modulen besteht, die beliebig miteinander verknüpft werden sollen (Schlechtendahl et al. 2014; Kretschmer et al. 2016). Gleichzeitig sollen bestehende Produktionsanlagen basierend auf der Auftragslage (z.B. Änderung der Stückzahl oder Variante) wandlungsfähig einsetzbar sein und innerhalb von Stunden umgebaut bzw. automatisch rekonfiguriert werden können (Verl et al. 2016).

Um diesen Anforderungen einer serviceorientierten Produktionstechnik gerecht zu werden und unter Berücksichtigung der Trendentwicklungen in IT und OT bedarf es einer Instanz zur Verwaltung bzw. Bekanntmachung der verfügbaren Produktionssysteme inkl. derer Fähigkeiten und Schnittstellen auf Basis von Informationsmodellen (vgl. Serviceverzeichnis aus SOA). Hierdurch sollen zu jedem Zeitpunkt verfügbare, bekannte und potentiell nutzbare Ressourcen im Produktionsumfeld abrufbar sein und ein Datenaustausch ermöglicht werden.

Nach heutigem Stand der Technik existieren mögliche Basistechnologien für die Kommunikation, jedoch keine Lösung, um der steigenden Vernetzung von Produktionsressourcen im Hinblick auf eine serviceorientierte Produktionstechnik gerecht zu werden. Verzeichnisdienste oder Services mit vergleichbarer Funktionalität, wie Sie in der Office-IT eingesetzt werden, haben im Produktionsumfeld bisher keine Anwendung gefunden.

3.5 Zielsetzung dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die steigende Vernetzung und die resultierende Anzahl vernetzter Geräte innerhalb eines Produktionsnetzwerks beherrschbar zu machen. Unter Berücksichtigung des Trends Industrie 4.0 und den resultierenden Anforderungen und Konzepten aus der Literatur soll eine Architektur für einen Verzeichnisdienst für die serviceorientierte Produktionstechnik entworfen werden. Dieser soll mit den dargelegten Entwicklungen aus dem Stand der Technik einhergehen und möglichen Umsetzungsempfehlungen folgen. Hierfür werden die folgenden Anforderungen an die Architektur für einen Verzeichnisdienst in der serviceorientierten Produktionstechnik gestellt:

- Die Verbindung zwischen CPS und dem Verzeichnisdienst soll mit einem offenen und standardisierten Kommunikationsprotokoll erfolgen
- Der Verzeichnisdienst soll Informationen über Fähigkeiten (Funktionen und Schnittstellen) von CPS bereitstellen können
- Die Informationen innerhalb des Verzeichnisdienstes sollen generisch erweiterbar sein
- Die Integration soll sowohl in IT- als auch OT-Umgebungen möglich sein
- Die Architektur soll nicht dem hierarchischem Ansatz der Automatisierungspyramide folgen

- Der Verzeichnisdienst soll sich am Serviceverzeichnis aus dem SOA-Dreieck orientieren

Abbildung 3.14 stellt die Einordnung des Verzeichnisdienstes in Produktions-IT, OT und Office-IT grafisch als Sechseck dar. Die hierarchischen Ebenen aus Produktions-IT und OT, welche jeweils Verbindungen in die Office-IT besitzen (vgl. linke Pyramide der Abbildung 3.14) sollen unabhängig voneinander Zugriff auf Informationen zu Fähigkeiten und Schnittstellen verfügbarer Systeme innerhalb des Verzeichnisdienstes besitzen. Die Orientierung am SOA-Dreieck ermöglicht einen Zugriff auf die Verzeichnisdienste aus allen drei Bereichen und folglich unabhängig von den ursprünglichen Ebenen der Automatisierungspyramide.

Im Stand der Technik wird das Verwachsen von Produktionstechnik und IT deutlich, weshalb sich die zu erarbeitende Architektur unmittelbar in bestehende Office-IT integrieren lassen soll.

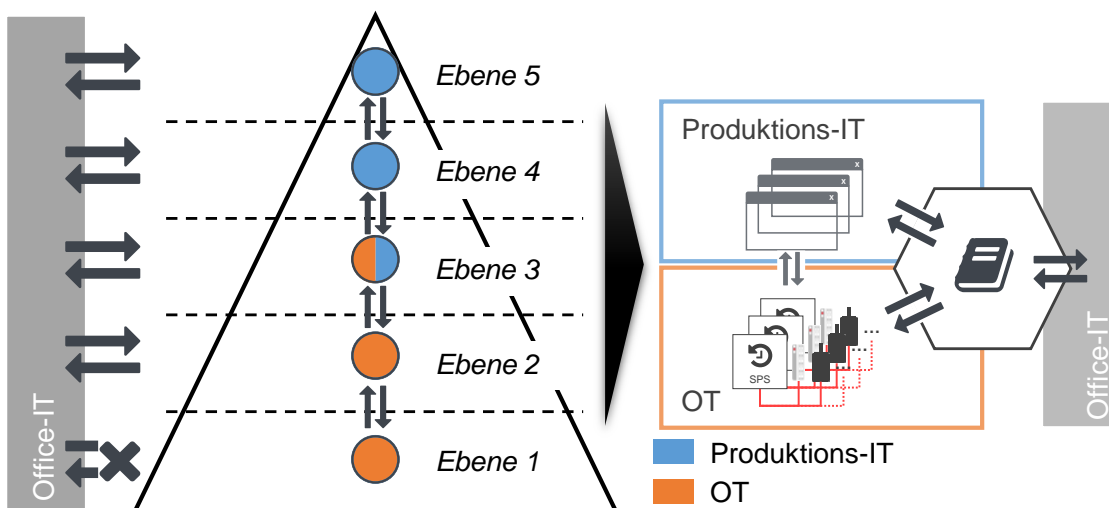


Abbildung 3.14: Hierarchielose Kommunikationsarchitektur zwischen IT und OT

Ein Verzeichnisdienst für serviceorientierte Produktionstechnik begegnet den Herausforderungen der steigenden Rekonfiguration, wachsender Kommunikationsteilnehmer und der notwendigen Orchestrierung wandlungsfähiger Produktionstechnik. Durch die Bereitstellung von Fähigkeiten auf Basis von Informationsmodellen können Produktionssysteme (bspw. ein MES) aus IT oder OT verfügbare Ressourcen abfragen, deren Kompatibilität prüfen und Produktionsabläufe adaptiv orchestrieren und planen.

Die Integration in bestehende Office-IT Strukturen führt zu einer effizienteren Ressourcennutzung und ermöglicht die Bündelung von Verantwortungen, da Verzeichnisdienste und die Verwaltung von Ressourcen (Mensch und Maschine) in der Office-IT seit Jahrzehnten bewährt sind. Die Integration von Systemen aus der Produktionstechnik kann zu einer verbesserten Verwaltung von Updates und Erhöhung der Angriffssicherheit (IT Security) führen.

Zur Realisierung der Anforderungen sind neben der Architektur die Schnittstellen zur Anbindung von Produktionssystemen und eine Lösung zur Integration in die Office-IT zu entwerfen. Abbildung 3.15 verdeutlicht, dass der Produktions-IT und OT eine Schnittstelle des Verzeichnisdienstes bereitgestellt wird. Für die Integration in die Office-IT wird eine Synchronisierungs-Strategie mit bestehenden Standards benötigt (vgl. rotes Rechteck in Abbildung 3.15).

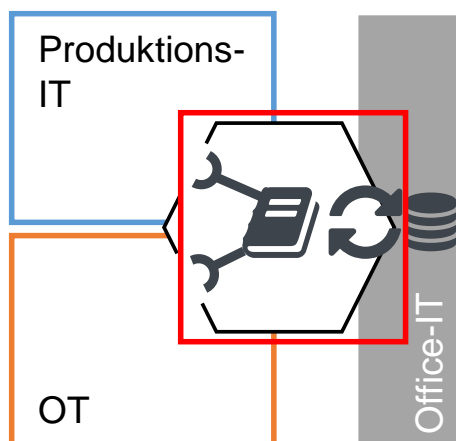


Abbildung 3.15: Fokus auf notwendige Schnittstellen eines Verzeichnisdienstes

Im Folgenden wird eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit und die notwendigen Kapitel zur Erfüllung der o.g. Zielsetzung gegeben:

- 1) Kapitel 4: Für eine mögliche Architektur eines Verzeichnisdienstes sollen bereits existierende Technologien und Lösungen erfasst und verglichen werden. Insbesondere durch das weite Spektrum an Verzeichnisdiensten aus der Office-IT, sollen verbreitete Technologien in Form von Standards und mögliche Lösungen als verfügbare Produkte betrachtet und verglichen werden. Neben der Erfassung einer aktuellen Übersicht ist die Definition der Vergleichsmerkmale sowie der Vergleich mit resultierender Entwurfsentscheidung Inhalt des Kapitels.

- 2) Kapitel 5: Auf Basis der Entscheidung des vorangegangenen Kapitels soll eine Architektur für einen Verzeichnisdienst für die serviceorientierte Produktionstechnik entworfen werden. Hierzu gilt es, die Softwarearchitektur unter Berücksichtigung des Standards aus der Entwurfsentscheidung zu erstellen. Im Anschluss soll ein Vorgehen für die Abbildung von Fähigkeiten und Schnittstellen innerhalb des Verzeichnisdienstes entwickelt werden.
- 3) Kapitel 6: Die entworfene Architektur des Verzeichnisdienstes soll in vorherrschende IT-Strukturen integrierbar sein. Kapitel 6 beschreibt die Lösung zur Kopplung des entworfenen Verzeichnisdienstes mit bestehenden Systemen, um redundante Verzeichnisdienste aus Office- und Produktions-IT zu vermeiden und Ressourcen beider Bereiche zu bündeln.
- 4) Kapitel 7: Der entworfene Verzeichnisdienst wird an einer Anlage für die wandlungsfähige Montagetechnik prototypisch realisiert und die Anwendung verdeutlicht. Die Nutzung des Verzeichnisdienstes und die Bekanntmachung der Fähigkeiten und Schnittstellen für Produktionsteilnehmer soll im Rahmen dieses Kapitels verdeutlicht werden.

4 Vergleich von Technologien und Lösungen für Verzeichnisdienste

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einer Technologierecherche zu Verzeichnisdiensten aus Produktions-IT und Office-IT. Verzeichnisdienste reduzieren den Administrationsaufwand für die Verwaltung von Benutzern, Gruppen, Rechten oder auch Zertifikaten innerhalb der Office-IT signifikant. Im Gegensatz zur Office-IT haben sich in der Produktions-IT ähnliche Technologien und Architekturen aufgrund der monolithischen Strukturen bisher kaum durchgesetzt. Dennoch zeigt eine Recherche, dass Technologien innerhalb der Produktions-IT existieren, welche den Aufgaben eines Verzeichnisdienstes gerecht werden können. Das M2M-Protokoll OPC UA enthält bspw. Teilspezifikationen zur lokalen und globalen Entdeckung (engl. Discovery) von Endpunkten und zur Verwaltung von Sicherheitszertifikaten (Kretschmer et al. 2015).

Des Weiteren stellen sog. Remote Procedure Calls (RPC) keine standardisierte Technologie dar, sind jedoch in beiden Domänen vertreten (gestrichelte Linie), um den Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen zu ermöglichen. Aufgrund des langjährigen Einsatzes von COM und DCOM werden diese beiden Lösungen ebenfalls als Technologien im Vergleich berücksichtigt.

Die Elemente der Recherche verfügbarer Technologien (als Standard veröffentlicht – in weißen Rechtecken dargestellt) und Lösungen (als Produkt verfügbar – in grauen Rechtecken dargestellt) sind als Übersicht in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Darstellung teilt die Technologien und Lösungen in die beiden Domänen Produktions-IT und Office-IT auf.

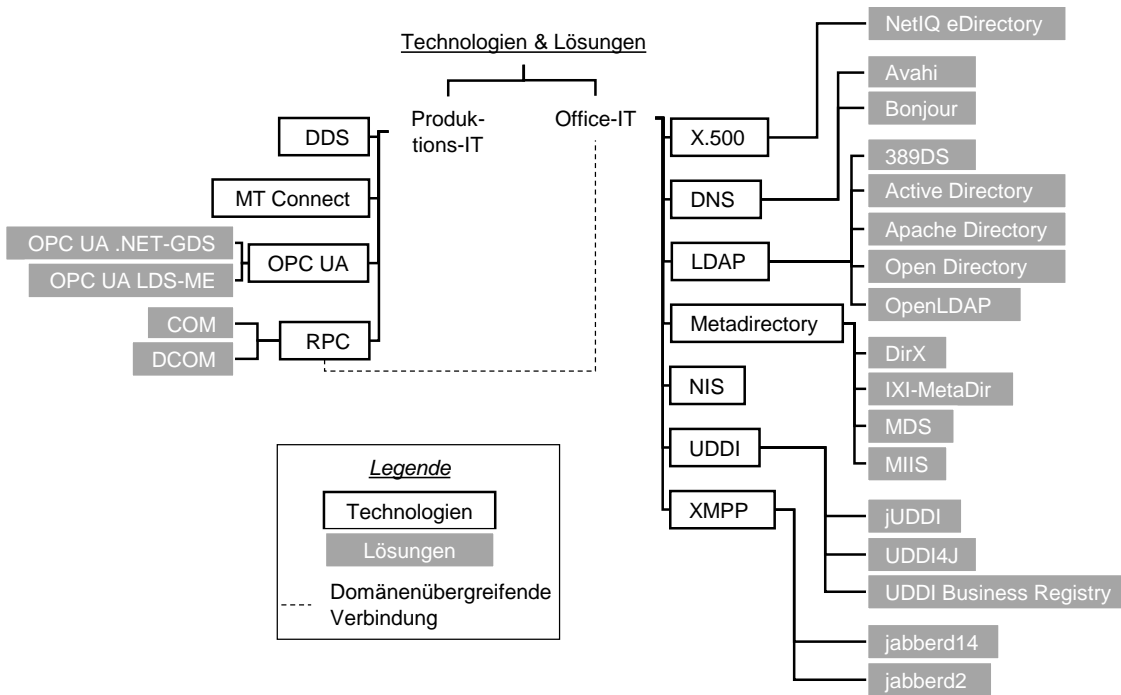


Abbildung 4.1: Übersicht von Technologien und Lösungen für Verzeichnisdienste

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die meistgenutzten Lösungen aus Office- und Produktions-IT im Detail vorgestellt, welche den Ansatz eines Verzeichnisdienstes verfolgen. Im Anschluss werden mögliche nutzbare Technologien in Form von Standards vorgestellt, welche für die Umsetzung eines Verzeichnisdienstes genutzt werden können. Zuletzt werden Vergleichsmerkmale definiert und ein Vergleich von Lösungen oder verfügbaren Implementierungen einer nutzbaren Technologie basierend auf den Vergleichsmerkmalen durchgeführt. Die Auswahl der vorgestellten Elemente basiert neben Literaturangaben auf der Anzahl erfasster Rechercheergebnisse, Breite der Referenzen zu einer Lösung und Aktualität der Informationen (Larisch 2000).

4.1 Lösungen für Verzeichnisdienste

4.1.1 Office-IT

4.1.1.1 Active Directory

Active Directory (AD) ist der Verzeichnisdienst, welcher von Microsoft für die Verwaltung, Organisation und Steuerung von Ressourcen innerhalb eines Netzwerks auf

Windows Server Betriebssystemen zur Verfügung steht. Das System besteht aus den vier Hauptkomponenten (Wikipedia 2019):

- **LDAP-Verzeichnis** für die Bereitstellung von Informationen zu Benutzern, Gruppen und weiteren Objekten, welche als Ressource verwaltet werden.
- **Kerberos-Protokoll** als ticketbasiertes Autorisierungssystem, welches den Zugriff auf Dienste auf Basis von zeitlich-begrenzten Tickets gewährt. Eine Passworteingabe ist nur einmal oder nach Ablauf des Tickets notwendig.
- **Common Internet File System (CIFS)** als Protokoll und Ablage für den Dateiaustausch innerhalb eines Netzwerks. Die Nutzung von CIFS wird über DNS vereinfacht.
- **Domain Name System (DNS)** als System für die Namensauflösung und die Bereitstellung von Service Resource Records (SRV) zur Auffindung bestimmter Dienste.

Im Rahmen dieser Arbeit soll in erster Linie das LDAP-Verzeichnis betrachtet werden, da die weiteren Komponenten in erster Linie innerhalb des Windows-Ökosystems für einen reibungslosen Ablauf und den vollen Funktionsumfang benötigt werden.

Das LDAP-Verzeichnis ist zentraler Bestandteil zur Bereitstellung von Informationen über Benutzer und deren Gruppenzugehörigkeiten. Weitere Objekte wie Computer, Drucker oder Netzwerkressourcen sowie Zertifikate können ebenfalls über das Verzeichnis angelegt und deren Parameter verwaltet und verteilt werden (Elsberger 2015). Der Aufbau des Verzeichnisses ist hierarchisch und alle Objekte werden logisch gruppiert, um eine Lokalisierung auf Basis des Namens zu vereinfachen.

Durch die Erfassung jedes Objekts als Ressource innerhalb des Verzeichnisses ist es allen weiteren Objekten möglich aufeinander zuzugreifen, Informationen über den Status und die Kompatibilität zu prüfen. Der technische Aufbau des Verzeichnisses orientiert sich bei AD dabei am Standard des Lightweight Directory Access Protocol (LDAP), welches in erster Linie das Protokoll zum Abruf der Daten aus dem Verzeichnis darstellt und die Struktur des Verzeichnisses maßgeblich vorgibt. Abbildung 4.2 verdeutlicht einen beispielhaften hierarchischen Aufbau und die logische Strukturierung von Ressourcen. Benutzer, Computer und Ressourcen können somit auf Basis der Unternehmensstruktur einer Abteilung zugewiesen werden. Im Beispiel sind Benutzer in Abteilungen strukturiert,

Computer und Ressourcen flach zugeordnet. Zugriffe auf gemeinsam genutzte Ressourcen können auf Basis der Struktur oder zusätzlicher Gruppen verwaltet werden.

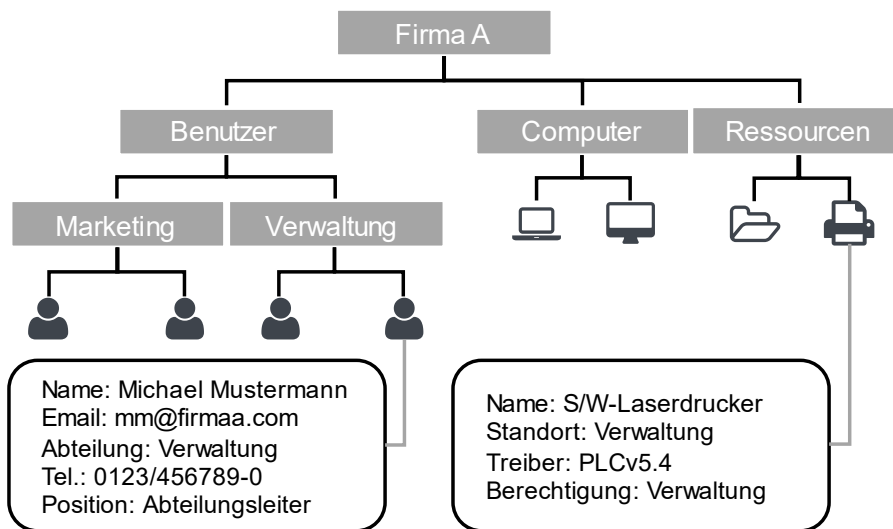


Abbildung 4.2: Beispielhafte Unternehmensstruktur im Active Directory

Der Betrieb eines entsprechenden Verzeichnisdienstes im eigenen Endgerät kann nur auf einem Server mit dem Betriebssystem Windows Server 2003 oder neuer stattfinden. AD ist hierbei als Programmfeature bereits enthalten. Neben der On-Premise-Lösung kann AD als Software-as-a-Service via Microsoft Azure bezogen werden. Beide Lösungen für ein unternehmensweites Verzeichnis können kombiniert und synchronisiert werden, um bspw. Ausfälle redundant abzusichern oder spontane Lastanstiege auszugleichen (Mathers et al. 2018; Microsoft Corp. 2019b).

Eine Unterstützung von AD auf Benutzerendgeräten ist auf einer Vielzahl von Betriebssystemen möglich. Windows-basierte Betriebssysteme haben von Microsoft bereits alle notwendigen Module enthalten, um ad hoc an ein AD angeschlossen zu werden (mit Ausnahme der Home-Versionen). Weitere Desktopbetriebssysteme (macOS oder Linux-basiert) enthalten zumeist eine AD-Unterstützung, welche ggf. nachträglich konfiguriert werden muss und nicht den vollen Funktionsumfang von AD unterstützt. Die Abbildung der Objekte innerhalb des Verzeichnisses ist jedoch über alle gängigen Betriebssysteme möglich.

Microsoft AD ist als Produkt beziehbar. Der Programmcode ist nicht öffentlich einsehbar (closed source) und nur auf Windows Servern installierbar. Andere Betriebssysteme werden lediglich auf der Clientseite unterstützt (Boddenberg 2016).

4.1.1.2 OpenLDAP

OpenLDAP ist eine Open Source Implementierung des LDAP-Standards und stellt einen Verzeichnisdienst auf allen gängigen PC-Betriebssystemen bereit. Im Vergleich mit Active Directory besteht es nicht aus verschiedenen Komponenten, sondern stellt lediglich ein LDAP-Verzeichnis zur Verfügung. Ursprünglich handelt es sich bei OpenLDAP um eine Protokollimplementierung, welche aus nicht OSI-konformen Netzwerken einen Zugriff auf X.500 Dienste ermöglichte. Dies führte zur ersten Standardisierung von LDAP als RFC1487 (Yeong et al. 1993; Steinkamp 2010). Diese Implementierung wurde weiterentwickelt zu einem eigenen Verzeichnisdienst, welcher heute als OpenLDAP bekannt ist. Durch die Historie wird deutlich, dass der Fokus auf der Bereitstellung eines Verzeichnisdienstes beruht. Die Verwaltung, Organisation und Bereitstellung von Benutzern, Computer und weiteren Ressourcen innerhalb eines Netzwerks steht im Vordergrund. OpenLDAP verfügt über die standardkonformen Funktionen zur sicheren Authentifizierung, des Integritäts- und Vertraulichkeitsschutzes sowie die Unterstützung verschiedener Replikationsstrategien für ausfallsichere Nutzung.

Ein Multi-Master-Setup ermöglicht bei OpenLDAP die Replikation des Verzeichnisses über verschiedene Standorte (Standort A und Standort B) hinweg. Somit stehen allen Netzwerkteilnehmern die gesamten Informationen des Verzeichnisses zur Verfügung (vgl. Abbildung 4.3). Auch im Falle eines Ausfalls kann diese Funktionen durch Rückfallsysteme ergänzt werden, welche im Fehlerfall aktiv werden (zwei an einem Standort).

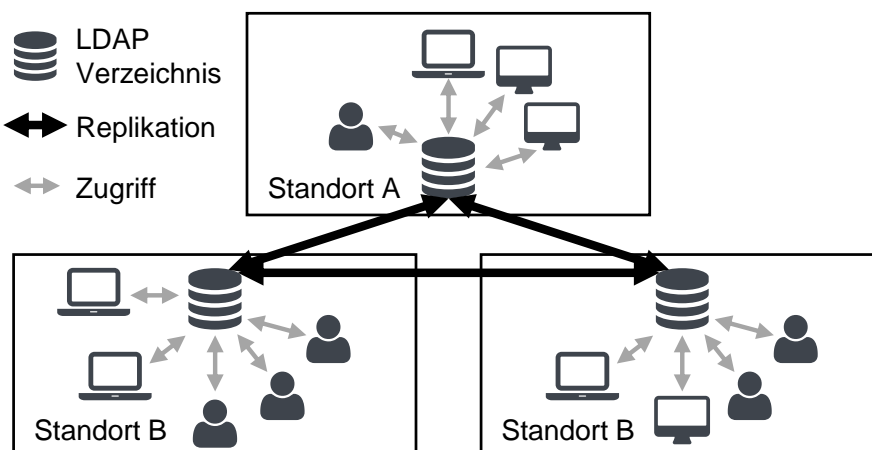


Abbildung 4.3: Multi-Master Replikation eines LDAP-Verzeichnisses

Da AD und OpenLDAP auf ein LDAP-Verzeichnis aufsetzen, können Objekte durch Attribute beschrieben werden. Für eine Kompatibilität zwischen diesen und allen Systemen, haben sich für die Beschreibung klassischer Unternehmensstrukturen Schemata durchgesetzt, welche alle notwendigen Attribute beinhalten. Sollten ergänzende Attribute notwendig sein, lassen sich in OpenLDAP beliebige Schemata ergänzen und im Verzeichnis bereitstellen, um bspw. unternehmensinterne Informationen bereitzustellen.

OpenLDAP ist mit allen LDAP-konformen Implementierungen und Clients nutzbar. Es eignet sich daher sehr für heterogene Umgebungen, welche durch eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme (Endgeräte, Applikationen, Webservices, etc.) dominiert werden und eine zentrale Stelle zur Verwaltung der Ressourcen benötigen. Eine Nutzung mit dem Windows-Ökosystem ist unter Bereitstellung weiterer Komponenten (DNS-Integration, SAMBA-Server, Kerberos) ebenfalls möglich.

OpenLDAP erfüllt als offene und herstellerunabhängige Implementierung die Funktion eines Verzeichnisdienstes. Für die komfortable Nutzung und Verwaltung großer Netzwerke und aller Ressourcen sind jedoch weitere Komponenten erforderlich, welche ähnliche Funktionen wie in der Lösung Active Directory übernehmen (Klünter et al. 2003; Howes et al. 2006).

4.1.2 Produktions-IT

Verglichen mit der Office-IT haben Verzeichnisdienste in der Produktions-IT bisher keinen Einzug erhalten. Durch die monolithischen Strukturen und das Betreiben von Anlagen als Inseln, bestand bis zu Trends wie Industrie 4.0 und Wandlungsfähigkeit in der Produktionstechnik kein Bedarf an einer zentralen Verwaltung von Ressourcen (vgl. 3.3). Dennoch spezifiziert das Kommunikationsprotokoll OPC UA einen Basisdienst für Discovery zur Erfassung von OPC UA-Geräten innerhalb eines Netzwerks. Für diesen Service existieren zwei Implementierungen: der OPC UA Local Discovery Server Multicast Extension (LDS-ME) und der Global Discovery Server (GDS) als .NET-Applikation. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

4.1.2.1 OPC UA LDS-ME

OPC UA beschreibt den Local Discovery Server als Server, welcher mit mindestens einem OPC UA Server auf dem identischen System läuft. Er enthält Informationen über alle verfügbaren OPC UA-Server innerhalb dieser Maschine und stellt diese Informationen Clients auch außerhalb des Systems bereit (Mahnke et al. 2009).

In der Implementierung des OPC UA LDS-ME wird das monolithische Vorgehen von Discovery eines Systems auf ein Netzwerk ausgeweitet. Informationen eines Local Discovery Services werden mit Hilfe von Multicast-Mechanismen (mDNS) innerhalb des gesamten Subnetzes allen Geräten verfügbar gemacht (Linten et al. 2013). Folglich erhalten alle im Subnetz mithörenden LDS-ME die Information über verfügbare Server. Abbildung 4.4 verdeutlicht die Funktionsweise des Local Discovery Servers mit Multicast Extension. Mit Hilfe der Methode „register“ können sich OPC UA Server an einem zentralen und bekannten LDS-ME innerhalb eines Subnetzes registrieren. Somit können die Installationen von LDS-ME an Maschinen mit OPC UA-Servern reduziert werden. OPC UA-Clients haben die Möglichkeit zwei OPC UA spezifizierte Methoden zur Auffindung von Servern zu nutzen:

- „findServers“ ermöglicht die direkte Anfrage an einem lokalen oder entfernten LDS-ME unter Eingabe der IP-Adresse. Ein OPC UA-Client erhält durch Ausführung dieser Methode alle OPC UA-Server, welchem dem angefragten LDS-ME bekannt sind (über „register“ oder über Multicast).
- „findServersOnNetwork“ ermöglicht die Abfrage eines lokalen LDS-ME, welcher via Multicast die Informationen anderer LDS-ME über verfügbare OPC UA-Server erhalten hat. Ein OPC UA-Client erhält durch Ausführung dieser Methode alle bekannten, über Multicast verbreiteten Serveradressen verfügbarer OPC UA-Server.

Die Methode „getEndpoints“ ermöglicht im Anschluss das Durchsuchen bekannter Server nach verfügbaren Endpunkten, welche Daten enthalten und über OPC UA bereitstellen.

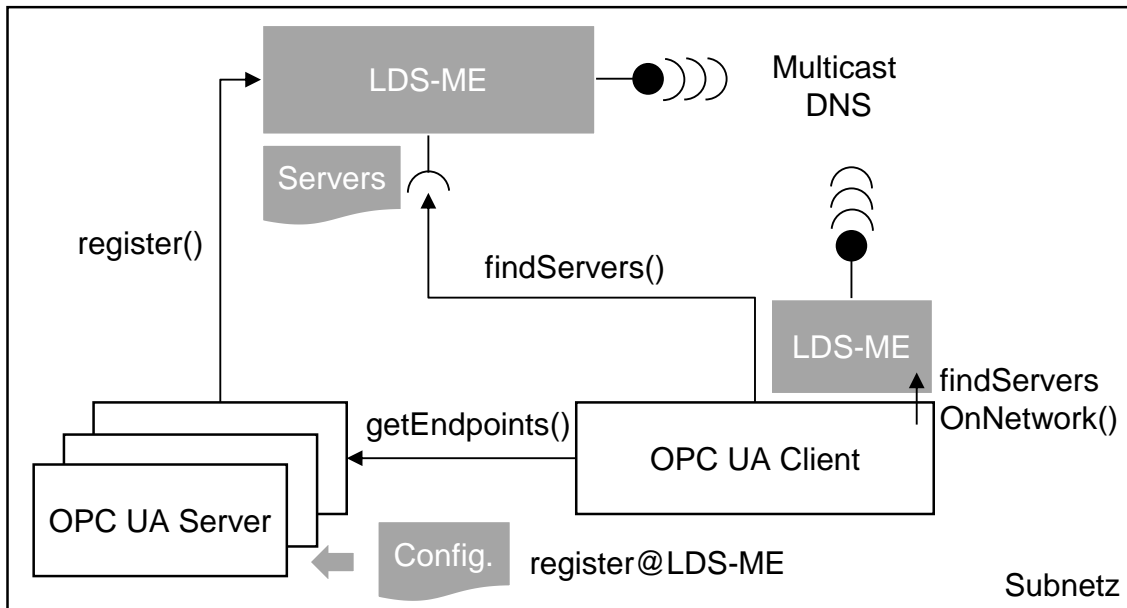


Abbildung 4.4: Funktionsweise der OPC UA LDS-ME

Die OPC Foundation hat die Implementierung des LDS-ME als offenes Projekt unter der Gnu General Public License Version 2 (GPLv2) veröffentlicht. Der Quellcode ist ebenfalls frei verfügbar und kann ggf. angepasst und erweitert werden, sofern im Rahmen der Lizenz möglich.

Das Projekt baut auf den aktuellen OPC UA Ansi C Stack auf und erfordert für die Nutzung der Multicast-Mechanismen weitere Bibliotheken (Windows: Bonjour Service, Linux: Avahi Daemon), welche ebenfalls offen zur Verfügung stehen. Folglich ist das Projekt auch bisher nur für diese Plattformen verfügbar (OPC Foundation 2016b).

4.1.2.2 OPC UA .NET-GDS

OPC UA beschreibt den Global Discovery Server als Server, welcher unter einer gut bekannten Adresse (URL oder einfache IP-Adresse) Informationen über existierende OPC UA-Server innerhalb eines Netzwerks bereitstellt. Er stellt die verfügbaren Discovery Endpunkte der Server an Clients zur Verfügung. Ein GDS kann einem LDS vorangestellt sein, um an diesen zu verweisen. Somit kann der Discovery-Prozess über ein großes Netzwerk verteilt werden. Des Weiteren können Global Discovery Server die Konfiguration sowie das Zertifikatsmanagement der registrierten OPC UA-Server verwalten und ermöglichen somit einen erweiterten Funktionsumfang im Vergleich mit dem LDS-ME. Eine

Anbindung an Verzeichnisdienste wie bspw. LDAP sind erwähnt, jedoch nicht weiter spezifiziert (OPC Foundation 07.02.18).

Der Fokus der OPC UA .NET-GDS, welcher von Microsoft unter der MIT License 1.00 veröffentlicht wurde, liegt auf der Realisierung sicherer (Security) Systeme auf Basis von OPC UA. Die Implementierung ermöglicht daher ein umfangreiches Zertifikatsmanagement, um den Austausch, die Erneuerung und den Widerruf von Zertifikaten zentral und mit Hilfe einer Zertifizierungsstelle zu realisieren. Ein manueller Austausch der Zertifikatsdateien inkl. die Aktivierung dieser direkt am OPC UA-Server entfällt somit (George 2017a).

Abbildung 4.5 verdeutlicht die Funktionsweise des Global Discovery Servers. Analog zum LDS-ME registrieren sich Server mit der Methode „register“. Diese kann ebenfalls von einem LDS-ME innerhalb eines Subnetzes aufgerufen werden, um alle bekannten OPC UA-Server innerhalb des Subnetzes am GDS zu registrieren. Dieser aktualisiert die Liste der Server regelmäßig mit Hilfe der Methode „findServersOnNetwork“. OPC UA-Clients können auf die Schnittstelle des GDS zugreifen und durch „queryServers“ die OPC UA-Server innerhalb des Netzwerkes erfragen. Das zentrale Konfigurations- und Zertifikatsmanagement innerhalb des GDS ermöglicht eine zentrale Administration und ebenfalls ein optionales Benutzermanagement innerhalb des GDS, um Clients einen sicheren und verschlüsselten Zugriff auf das OPC UA-Netzwerk zu gewähren (OPC Foundation 07.02.18; Mahnke et al. 2009).

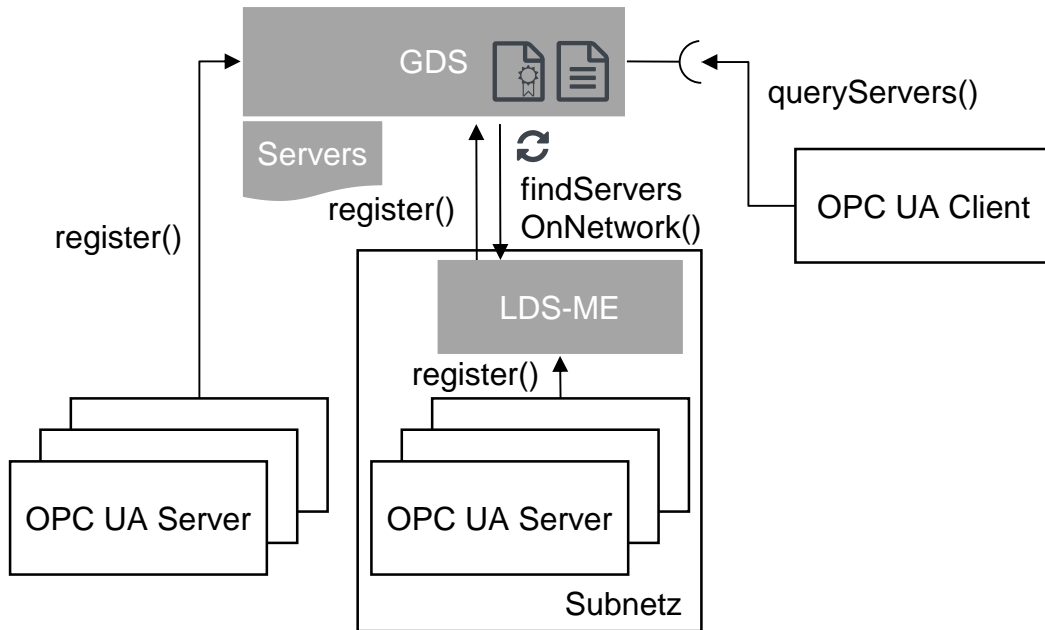


Abbildung 4.5: Funktionsweise des OPC UA Global Discovery Servers

In Kombination mit dem kommerziell vertriebenen GDS von Microsoft lässt sich die Funktionalität in der Cloud-Plattform Microsoft Azure abbilden und im Rahmen der Azure IoT Suite an weitere Dienste koppeln (bspw. an Azure AD zur Verwaltung von OPC UA-Servern innerhalb eines cloudbasierten Active Directory) (George 2017b).

4.2 Nutzbare Technologien für Verzeichnisdienste

Im Folgenden werden Technologien aus der Office- und Produktions-IT vorgestellt, welche weit verbreitet Anwendung finden, jedoch in erster Linie nicht als Verzeichnisdienst erkennbar sind oder eingesetzt werden. Diese können jedoch ggf. für einen Verzeichnisdienst in der serviceorientierten Produktionstechnik adaptiert werden.

4.2.1 Office-IT

4.2.1.1 Zeroconf – Multicast DNS

Zeroconf steht für „Zero Configuration Networking“ und beschreibt ein Verfahren zur selbstständigen Konfiguration von Netzwerken ohne Eingriff von Menschen oder zentralen Systemen wie DHCP- oder DNS-Server. Die Ziele der IETF Arbeitsgruppe bei der Entwicklung von Zeroconf waren (Guttman 2004):

- Schnittstellen Konfiguration (IP-Adresse, Netzwerk-Prefix, Gateway)
- Namensauflösung (Name zu IP-Adresse)
- Service Discovery
- Automatische Zuordnung von Multicast Adressen
- Hinreichende Sicherheit (Security), um Netzwerke durch Zeroconf nicht unsicherer zu machen

Trotz der beendeten Aktivitäten der Arbeitsgruppe ohne endgültiges Ergebnis wurden zwei RFC-Dokumente veröffentlicht, welche für diese Arbeit relevant sind:

- RFC6762 – Multicast DNS (Cheshire et al. 2013a)
Dieses Dokument spezifiziert Möglichkeiten eines DNS-ähnlichen Betriebs in lokalen Umgebungen unter Abwesenheit üblicher DNS-Server. Es ermöglicht eine Namensauflösung von Netzwerkgeräten untereinander, welche sich innerhalb eines Subnetzes befinden und Informationen auf Basis von Multicast-Paketen austauschen.
- RFC6763 – DNS-Based Service Discovery (Cheshire et al. 2013b)
Das Dokument spezifiziert, wie DNS Resource Records benannt und strukturiert sind, um die Service Discovery zu vereinfachen. Es ermöglicht Clients innerhalb einer Domain nach bestimmten Typen von Services zu suchen und eine Liste verfügbarer Endgeräte mit dem entsprechenden Service zu erhalten.

Insbesondere durch den Einsatz von Multicast-Mechanismen ist die Nutzung auf die Grenzen eines Subnetzwerks beschränkt. Eine Kommunikation der Informationen über Subnetzgrenzen hinweg ist ohne den Einsatz zusätzlicher Broadcast-Gateways nicht möglich. Aufgrund der resultierenden Gefahr von Broadcast-Stürmen (übermäßige Anzahl an Broadcast-Paketen, welche die Performanz innerhalb eines Netzwerks maßgeblich beeinflussen) in großen Netzwerkinfrastrukturen bedarf dieser Ansatz aufwendiger Überwachungsfunktionen (Klenzendorf 2003).

Die Technologie liegt ebenfalls der Realisierung des OPC UA LDS-ME zugrunde. Zur Nutzung der Basistechnologie stehen die Realisierung Avahi und Bonjour zur Verfügung, welche im Vergleich zu anderen Realisierungen eine Standardimplementierung beinhalten (Apple Inc; Poettering et al. 2020).

4.2.1.2 LDAP

Das Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) ist ein weitverbreitetes Protokoll für die Realisierung vieler Verzeichnisdienste in der IT und basiert auf dem Directory Access Protocol (DAP), welches dem Zugriff auf X.500 Verzeichnisdienste diente und einen vollständigen OSI-Stack erforderte. Das 1993 entwickelte LDAP hingegen setzt unmittelbar auf TCP/IP (OSI Schicht 4) und spezifiziert lediglich das Anwendersystem. Folglich ist der Einsatz maßgeblich vereinfacht, spezifiziert jedoch nicht die persistente Speicherung der serverseitigen Daten, sondern lediglich den Zugriff (Zeilenga 2006). Über eine LDAP-konforme Schnittstelle werden jedoch Replikationskonzepte wie das Spiegeln oder das Verteilen von Verzeichnissen, unabhängig von der darunterliegenden Datenbank, unterstützt (Biswas et al. 2005).

Ein über LDAP bereitgestellter Verzeichnisdienst speichert Objekte in einer Baumstruktur ab. Jedes Verzeichnis besitzt ein Wurzelobjekt (Dreieck in Abbildung 4.6) ohne Elternobjekt und ist somit als oberster Knoten des Baums definiert (Ausnahme: Subdomains, welche ein eigenes Verzeichnis darstellen und mit einer Referenz zu einem anderen Wurzelobjekt versehen werden können). Jeder weitere Knoten ist mit einem Elternobjekt verbunden und es existieren keine Einträge ohne Elternknoten oder ein zweites Wurzelobjekt. Einträge des Verzeichnisses können über LDAP gelesen, geändert oder gesucht werden und sind über einen eindeutigen sog. Distinguished Name (DN) identifizierbar. Dieser setzt sich aus einem Attributnamen, dem Wert des Attributs sowie dem DN des Elternknoten zusammen. Ein DN verdeutlicht somit die hierarchische Lokalisierung innerhalb eines Verzeichnisses. Der DN der Benutzergruppe „Profss“ aus Abbildung 4.6 lautet somit: „DC=uni-stuttgart,DC=de,OU=Fak-07,OU=ISW,CN=Profss“.

Ein LDAP-basierter Verzeichnisdienst unterscheidet sich von anderen Datenbanksystemen durch eine Optimierung der Daten auf Lese- und Suchzugriffe. Schreibzugriffe hingegen resultieren in erhöhtem Rechenaufwand.

Abbildung 4.6 zeigt den Aufbau eines LDAP-Verzeichnisses am Beispiel der Universität Stuttgart. Das Wurzelobjekt stellt die Domain „uni-stuttgart.de“ dar, welche in ihre Domain-Komponenten (eng. domain component, DC) zerlegt wird. Darunter liegen organisatorische Objekte (eng. organizational units, OU), welche den Aufbau der Universität in

Fakultäten abbilden. Parallel wurde eine Aufteilung der Studenten in eine Subdomain (DC=stud) vorgenommen, welche separat verwaltet werden kann.

Auf Ebene der Fakultäten wird zusätzlich ein allgemeiner Name (eng. common name, CN) bereitgestellt, welcher als vordefinierter Ordner die Objekte aller Benutzer (ebenfalls mit CN) enthält.

OU-Objekte können nun beliebig kombiniert werden und mit CN-Objekten gefüllt werden. Diese können auf Basis unterschiedlicher Vorlagen (sog. Schemata) mit Attributen gefüllt werden, um bspw. den Zweck eines Computerobjekts, einer Benutzergruppe oder anderen Ressourcen zu erfüllen (Howes et al. 2006).

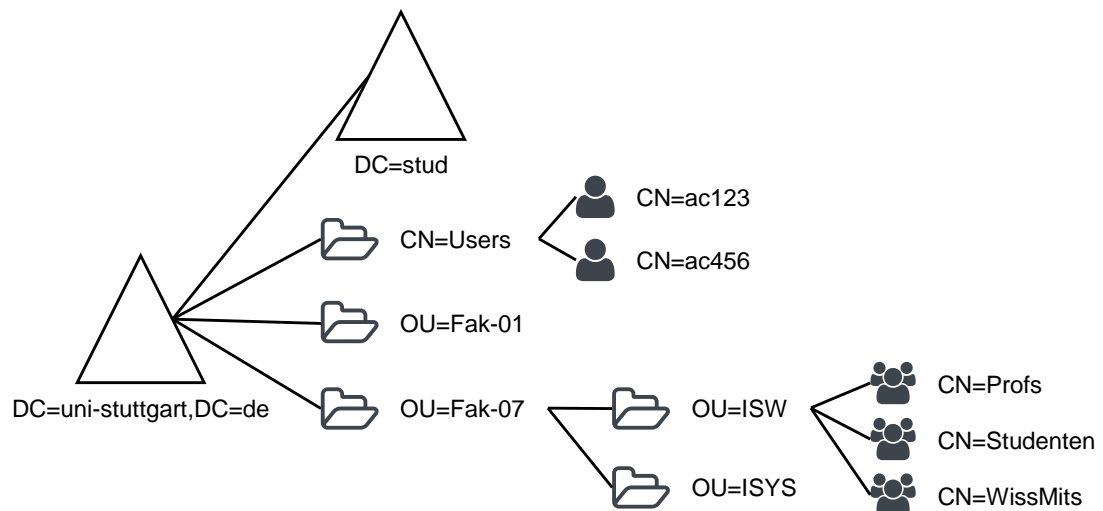


Abbildung 4.6: Aufbau eines LDAP-Verzeichnisses am Beispiel der Uni Stuttgart

Diese Schemata sind innerhalb des Verzeichnisservers konfiguriert und geben u.a. auch die Regeln zur Verschachtelung von Objekten vor. Zur Realisierung weiterer Objekte oder Ordner kann das LDAP-Verzeichnis um eigene Schemata in Form von Klassen und Attributen ergänzt werden. LDAP in Version 3 spezifiziert darüber hinaus eine Schema Discovery, welche es Clients ermöglicht das Verzeichnis nach unterstützten Schemata ähnlich eines LDAP-Query zu durchsuchen (Klünter et al. 2003).

Ergänzend ist das LDAP Data Interchange Format (LDIF) zu erwähnen. Es ermöglicht den standardisierten Austausch von Daten zwischen verschiedenen LDAP-Implementierungen und ermöglicht die Beschreibung von LDAP-Operationen bspw. um ein Objekt hinzuzufügen oder zu ändern (Good 2000).

4.2.1.3 UDDI

Universal Description, Discovery and Integration (UDDI, dt. Universelle Beschreibung, Entdeckung und Integration) ist ein Standard für die Registrierung von Webservice Anbietern, um deren Webservices verfügbar zu machen (Tsalgatidou et al. 2002). Es dient dem SOA Entwurfsprinzip der Servicewiederverwendbarkeit und stellt einen einzigen und bekannten Endpunkt zur Verfügung, welcher nach Services durchsucht werden kann und detaillierte Informationen über diese Services aufzeigt.

Durch die Nutzung der Web Service Description Language (WSDL, dt. Webservice Beschreibungssprache) lassen sich Servicebeschreibungen jederzeit individuell auf einem UDDI-Verzeichnis bekannt machen. Somit stehen Service- und Schnittstellenbeschreibung allen Nutzern des Verzeichnisses jederzeit zur Verfügung.

UDDI ist durch die Entwicklung des Internets (Web2.0-Trend) sowie verschiedene Softwareparadigmen (bspw. SOA) eine relativ junge Technologie und daher zumeist nur in neuen Implementierungen berücksichtigt. Trotz der offenen Nutzung durch bestehende Applikation muss die Möglichkeit der Nutzung in der Produktionstechnik vorerst geschaffen werden.

In Anwendungsszenarien zu UDDI steht trotz des Fokus auf Webservices die globale Nutzung im Vordergrund. So sollen bspw. öffentliche UDDI-Verzeichnisdienste der Unternehmen IBM, Microsoft, NTT-Communications und SAP eine globale Nutzung von Diensten ermöglichen und die Beschreibungen verfügbarer und erreichbarer Services austauschen. Dies kann mit einem Marktplatz verglichen werden, auf welchem Angebote veröffentlicht und in Abhängigkeit der Nachfrage gesucht und genutzt werden können (vgl. Abbildung 4.7) (Weerawarana 2008).

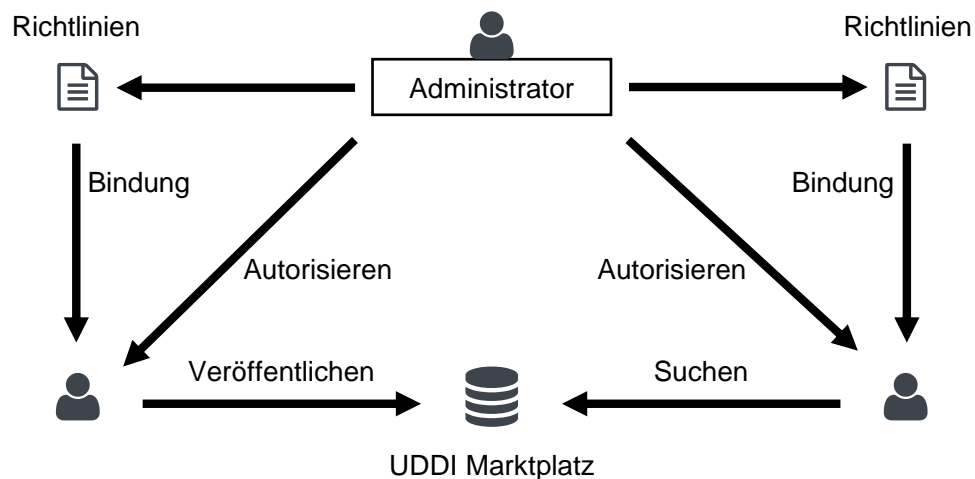


Abbildung 4.7: Schema eines UDDI-Marktplatzkonzeptes

Der Marktplatz wird durch den Administrator mit Hilfe von Richtlinien und Autorisierungen verwaltet, um Nutzern (Mensch oder Service) das Veröffentlichen und Suchen unter Bindung an die vorgegebenen Richtlinien zu ermöglichen. UDDI erweist sich damit als Technologie für einen Verzeichnisdienst in Service-orientierten Architekturen. Nach Melzer et al. ist es von einer großflächigen Nutzung jedoch noch weit entfernt und dient heute in erster Linie der Realisierung geschlossener SOA-basierter Konzepte (Melzer et al. 2007; Wu et al. 2008).

Durch die Abschaltung der globalen UDDI Business Registries von IBM, Microsoft und SAP Ende 2005, wird UDDI nicht mehr als maßgebliche Technologie für einen Verzeichnisdienst von SOA gesehen. Im Rahmen des Vergleichs dieser Arbeit ist die Technologie dennoch zu nennen, wird jedoch aufgrund des jungen Alters und bereits absehbaren fallenden Marktanteils nicht weiter im Vergleich berücksichtigt (Linthicum 2005).

4.2.1.4 XMPP

Das „Extensible Messaging and Presence Protocol“ (XMPP, dt. erweitertes Nachrichten- und Anwesenheitsprotokoll) ist eine Sammlung offener Technologien für Direktnachrichten, Anwesenheitsstatus, Mehrbenutzer-Chats, Audio- und Videoanrufe, Kollaborationen und weitere Kommunikationsmöglichkeiten (der Kinderen et al. 2016). Es ist in den RFC6120ff. spezifiziert (Saint-Andre 2011). Es wird als Technologie für die Realisierung von Instant Messaging Diensten in den Plattformen vieler großer Internetunternehmen

eingesetzt und von diesen maßgeblich weiterentwickelt (bspw. Google, Facebook, AOL, etc.) (Egan 2005). Die Übertragung der Informationen basiert hierbei maßgeblich auf XML Dateien, welche ein sehr generisches Datenformat und folglich eine einfache Erweiterung um zusätzliche oder proprietäre Funktionen ermöglicht.

Durch die historische Entwicklung von XMPP steht in diesem Zusammenhang auch oft der Begriff „Jabber“, welche die ursprüngliche Bezeichnung darstellt, im Raum. Trotz der hohen Verbreitung und des zahlreichen Einsatzes zählt es als eines der am wenigsten beachteten Protokolle im Internet. Die Architektur von XMPP-Netzwerken ähnelt der Struktur eines E-Mailnetzwerks mit verschiedenen Servern, welche die Nachrichten an den endgültigen Empfänger weiterleiten ohne Sender und Empfänger mit einer Direktverbindung kommunizieren zu lassen. Das Protokoll ist demnach stark dezentral orientiert. Des Weiteren zeichnet es sich durch einen hohen Grad an Interoperabilität durch die Realisierung sog. „Transports“ aus. Diese ermöglichen eine Kommunikation in unterstützte, proprietäre Dienste und über die Grenzen von XMPP hinaus (bspw. in das ICQ- oder MSN-Netzwerk) (Fischer et al. 2010).

XMPP ist kein Protokoll für Verzeichnisdienste, weist jedoch Eigenschaften für Status, Nachrichtenübermittlung und eine generische Erweiterbarkeit aus. Im Rahmen dieses Vergleichs wird es daher als nutzbare Technologie in Betracht gezogen und im Vergleich mit der frei verfügbaren Implementierung jabberd2 eines XMPP-Servers aufgeführt.

4.2.1.5 Weitere Technologien

Die Technologien X.500, Metadirectory und NIS aus der Informationstechnik wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht beleuchtet, da sich deren Aktualität und Verbreitung in bestehenden IT-Infrastrukturen als nicht ausreichend dargestellt hat. Auf Basis der Recherche zeigte sich lediglich ein geringer Einsatz in historisch gewachsenen Infrastrukturen, welche kurz- bis mittelfristig auf andere De-facto-Standards migrieren werden.

4.2.2 Produktions-IT

4.2.2.1 OPC UA

OPC UA als M2M-Kommunikationsprotokoll mit einer weiten Verbreitung und Kompatibilität zu einer Vielzahl von Geräten im Produktionsumfeld, stellt ebenfalls eine nutzbare Technologie als Verzeichnisdienst dar. Neben der technischen Transportebene ist dabei auch bereits die Semantik der Daten definiert und kann mit Hilfe von Companion Specifications als globaler Standard genutzt werden.

Die Technologie wurde im Rahmen von Kapitel 3.3 bereits ausführlich vorgestellt.

4.2.2.2 Weitere Technologien

Neben OPC UA stehen in der Produktionstechnik weitere Technologien zur Verfügung. Neben der großen Akzeptanz im Kontext von Industrie 4.0 hat sich OPC UA gegenüber diesen Technologien durchgesetzt. Im Folgenden sind ergänzende Faktoren genannt, welche diese Technologien für die Nutzung als Verzeichnisdienst ungeeignet machen (Knoll 2016):

- MTConnect ist ein offener Standard für die Erfassung von Daten aus Werkzeugmaschinen. Die Datenübertragung erfolgt ausschließlich unidirektional und lässt keine Schreibzugriffe zu (Jasperneite et al. 2015).
- DDS (Data Distribution Service) zeichnet sich durch geringe Latenzzeiten, hohen Datendurchsatz und einfache Skalierbarkeit aus. Diese Vorteile resultieren aus der Publisher-Subscriber-Architektur, welche jedoch keine semantische Beschreibung der Daten ermöglicht und keinen SOA-Ansatz verfolgt (Drolshagen 2015).
- OPC classic ist der Vorgänger von OPC UA und basiert auf dem objektorientierten RPC-System COM/DCOM. Da dieses von Microsoft entwickelt wurde, ist eine Nutzung von OPC classic an das Windows Ökosystem gebunden und kann nur auf Geräten mit Windows Betriebssystem ausgeführt werden (Hunkar 2014).

4.2.3 Remote Procedure Calls – COM & DCOM

Remote Procedure Calls (RPC, dt. Aufruf einer entfernten Prozedur) ist einer der grundlegenden Kommunikationsmechanismen der Client/Server-Architektur in verteilten Systemen. Nach Nelson et al. sind RPCs die synchrone Übergabe des Kontrollflusses zwischen zwei Prozessen. Der Aufruf erfolgt auf Ebene der Programmiersprache und ist mit Eingabe- und Ausgabeparametern für den Aufruf definiert (Birrell et al. 1983). RPCs ermöglichen folglich die Kommunikation in verteilten Systemen in Form von Methodenaufrufen ähnlich der Aufrufe innerhalb einer monolithischen Programmstruktur (Schill et al. 2012).

Microsoft hat mit dem Component Object Model (COM) eine Schnittstelle innerhalb von Windows-Betriebssystemen zur Verfügung gestellt, welche die Interprozesskommunikation und folglich den Aufruf von Methoden zwischen unterschiedlichen Programmen auf einem System ermöglicht. Durch die Erweiterung zum Distributed Component Object Model (DCOM) wurde die Kommunikation um den Aufruf auf unterschiedlichen Systemen erweitert (Microsoft Corp. 2017b).

In der Automatisierungstechnik hat sich diese Technologie in den vergangenen Jahren an verschiedenen Stellen durchgesetzt. OLE for Process Control (OPC bzw. OPC classic) ist eine Implementierung, welche auf diese Technologie aufbaut (Mahnke et al. 2009).

Neben der Beschränkung auf das Windows-Ökosystem gestaltet sich die Konfiguration von verteilten Systemen auf Basis von COM/DCOM als komplex, da bspw. Firewallkonfigurationen keiner standardisierten Konvention folgen, Autorisierungskonzepte stark in Abhängigkeit der Betriebssystemkonfiguration erstellt werden müssen und durch Aktualisierungen kein robuster Einsatz gewährleistet werden kann (Wang et al. 1997).

Aufgrund der starken Nutzung in der Automatisierungstechnik, wird diese Technologie in den Vergleich aufgenommen, gleichwohl sie für einen Einsatz in zukünftigen Lösungen für die Produktionstechnik ungeeignet ist.

4.3 Vergleichsmerkmale

Für einen Vergleich der Lösungen und Technologien werden im Folgenden möglichst unabhängige Vergleichsmerkmale aufgestellt und beschrieben. Die Merkmale sollen isoliert betrachtet werden können, um eine objektive Perspektive auf jedes zu vergleichende Element (Vergleichselemente) zu erhalten und ein neutrales Ergebnis zu erzielen.

Jedes Merkmal kann mit 1 (schlecht) bis 10 (gut) Punkten bewertet werden. Zusätzlich enthalten die Vergleichsmerkmale unterschiedliche Gewichtungen, da sie für den Vergleich im Rahmen dieser Arbeit eine gesonderte Bedeutung haben. Diese Gewichtung ist in den folgenden Beschreibungen jedes Merkmals enthalten.

4.3.1 Verbreitung

Die Verbreitung von Produkten und Technologien soll in erster Linie auf Basis von Statistiken festgestellt werden. Bei Open Source Produkten sind jedoch im Regelfall keine Statistiken (Ausnahme: Anzahl von Downloads, welches jedoch keine repräsentative Aussage über die Verbreitung, lediglich über das öffentliche Interesse ist) verfügbar und in Statistiken von Closed Source Produkten werden zumeist von Herstellern aus Wettbewerbsgründen keine Einblicke gewährt. Eine Bewertung wird daher auf Basis der Nutzungszahlen von Abhängigkeiten, Ökosystemen oder zugrundeliegenden Plattformen geschätzt (bspw. die Verbreitung des Windows-Betriebssystems als Indiz für die Verbreitung von Active Directory).

Das Vergleichsmerkmal Verbreitung wird im Vergleich mit dem Faktor zwei gewichtet, da eine hohe Verbreitung Rückschlüsse auf eine hohe Popularität zulässt. Implizit lässt sich daraus eine hohe Kompatibilität mit anderen Produkten und Applikationen ableiten.

4.3.2 Aktualität

Die Aktualität eines Vergleichselements wird am Erscheinungsdatum des letzten Softwareupdates gemessen. Das Vergleichselement mit dem aktuellsten Softwareupdate erhält zehn Punkte, das Element mit dem ältesten erhält einen Punkt.

Für Open Source Produkte wurde auf den Projektwebsites oder Quellcode-Repositories das Datum des letzten „stable“ Releases (sofern vorhanden, sonst die letzte Quellcodeänderung des „master“-Branches) bewertet. Bei Closed Source Produkten war das Datum des letzten Updates auf der Produktwebsite (sofern vorhanden) ausschlaggebend. Für Produkte mit einer festen Bindung an Betriebssysteme wurden die Support-Websites des Betriebssystems als Quelle genutzt und nach Änderungen hinsichtlich des Vergleichselements durchsucht.

Das Vergleichsmerkmal Aktualität wird im Vergleich mit dem Faktor eins gewichtet, da im Rahmen des Vergleichs u.a. Neuimplementierungen und Implementierungen von Standards betrachtet werden. Letztere erhalten meist nur Updates beim Bekanntwerden von Sicherheitslücken oder einer Anpassung des Standards selbst. Neuimplementierungen hingegen erhalten insbesondere zu Beginn eine hohe Anzahl an Updates. Für diesen Vergleich wird auf eine multiplizierte Gewichtung daher verzichtet.

4.3.3 Entwicklungsreife (Reife)

Die Entwicklungsreife wird an der Umsetzung von Standards festgemacht, auf welchen ein Vergleichselement ggf. basiert. Als Basis für die eingesetzten Standards dienen wiederum die Produktwebsites. Mit Hilfe von Stichproben wurden – sofern möglich – gewünschte Funktionen des Standards und realisierte Funktionen des Vergleichselements ermittelt. Werden zwei ähnliche Vergleichselemente betrachtet mit unterschiedlichen Angaben zu eingesetzten Standards, jedoch einer vollständigen Kompatibilität zueinander, werden alle genannten Standards für beide Vergleichselemente angenommen. Dies ist notwendig, da nicht immer ein umgesetzter Standard genannt wird.

Das Vergleichsmerkmal Reife wird im Vergleich mit dem Faktor zwei gewichtet, da steigende Reife notwendige Änderungen an einer Technologie minimiert und zeitgleich die Interoperabilität fördert. Das Erschließen neuer Einsatzgebiete wird somit ebenfalls erleichtert, da keine häufigen Anpassungen notwendig sind, welche diesen Prozess verlangsamten könnten.

4.3.4 Quellcodeverfügbarkeit (Quellcode)

Die Quellcodeverfügbarkeit kann streng in Closed Source (entspricht einem Punkt) und Open Source (entspricht zehn Punkten) geteilt werden. Da durch unterschiedliche Open Source Lizenzen die Nutzung und mögliche Änderungen untersagt oder eingeschränkt werden kann, muss die Lizenz detailliert bewertet werden. Folgende Freiheiten werden bei den Open Source Lizenzen betrachtet und erhalten mit steigender Freiheit eine höhere Wertung:

- Erlaubter Einsatz (bspw. kommerzielle Nutzung)
- Veränderung des Quellcodes (bspw. eigene Anpassungen)
- Weiterverbreitung des Quellcodes (bspw. Weiterverkauf eigener Anpassungen)

Ist keine Lizenz genannt, die Technologie jedoch frei zugänglich, wird das Vergleichselement analog zu einem Closed Source Produkt bewertet, da spätere Ansprüche durch den Urheber gestellt werden können.

Der Quellcode wird im Vergleich mit dem Faktor drei gewichtet, da sich Open Source Projekte häufig durch hohe Softwarequalität und Zuverlässigkeit, geringe Kosten, höhere Sicherheit und Unabhängigkeit von Partnern vorteilhaft auszeichnen (Gould; Balter 2015). Des Weiteren lassen sich notwendige eigene Anpassungen und Anforderungen an eine Lösung einfacher realisieren, was im Vordergrund dieses Vergleichs steht.

4.3.5 Unterstützte Betriebssysteme (Kompatibilität)

Die unterstützten Betriebssysteme werden auf Basis der drei Betriebssysteme mit dem höchsten Marktanteil verglichen. Im Januar 2019 hatten folgende drei Betriebssysteme den höchsten Marktanteil (StatCounter 2019):

- Windows (Marktanteil: 75,47%)
- Mac OS X bzw. macOS (Marktanteil: 12,33%)
- Linux (Marktanteil: 1,61%)

Windows und macOS halten insbesondere durch die Anzahl an Endgeräten für die unmittelbare Benutzerinteraktion und den Heimgebrauch einen hohen Marktanteil.

Je unterstütztem Betriebssystem werden im Vergleich 3,33 Punkte vergeben.

Das Vergleichsmerkmal Kompatibilität wird im Vergleich mit dem Faktor drei gewichtet, da eine hohe Kompatibilität für das heterogene Produktionsumfeld unabdingbar ist. Des Weiteren zeigen die Trends durch Industrie 4.0 eine steigende Anforderung hinsichtlich dieses Vergleichsmerkmals.

4.3.6 Sicherheit

Die Bewertung der Sicherheit eines Vergleichselements erfolgt in erster Linie auf Basis gefundener Sicherheitslücken. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass eine Software ohne oder mit wenig gefundenen Sicherheitslücken nicht als sicher gilt, da eine geringe Verbreitung zumeist Auswirkung auf die Anzahl gefundener Sicherheitslücken hat. D.h. eine Software mit weniger Verbreitung besitzt zumeist auch eine geringe Anzahl an gefundenen Sicherheitslücken – muss jedoch nicht als sicher gelten. Für das Vergleichsmerkmal wird daher auf den Industriestandard „Common Vulnerability and Exposure“ (CVE) verwiesen. CVE indiziert und nummeriert gefundene Sicherheitslücken von Technologien, welche auf Basis des „Common Vulnerability Scoring Systems“ (CVSS) bewertet werden. Durch die Anzahl gefundener Sicherheitslücken einer Technologie lassen sich Tendenzen über die Risiken zukünftiger Sicherheitslücken sowie die Häufigkeit schwerwiegender oder harmloser Fehler erstellen. Die Bewertung der Sicherheit für diesen Vergleich findet daher auf Basis des Durchschnittswertes aller CVSS Bewertungen eines Vergleichselements statt. Als Nachschlagewerk dient die Online-Datenbank CVE Details (Özkan 2019a).

Das Vergleichselement mit dem höchsten Wert wird mit einem Punkt bewertet, das mit dem niedrigsten mit zehn Punkten. Alle weiteren Elemente werden auf der Skala interpoliert bewertet.

Das Vergleichsmerkmal Sicherheit wird im Vergleich mit dem Faktor eins gewichtet, da die Aussagen über CVE lediglich einen Richtwert darstellen und nur auf bisher identifizierten Sicherheitslücken beruhen. Eine valide objektive Aussage zur Sicherheit einer Software ist nur mit einer detaillierten Analyse möglich.

4.3.7 Kosten

Die Bewertung der Kosten erfolgt auf den notwendigen Ausgaben für ein Vergleichselement. Hierunter werden Lizenzkosten, Erwerbskosten oder Kosten für die Erfüllung notwendiger Abhängigkeiten berücksichtigt. Die Kosten für zusätzliche Ressourcen, Infrastruktur oder Administrationsaufwände (bspw. Server, Serviceverträge, etc.) werden nicht berücksichtigt.

Vergleichselemente mit hohen Kosten werden mit einem Punkt und bei keinen Kosten mit zehn Punkten bewertet. Die Bewertung erfolgt relativ zu dem minimalsten und maximalsten Vergleichselement.

Das Vergleichsmerkmal Kosten wird im Vergleich mit dem Faktor eins gewichtet, da die Kosten im produktiven Einsatz sehr unterschiedlich und abhängig von existierenden Verträgen ausfallen können.

4.3.8 Standardisierung

Die Standardisierung berücksichtigt zugrundeliegende Standards. Durch die Abhängigkeit zu Standards lassen sich Vergleichselemente leichter gegeneinander austauschen, sofern sie auf dem gleichen Standard basieren. Des Weiteren steigt die Qualität einer Technologie, da durch die Vorgabe, z.B. einer Norm, ein Rahmenkonstrukt für den Umfang vorgegeben wird, welches klar definierte und zu testende Eigenschaften besitzt.

Dieses Merkmal wird nicht gewichtet und fließt auch nicht in die Bewertung ein, sondern dient in erster Linie der Vollständigkeit und als Ergänzung des Merkmals Reife.

4.3.9 Einsatzzweck

Der Einsatzzweck nennt den ursprünglichen Einsatz einer Technologie und für welche Branche diese entwickelt wurde. Sofern bekannt, werden auch nachträglich erschlossene Felder genannt.

Dieses Vergleichsmerkmal dient der ergänzenden Information und der Vollständigkeit des Vergleichs.

4.4 Bewertung von Lösungen

4.4.1 Active Directory

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Verbreitung: Einer Umfrage von Spiceworks Inc. zufolge nutzen 97% aller Unternehmen Windows als Betriebssystem für Laptops und Desktops (Tsai 2017). Da insbesondere eine zentrale Administration und Verwaltung innerhalb dieser Infrastrukturen wichtig ist, liegt der Einsatz von Active Directory als Lösung mit vollem Funktionsumfang und ohne zusätzliche Software nahe. Diese These wird durch die Aussage von Blum gestützt, welcher annimmt, dass 95% der 1000 größten amerikanischen Unternehmen, Active Directory als Verzeichnisdienst einsetzen (Blum 2015). Die Verbreitung wird also mit zehn Punkten bewertet.

Aktualität: Zum Zeitpunkt der Datenerhebung für diesen Vergleich war das letzte Update von Active Directory im aktuellsten Betriebssystem Windows Server 2019 am 22.02.2019 (entspricht „vor 15 Tagen“ zum Zeitpunkt der Datenerhebung). Es wird damit von einer sehr hohen Aktualität ausgegangen, welche mit zehn Punkten bewertet wird (Microsoft Corp. 2019a).

Reife: Microsoft hat keine Liste unterstützter Features von Active Directory veröffentlicht, unterstützt jedoch LDAP-Verzeichnisse nach Version 3. Es kann also von einer Unterstützung aller notwendigen Funktionen für diesen Standard ausgegangen werden. Die Bewertung erfolgt mit zehn Punkten (Microsoft Corp. 2017a).

Quellcode: Microsoft verfolgt mit Active Directory einen kommerziellen Erfolg. Es ist daher kein Quellcode verfügbar und das Produkt wird als Closed Source angeboten. Daher wird ein Punkt vergeben.

Kompatibilität: Active Directory lässt sich nur auf Windows-Betriebssystemen ausführen. Es werden daher 3,33 Punkte vergeben.

Sicherheit: Active Directory besteht aus verschiedenen Komponenten, deren Sicherheitslücken einzeln betrachtet und gemittelt wurden. Es ergab sich ein Wert von 6,3 nach CVSS. Die Sicherheit wurde mit einem Punkt bewertet.

Kosten: Zur Nutzung der aktuellsten Version von Active Directory fallen die Kosten einer Lizenz für Windows Server Essentials 2019 an, welche sich auf 405 EUR (Stand: 27.02.2019) belaufen. Relativ zum gesamten Vergleich werden die Kosten mit 8 Punkten bewertet.

Standardisierung: Active Directory baut auf die folgenden Standards auf:

- RFC2865: Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS)
- RFC4120: The Kerberos Network Authentication Service (V5)
- RFC4511: Lightweight Directory Access Protocol (LDAP): The Protocol
- RFC5280: Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate

Einsatzzweck: Verzeichnisdienst zur Verwaltung von IT-Ressourcen und Benutzern.

	Active Directory		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	10	20
Aktualität	1	10	10
Reife	2	10	20
Quellcode	3	1	3
Kompatibilität	3	3,33	9,99
Sicherheit	1	1	1
Kosten	1	8	8
Summe			72

Tabelle 4.1: Bewertung für Active Directory

4.4.2 OpenLDAP

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Verbreitung: Die Bestimmung der Verbreitung von OpenLDAP basiert auf Statistiken der W3Tech sowie der Linux Foundation, welche bestätigen, dass Linux das primäre Betriebssystem innerhalb von Cloud-Umgebungen und für den Betrieb von Webservern ist. Hiervon werden ca. 60% mit einem Debian-basierten Linux betrieben (Linux Foundation 2014; W3Techs 2019). Da OpenLDAP innerhalb dieser Betriebssysteme das Standardpaket für einen Verzeichnisdienst ist, kann davon ausgegangen werden, dass in den meisten Fällen OpenLDAP zum Einsatz kommt, sofern ein Verzeichnisdienst benötigt wird.

Darüber hinaus basiert der Verzeichnisdienst für das Apple-Ökosystem ebenfalls auf OpenLDAP (OpenLDAP Foundation 2013c). Die Verbreitung von OpenLDAP wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Aktualität: Das letzte Update von OpenLDAP erfolgte laut Änderungsprotokoll am 19.12.2018 mit Version 2.4.47. Die Aktualität wird relativ zum gesamten Vergleich mit sechs Punkten bewertet.

Reife: Die OpenLDAP Foundation hat eine Liste der unterstützten und nicht unterstützten Funktionen des LDAPv3 Standards veröffentlicht. Auf Basis dieser wurde ermittelt, dass eine von 32 Funktionen (entspricht 3,1%) nicht unterstützt werden. Nach eigener Aussage wird diese Funktion von den meisten LDAP-Server-Implementierungen ebenfalls nicht unterstützt (OpenLDAP Foundation 2013a; OpenLDAP Foundation 2013b). Somit wird die Reife mit zehn Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode ist frei unter der OpenLDAP Public License verfügbar, welche ähnlich der freizügigen Berkeley Software Distribution Lizenz (BSD-Lizenz) ist. Es wird die Benennung der Lizenz der Ursprungssoftware sowie ein Urheberrechtshinweis gefordert. Das Vergleichsmerkmal wird mit neun Punkten bewertet.

Kompatibilität: Auf der Projektwebsite finden sich Pakete für Linux und macOS. Des Weiteren sind im Internet Installationspakete für die Nutzung unter Windows verfügbar. Die Kompatibilität wird mit zehn Punkten bewertet.

Sicherheit: Die CVSS-Bewertung von OpenLDAP wird mit 5,7 angegeben. Im Vergleich entspricht das einer Bewertung von drei Punkten (Özkan 2019b).

Kosten: OpenLDAP steht als freie Software kostenlos zur Verfügung. Die Bewertung erfolgt mit zehn Punkten.

Standardisierung: OpenLDAP baut auf die folgenden Standards auf:

- RFC4511ff.: Lightweight Directory Access Protocol (LDAP)

Einsatzzweck: Verzeichnisdienst zur Verwaltung von IT-Ressourcen und Benutzern.

	OpenLDAP		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	10	20
Aktualität	1	9	9
Reife	2	10	20
Quellcode	3	9	27
Kompatibilität	3	10	30
Sicherheit	2	3	6
Kosten	1	10	10
Summe			122

Tabelle 4.2: Bewertung für OpenLDAP

4.4.3 OPC UA LDS-ME

Der OPC UA LDS-ME ist durch die OPC Foundation durch zwei unterschiedliche Lizenzen geschützt, von welchen eine von beiden Anwendung findet. Für „OPC Foundation Corporate Member“ gilt die Reciprocal Community License (RCL) für andere Nutzer gilt die Gnu General Public License v2 (GPLv2). Daher werden in dieser Bewertung für die Vergleichsmerkmale Quellcode und Kosten zwei unterschiedliche Bewertungen angegeben (OPC Foundation 2016a).

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Verbreitung: Einer Marktstudie zufolge setzen 25% der Maschinenbauer OPC UA als M2M-Protokoll ein – mit steigender Tendenz. In den nächsten Jahren wird eine Verbreitung von ca. 42% erwartet (Schaar 2018). Trends in Industrie 4.0 lassen ebenfalls erwarten, dass OPC UA in den nächsten Jahren das Standard-Protokoll für die Automatisierungstechnik sein wird. Im Verhältnis zu aktuellen Marktanteilen von Feldbussystemen (vgl. Abschnitt 3.1.4) sind die aktuellen und prognostizierten Werte zum Einsatz von OPC UA hoch. Resultierend kann von einer zumindest kleinen Verbreitung des OPC UA LDS-ME ausgegangen werden und wird daher mit drei Punkten bewertet.

Aktualität: Die letzten Änderungen am Quellcode fanden am 11.02.2019 statt. Die Aktualität wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Reife: Nach eigenen Angaben Website, wird der vollständige Umfang eines Local Discovery Servers nach IEC62541 erfüllt. Die Reife wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode steht unter den Lizenzen RCL und GPLv2.

Die Nutzung unter RCL steht allen Mitgliedern der OPC Foundation zur Verfügung. Diese stellt keine Anforderungen an Veröffentlichung von Änderungen am Code oder schränkt die Nutzung ein. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Die GPLv2 gilt für alle anderen Nutzer und fordert die Offenlegung abgeleiteter Programme, welche produktiv unter der GPLv2 eingesetzt werden. Veränderungen am ursprünglichen Quellcode müssen nachverfolgbar dokumentiert und mit Kopie der Lizenz und Urheberrechtshinweise versehen werden. Aufgrund dieser Einschränkungen wird mit drei Punkten bewertet.

Kompatibilität: Über die OPC Foundation steht ein Installationspaket für Windows zur Verfügung. Der Quellcode ist des Weiteren für Kompilierumgebungen unter Linux vorbereitet. Es wird daher mit 3,33 Punkten für Windows und 1 Punkt für Linux bewertet (insgesamt 4,33 Punkte).

Sicherheit: Hierüber sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Daten vorhanden.

Kosten: Für die Nutzung unter der RCL Lizenz fallen pro Jahr 3000 USD für die Mitgliedschaft in der OPC Foundation an. Es wird mit einem Punkt bewertet.

Für die Nutzung unter der GPLv2 fallen keine Kosten an. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Standardisierung: OPC UA LDS-ME implementiert Local Discovery nach OPC UA-Spezifikation Teil 12 (OPC Foundation 07.02.18).

Einsatzzweck: Lokaler Discovery Server für OPC UA-Subnetze.

	Gewichtung	OPC UA LDS-ME (RCL)		OPC UA LDS-ME (GPLv2)	
		Bewertung	Punktzahl	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	3	6	3	6
Aktualität	1	10	10	10	10
Reife	2	10	20	10	20
Quellcode	3	10	30	3	9
Kompatibilität	3	4,33	12,99	4,33	12,99
Sicherheit	1	0	0	0	0
Kosten	1	1	1	10	10
Summe			80		68

Tabelle 4.3: Bewertung für OPC UA LDS-ME

4.4.4 OPC UA .NET-GDS

Der unterlagerte OPC UA .NET-Stack ist durch die OPC Foundation durch zwei unterschiedliche Lizenzen geschützt, von welchen eine von beiden Anwendung findet (analog zum OPC UA LDS-ME). Daher werden in dieser Bewertung für die Vergleichsmerkmale Quellcode und Kosten zwei unterschiedliche Bewertungen angegeben (Regen 2017).

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.4 dargestellt.

Verbreitung: Die Verbreitung wird analog zum OPC UA LDS-ME mit drei Punkten bewertet.

Aktualität: Die letzten Änderungen am Quellcode fanden am 05.02.2019 statt. Die Aktualität wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Reife: Nach eigenen Angaben der Projektwebsite wird der vollständige Umfang eines Global Discovery Servers nach IEC62541 realisiert. Die Reife wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode steht unter den Lizenzen RCL und GPLv2.

Die Nutzung unter RCL steht allen Mitgliedern der OPC Foundation zur Verfügung. Diese stellt keine Anforderungen an Veröffentlichung von Änderungen am Code oder schränkt die Nutzung ein. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Die GPLv2 gilt für alle anderen Nutzer und fordert die Offenlegung abgeleiteter Programme, welche produktiv unter der GPLv2 eingesetzt werden. Veränderungen am ursprünglichen Quellcode müssen nachverfolgbar dokumentiert und mit Kopie der Lizenz und Urheberrechtshinweisen versehen werden. Aufgrund dieser Einschränkungen wird mit drei Punkten bewertet.

Kompatibilität: Für den OPC UA .NET-GDS gibt es keine binären Installationspakete für Betriebssysteme, sondern der Quellcode muss selbstständig auf dem jeweiligen System kompiliert werden. Der Quellcode des benötigten OPC UA .NET-Stacks ist für Windows und Linux Kompilierumgebungen vorbereitet. Daher wird mit 6,66 Punkten bewertet (Barnstedt et al. 2016).

Sicherheit: Hierüber sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Daten vorhanden.

Kosten: Die Kosten sind identisch zu denen des OPC UA LDS-ME.

Standardisierung: OPC UA .NET-GDS implementiert Global Discovery und Zertifikatsverwaltung nach OPC UA-Spezifikation Teil 12 (OPC Foundation 07.02.18).

Einsatzzweck: Globaler Discovery Server und Zertifikatsverwaltung in großen OPC UA-Netzwerken.

	Gewichtung	OPC UA .Net-GDS (RCL)		OPC UA .Net-GDS (GPLv2)	
		Bewertung	Punktzahl	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	3	6	3	6
Aktualität	1	10	10	10	10
Reife	2	10	20	10	20
Quellcode	3	10	30	3	9
Kompatibilität	3	6,66	19,98	6,66	19,98
Sicherheit	1	0	0	0	0
Kosten	1	1	1	10	10
Summe			87		75

Tabelle 4.4: Bewertung für OPC UA .NET-GDS

4.5 Bewertung von Implementierungen nutzbarer Technologien

4.5.1 Bonjour

Bonjour ist eine Implementierung von zeroconf und wird von Apple zur Verfügung gestellt.

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist Tabelle 4.5 dargestellt.

Verbreitung: Bonjour ist eine Basistechnologie des Apple-Ökosystems und in allen Produkten enthalten. Des Weiteren ist es in der Software iTunes, welche ebenfalls für Windows verfügbar ist, und in Apples Backup Lösung, welche in zahlreichen Netzwerkgeräten anderer Hersteller genutzt werden kann, enthalten. Auf Basis des Marktanteils (vgl. Abschnitt 4.3.5) von macOS sowie der zusätzlichen Verbreitung über Netzwerkgeräte und auch Drucker (siehe Apple AirPrint) wird die Verbreitung mittelmäßig mit fünf Punkten bewertet.

Aktualität: Die letzte Aktualisierung von Bonjour fand mit Version 3.1.0.1 am 31.10.2016 statt. Die Aktualität wird daher mit einem Punkt bewertet.

Reife: Die Funktionalitäten von zerconf Clients und Servern nach RFC6763 werden von Bonjour alle unterstützt. Es wird daher mit zehn Punkte bewertet (Cheshire et al. 2013b).

Quellcode: Der Quellcode von Bonjour ist in einen offenen Anteil (der des mDNSResponders) unter der Apache 2.0 Lizenz und dem Rest, welcher nicht offen zur Verfügung steht, geteilt. Die Apache 2.0 Lizenz fordert Dokumentation der Änderungen sowie Kopien der Lizenz und Urheberrechtshinweise in abgeleiteten Produkten. Es wird mit fünf Punkten bewertet.

Kompatibilität: Installierbare Pakete von Bonjour stehen für die Betriebssysteme Windows und macOS zur Verfügung. Es werden daher 6,66 Punkte vergeben.

Sicherheit: Für Bonjour sind nur wenig Sicherheitslücken bekannt. Mit einem CVSS von 5,5 Punkten wird die Sicherheit mit vier Punkten bewertet.

Kosten: Für die Nutzung von Bonjour fallen keine Kosten und somit zehn Punkte in der Bewertung an.

Standardisierung: Bonjour basiert auf dem nicht-veröffentlichten Zeroconf Standard. Lediglich DNS-basierte Dienstermittlung und Multicast DNS sind in RFC6763 und 6762 standardisiert.

Einsatzzweck: Bonjour dient dem automatischen Auffinden und der Konfiguration von Netzwerkressourcen in lokalen Subnetzen.

	Bonjour		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	5	10
Aktualität	1	1	1
Reife	2	10	20
Quellcode	3	5	15
Kompatibilität	3	6,66	19,98
Sicherheit	1	2	2
Kosten	1	10	10
Summe			78

Tabelle 4.5: Bewertung für Bonjour

4.5.2 LDAP

LDAP wurde bereits durch die Implementierungen Active Directory und OpenLDAP in den Vergleich aufgenommen. Dabei wird der Großteil der LDAP-Standardisierung inkl. dessen Funktionsumfang berücksichtigt.

4.5.3 jabberd2

jabberd2 ist ein XMPP Server auf Basis von C und ist der Nachfolger von jabberd14.

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.6 dargestellt.

Verbreitung: Ein veröffentlichter Einsatz von jabberd2 ist nur in Apples Chat Server als modifizierte Version bekannt. Da die Unterstützung und Pflege von macOS Server rückläufig ist, wird die Verbreitung mit einem Punkt bewertet (Apple Inc. 2019).

Aktualität: Die letzte Aktualisierung erfolgte am 01.11.2018. Es werden zehn Punkte vergeben.

Reife: jabberd2 implementiert 50 von 55 XMPP Erweiterungen (entspricht 91%). Die Reife wird mit neuen Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode ist unter GPLv2 verfügbar und fordert die Veröffentlichung abgeleiteter Produkte im produktiven Einsatz unter der GPLv2. Veränderungen müssen dokumentiert und eine Lizenz sowie ein Urheberrechtshinweis beigefügt sein. Die Bewertung erfolgt mit drei Punkten.

Kompatibilität: Eine native Unterstützung ist nur für Linux-basierte Betriebssysteme verfügbar. Es werden daher 3,33 Punkte in der Bewertung vergeben.

Sicherheit: Eine Recherche von Sicherheitslücken in jabberd2 lieferte eine resultierende durchschnittliche Bewertung von 5,3. Es werden daher fünf Punkte bewertet.

Kosten: Es handelt sich um ein kostenfreies Open Source Projekt, daher werden zehn Punkte vergeben.

Standardisierung: jabberd2 baut auf den XMPP Standard nach RFC6120 auf. Weitere Standards durch die XMPP Foundation werden ebenfalls berücksichtigt.

Einsatzzweck: jabberd2 wurde für den Austausch von XML-basierten Nachrichten mit dem Zweck eines Messenger-Dienstes entwickelt.

	jabberd2		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	1	2
Aktualität	1	9	9
Reife	2	9	18
Quellcode	3	3	9
Kompatibilität	3	3,33	9,99
Sicherheit	1	3	3
Kosten	1	10	10
Summe			61

Tabelle 4.6: Bewertung von jabberd2

4.5.4 OPC UA – open62541

Die bereits betrachteten Implementierungen OPC UA LDS-ME und OPC UA .NET-GDS decken jeweils nur die Discovery-Spezifikationen ab. Daher wird OPC UA als nutzbare Technologie im Vergleich aufgeführt. Als Vergleichselement wird das offene SDK open62541 (<https://open62541.org/>) genutzt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich um keine Implementierung einer Lösung, sondern um die Implementierung eines Entwicklungswerkzeugs handelt, um den Entwicklungsaufwand von Lösungen auf Basis von OPC UA zu vereinfachen.

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Verbreitung: Die Verbreitung wird wie analog zum OPC UA LDS-ME mit drei Punkten bewertet.

Aktualität: Das letzte Release wurde am 19.12.2018 veröffentlicht. Die Aktualität wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Reife: open62541 implementiert die Basis-Funktionalitäten von OPC UA. Im aktuellen Release sind drei von 14 Funktionen (entspricht 17,6%) bisher nicht realisiert. Die Reife wird daher mit acht Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode ist unter der Mozilla Public License v2.0 (MPLv2) verfügbar. Diese erfordert modifizierten Quellcode weiterhin unter der MPLv2 zu lizenzieren. Modifizierte Projekte können jedoch in Kombination mit proprietärem Code kommerziell eingesetzt werden. Der Quellcode wird daher mit acht Punkten bewertet.

Kompatibilität: open62541 ist für die Nutzung unter Windows, Linux und macOS vorbereitet. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Sicherheit: Hierfür sind keine Daten bekannt. Es wird daher keine Bewertung vorgenommen.

Kosten: Für die Nutzung von open62541 fallen keine Kosten an. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Standardisierung: open62541 basiert auf der Standardisierung von OPC UA, IEC62541.

Einsatzzweck: open62541 ist ein Software-Entwicklungswerkzeug für die Realisierung von OPC UA-Anwendungen.

	open62541		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	3	6
Aktualität	1	9	9
Reife	2	8	16
Quellcode	3	8	24
Kompatibilität	3	10	30
Sicherheit	1	0	0
Kosten	1	10	10
Summe			95

Tabelle 4.7: Bewertung von open62541

4.5.5 Unified Automation C++ based OPC UA SDK

Die bereits betrachteten Implementierungen OPC UA LDS-ME und OPC UA .NET-GDS decken jeweils nur die Discovery-Spezifikationen ab. Daher wird OPC UA als nutzbare Technologie im Vergleich aufgeführt. Als Vergleichselement wird das kommerzielle Unified Automation C++ based OPC UA-SDK genutzt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich um keine Implementierung einer Lösung, sondern um die Implementierung

eines Entwicklungswerkzeugs handelt, um den Entwicklungsaufwand von Lösungen auf Basis von OPC UA zu vereinfachen.

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.8 dargestellt.

Verbreitung: Die Verbreitung wird wie analog zum OPC UA LDS-ME mit drei Punkten bewertet.

Aktualität: Das letzte Release wurde am 22.10.2018 veröffentlicht. Die Aktualität wird daher mit neun Punkten bewertet.

Reife: Unified Automation C++ based OPC UA-SDK implementiert alle-Funktionalitäten von OPC UA. Bisher sind neue Funktionalitäten von OPC UA, welche noch in der Spezifizierungsphase sind, bereits frühzeitig als Beta-SDK von Unified Automation verfügbar. Die volle Abdeckung der OPC UA-Spezifikation steht daher meist im Vordergrund. Die Reife wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Quellcode: Der Quellcode kann in Form des SDKs vollständig erworben werden. Der Quellcode wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Kompatibilität: Das SDK steht für die Plattformen Windows und Linux zur Verfügung. Durch den Erwerb des Quellcodes kann das SDK für jede gewünschte Plattform erstellt werden. Es wird mit zehn Punkten bewertet.

Sicherheit: Hierfür sind keine Daten bekannt. Es wird daher keine Bewertung vorgenommen.

Kosten: Für den Erwerb des SDKs inkl. eines einjährigen Wartungs- und Updatevertrags fallen ca. 10500 EUR an.

Standardisierung: Das Unified Automation C++ based OPC UA-SDK basiert auf der Standardisierung von OPC UA, IEC62541.

Einsatzzweck: Das SDK ist ein Software-Entwicklungswerkzeug für die Realisierung von OPC UA-Anwendungen.

	Unified Automation C++ OPC UA SDK		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	3	6
Aktualität	1	9	9
Reife	2	10	20
Quellcode	3	10	30
Kompatibilität	3	10	30
Sicherheit	1	0	0
Kosten	1	3	3
Summe			98

Tabelle 4.8: Bewertung von Unified Automation C++ based OPC UA-SDK

4.5.6 COM/DCOM

Die tabellarische Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.9 dargestellt.

Verbreitung: Die Verbreitung wird analog zum Active Directory mit zehn Punkten bewertet.

Aktualität: Die letzte Aktualisierung bzgl. COM wurde am 30.07.2018 mit einem Update für Windows 10 und Windows Server 2016 veröffentlicht. Es wird mit neun Punkten bewertet (Microsoft Corp. 2018).

Reife: Über die Reife lässt sich keine Aussage treffen, da nicht gegen eine öffentlich zugängliche Spezifikation geprüft werden kann. Es findet keine Bewertung statt.

Quellcode: COM/DCOM sind Closed Source Projekte. Es wird daher mit einem Punkt bewertet.

Kompatibilität: COM/DCOM kann ausnahmslos auf Windows-Betriebssystemen genutzt werden. Es wird daher mit 3,33 Punkten bewertet.

Sicherheit: Der Durchschnitt bekannter Sicherheitslücken ist 6,15. Es wird mit einem Punkt bewertet.

Kosten: Für die Nutzung von COM/DCOM kann auf das kostenlos verfügbare Betriebssystem Windows IoT Core zurückgegriffen werden. Es wird daher mit zehn Punkten bewertet.

Standardisierung: COM/DCOM basiert auf keiner öffentlichen Standardisierung.

Einsatzzweck: COM/DCOM ist als Interprozesskommunikation innerhalb eines Systems und auf verteilten Systemen entworfen worden.

	COM/DCOM		
	Gewichtung	Bewertung	Punktzahl
Verbreitung	2	10	20
Aktualität	1	8	8
Reife	2	0	0
Quellcode	3	1	3
Kompatibilität	3	3,33	9,99
Sicherheit	1	2	2
Kosten	1	10	10
Summe			53

Tabelle 4.9: Bewertung von COM/DCOM

4.6 Zusammenfassung und Entwurfsentscheidung

Abbildung 4.8 sortiert die Vergleichselemente auf Basis der erzielten Punktzahl in der Bewertung. OpenLDAP hebt sich als Verzeichnisdienst aus der IT deutlich von anderen Lösungen und nutzbaren Technologien ab. Des Weiteren stehen OPC UA-SDKs als Entwicklungswerkzeuge und beispielhafte Lösungen der nutzbaren Technologie OPC UA an zweiter Stelle.

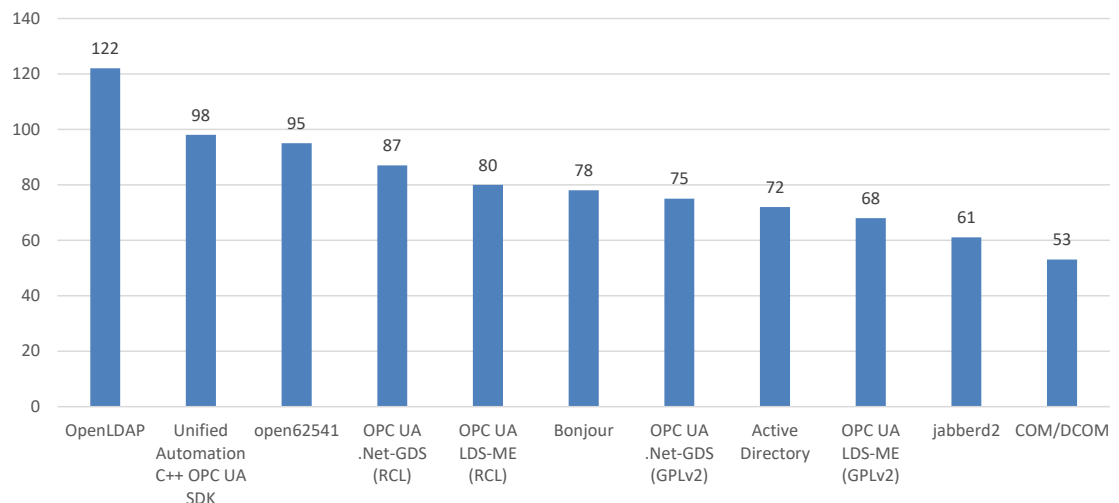


Abbildung 4.8: Übersicht der Bewertungen von Lösungen und Technologien

Für eine Entwurfsentscheidung der Technologie für einen Verzeichnisdienst (VZD) in der serviceorientierten Produktionstechnik dürfen existierende Anlagen und Komponenten (Brownfield) nicht vernachlässigt werden. Auf Basis der dargelegten Information im Stand der Technik sowie innerhalb des Vergleichs geht hervor, dass LDAP die geeignete Technologie für Verzeichnisdienste ist. Diese findet insbesondere in der IT bereits weit verbreitete Anwendung durch die breite Nutzung von OpenLDAP und Active Directory und stellt den Standard zur Verwaltung von Ressourcen in Unternehmensnetzwerken dar.

OPC UA hingegen stellt den Kommunikationsstandard für M2M-Kommunikation dar und findet bereits bei mind. 25% der Maschinenbauer Anwendung (Schaar 2018). Hinsichtlich der Lebenszeit von Maschinen in der Produktionstechnik ist eine Berücksichtigung von existierenden Anlagen durch Einführung einer neuen Technologie wie LDAP nur mit erhöhtem Aufwand und Stillstandszeiten möglich. Die Nutzung von OPC UA als Basis-Technologie ist hingegen bei einem Viertel der Unternehmen bereits heute möglich.

Unter Berücksichtigung dieser beider maßgeblichen Technologien aus der Informations- und Produktionstechnik liegt der logische Schluss nahe für einen Verzeichnisdienst bestehende Schnittstellen und Architekturen zu nutzen und einen Schulterchluss aus LDAP und OPC UA zu ermöglichen.

OPC UA soll hierbei einen Verzeichnisdienst für die Produktionstechnik bereitstellen, welcher für Produktionssysteme (sog. Cyber-physische Systeme) nutzbar wird. Zusätzlich sollen sich die Informationen dieses Verzeichnisdienstes in bestehende Verzeichnisdienste aus Office-IT Strukturen auf Basis von LDAP integrieren lassen, um die Kompatibilität in heterogenen (OT und IT) Umgebungen zu erhöhen und eine Integration in Office-IT Umgebungen zu ermöglichen. Dadurch wird insbesondere die Nutzung bestehend Lösungen aus der Office-IT möglich (bspw. Monitoring Services oder Management von Sicherheitszertifikaten).

Die folgenden zwei Kapitel stellen daher zunächst eine Architektur für einen Verzeichnisdienst in der serviceorientierten Produktionstechnik auf Basis von OPC UA vor. Im Anschluss wird ein Konzept zur Integration der Informationen dieses Verzeichnisdienstes in vorherrschende Office-IT Strukturen mit Hilfe von LDAP vorgestellt.

5 Architektur eines Verzeichnisdienstes für serviceorientierte Produktionstechnik

Die Literatur versteht unter einem Verzeichnisdienst „eine (oftmals hierarchische) Datenbank als auch zugehörige Kommunikationsschnittstelle für Abfragen und Änderungen. [...] Diese Verzeichnisse sind dafür konzipiert, wie ein Telefon- oder Adressbuch auch weitergehende Informationen über die Funktion und die organisatorische Einordnung der Person zu erhalten [...]“ (Stenzel 2005). Ein solcher Verzeichnisdienst wird nach Lawall et al. als „intelligente“ Organisationsverwaltung bezeichnet, welche komplexe aufbauorganisatorische Modelle abbilden können muss (Lawall et al. 2011).

Ein Verzeichnisdienst muss demnach primär zwei Aufgaben erfüllen (Bußler 1998; Schaller 1998):

- Verwaltung der maschinellen und personellen Aufgabenträger eines betrieblichen Systems
- Bereitstellung einer „organisatorischen“ Anfragesprache zur Selektion der Aufgabenträger

Im folgenden Kapitel wird die Architektur eines Verzeichnisdienstes für die serviceorientierte Produktionstechnik vorgestellt. Hierbei werden die zwei o.g. Aufgaben im Rahmen eines Verzeichnisdienstes auf OPC UA-Basis realisiert und die Kommunikation zwischen den Komponenten definiert. Dies erfolgt innerhalb der drei zu differenzierenden Umgebungen: Office-IT, Produktions-IT und OT.

Im Anschluss folgt der Systementwurf mit dem notwendigen Informationsmodell für einen Verzeichnisdienst auf Basis von OPC UA. Die Notation erfolgt dabei nach der Spezifikation von OPC UA-Informationsmodellen. Das Kapitel betrachtet des Weiteren die Integration und Nutzung von Companion Specifications in den Verzeichnisdienst.

5.1 Systemarchitektur

5.1.1 Systemübersicht

Vor der detaillierten Beschreibung der einzelnen Komponenten und Funktionen des Verzeichnisdienstes muss eine allgemeine Systemarchitektur mit Schnittstellen zu den cyber-

physischen Systemen aus Produktions-IT und OT festgelegt werden. Abbildung 5.1 stellt die Systemübersicht dar und ordnet den Verzeichnisdienst in die Architektur ein. Hierbei wird die Verbindung via OPC UA in Produktions-IT und OT deutlich und durch graue Pfeile dargestellt. Die Verbindung in bestehende Office-IT Verzeichnisdienste wird über LDAP Kommunikation realisiert (grüner Pfeil).

Die Produktions-IT, u.a. bestehend aus Leitsteuerungen und Produktionsplanungssystemen, verfügt heute bereits über zahlreiche Schnittstellen. Unter anderem auch OPC UA-Schnittstellen, welche des Weiteren durch die Definition von Companion Specifications für diverse Branchen auch bereits ein semantisches Datenmodell verarbeiten können (SAP SE 2019).

OT andererseits lässt die Erfassung von Daten mit zahlreichen OPC UA-Servern zu und unterstützt das Abrufen von Daten mit Hilfe integrierter OPC UA-Clients, welche die Informationen in die lokale Anwendungslogik einfließen lassen können (Pape 2011).

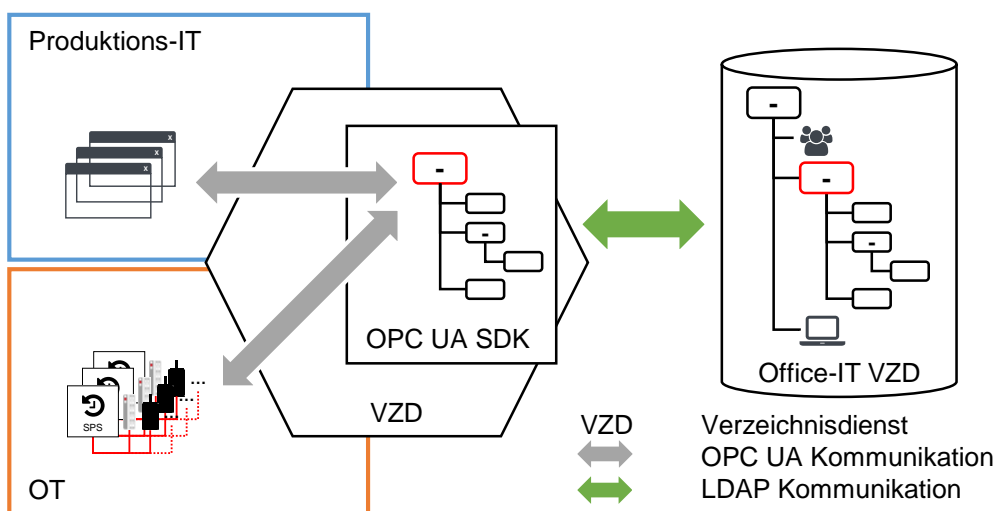


Abbildung 5.1: Systemübersicht der Gesamtarchitektur für einen Verzeichnisdienst

Der VZD erfasst innerhalb des OPC UA-SDKs sämtliche CPS als Aufgabenträger in einer hierarchischen Baumstruktur und stellt deren Informationen und Meta-Informationen zur Verfügung. Mit Hilfe von LDAP sollen diese Informationen in vorherrschende Verzeichnisdienste aus der Office-IT synchronisiert werden.

Somit ist eine unternehmensweite Erfassung aller CPS inkl. derer Fähigkeiten möglich. Neben der Erfassung von Office-IT-Betriebsmitteln haben Systemadministratoren folglich auch einen Überblick über IT-Security-relevante Systeme der Produktionstechnik.

Durch die Synchronisation zwischen beiden Domänen lassen sich die domänenspezifischen Anfragesprachen für die Selektion von Aufgabenträgern nutzen. Aus der Office-IT können bestehende Anfragestrukturen auf Basis sog. LDAP-Queries für eine Abfrage am VZD genutzt werden. Für die Produktionstechnik stehen OPC UA-Mechanismen zur Verfügung, welche eine Interaktion mit dem VZD erlauben. Die Abläufe und Logik hinter diesen gilt es im Rahmen der Systemarchitektur zu definieren.

Abbildung 5.2 stellt ein Sequenzdiagramm dar, welches die notwendigen Sequenzen zwischen einem CPS und dem VZD darstellt. Des Weiteren wurden die Synchronisationsaufrufe zwischen VZD und Office-IT VZD identifiziert.

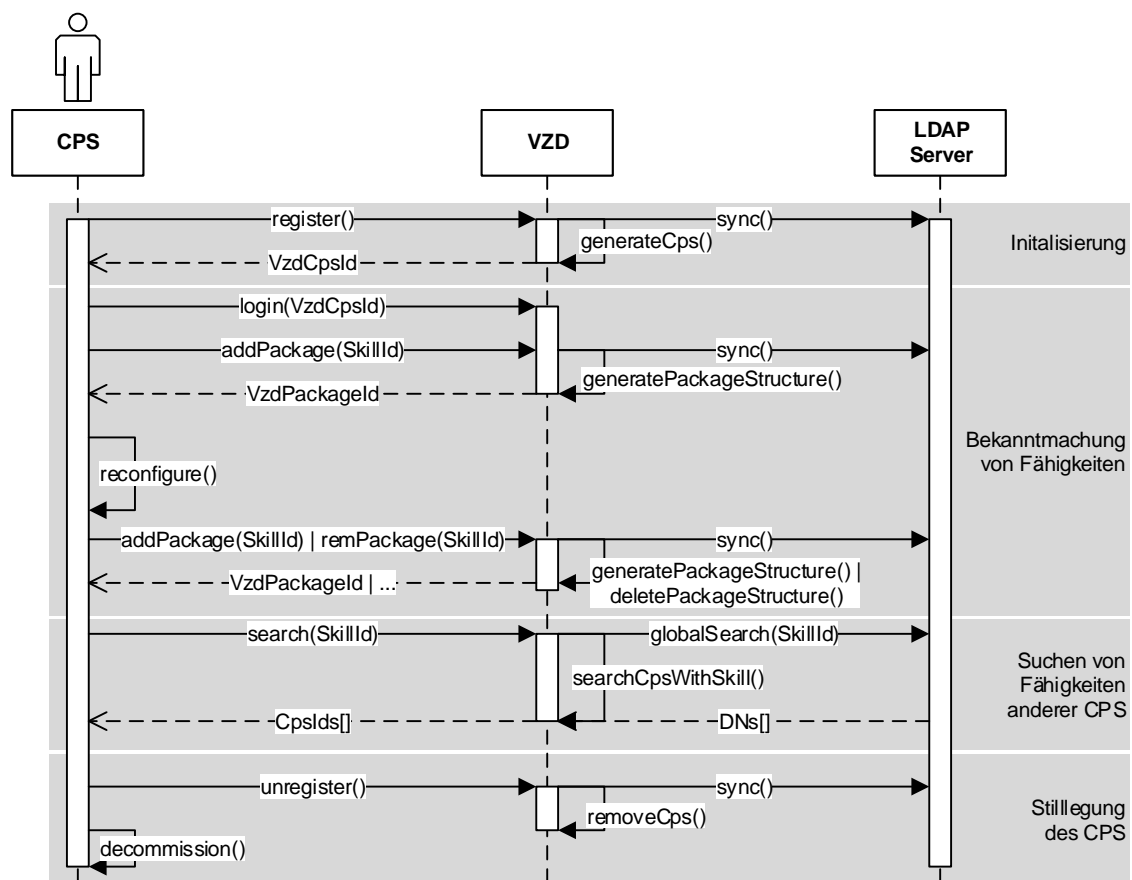


Abbildung 5.2: Sequenzdiagramm der Abläufe des Verzeichnisdienstes

Das Sequenzdiagramm enthält vier verschiedene Szenarien (dargestellt durch graue Schichten im Hintergrund), welche notwendig sind, um die Primäraufgaben nach Kapitel 5 zu erfüllen:

In der **Initialisierung** wird ein CPS nach seiner Erstellung und bei der Inbetriebnahme am VZD registriert. Dieser Schritt ist notwendig, um das CPS unternehmensweit eindeutig identifizieren zu können. Der VZD generiert die notwendige Struktur und meldet die eindeutige ID zurück, welche über die Lebenszeit des CPS persistent in diesem gespeichert sein muss.

Die **Bekanntmachung von Fähigkeiten** beginnt mit der Übergabe der o.g. ID für den Login und ermöglicht dem CPS Fähigkeiten (d.h. Funktionen und/oder Schnittstellen) hinzuzufügen. In Abhängigkeit des Aufgabenumfangs eines CPS können nun mehrfach Funktionen und Schnittstellen auf Basis von IDs über eine „addPackage“-Funktion angemeldet werden. Funktionen ermöglichen den direkten Datenaustausch, um bspw. eine Sollposition zu beschreiben. Schnittstellen enthalten hingegen die Informationen für den Aufbau einer Verbindung für den bidirektionalen Datenaustausch (bspw. IP-Adresse und Zugangsdaten für eine Website). Angemeldete Fähigkeiten werden zeitgleich in den Office-IT VZD synchronisiert.

Suchen von Fähigkeiten anderer CPS beschreibt eine konsumierende Tätigkeit des VZD. CPS haben hierüber die Möglichkeit, eine der o.g. Fähigkeiten unter Angabe der ID innerhalb des Verzeichnisdienstes zu suchen. Der VZD kann des Weiteren eine globale Suche auf Unternehmensebene über den Office-IT VZD starten und ermöglicht somit Zugriff auf alle verfügbaren CPS innerhalb eines Unternehmens. Die globale Anfrage liefert die eindeutigen Namen (Distinguished Names - DN) aus dem Unternehmensverzeichnis an den VZD zurück. Die Tiefe der Suche (Halle, Standort, Land) ist abhängig vom Anwendungsfall, da Fähigkeiten meist zeitnah in geographischer Nähe des suchenden CPS benötigt werden.

Die **Stilllegung des CPS** ist als Funktion zur Bereinigung zu betrachten und ermöglicht das Löschen eines CPS aus dem VZD im Falle seiner Stilllegung. Die persistente ID wird in Folge dieser Tätigkeit aufgelöst und steht im VZD nicht mehr als mögliches CPS zu Verfügung.

5.1.2 Übersicht der Komponenten und Kommunikation

Zur Realisierung der Systemübersicht und Sequenzen aus den vorhergehenden Abbildungen sind einzelne Komponenten notwendig, welche in Abbildung 5.3 dargestellt sind.

OPC UA stellt mit Hilfe des **SDKs** und eines sog. **OPC UA-Base Servers** die Grundfunktionalität im VZD bereit, um **OPC UA-Sessions** durch OPC UA Clients innerhalb von CPS zu bedienen. Außerdem wird auf dieser Ebene der **LDAP Connector** eingebunden, welcher eine Verbindung in bestehende Office-IT VZDs mit **LDAP Verzeichnis** ermöglicht.

Aufbauend auf dem OPC UA-Base Server unterstützt das SDK mit Strukturen für einen **Server Manager**, um den OPC UA-Server zu verwalten, einen **Node Manager**, um Knoten (sog. Nodes) innerhalb des Namensraums zu manipulieren (erstellen, löschen, ändern) und **Type Definitionen**, um einerseits auf vorhandene einfache und komplexe Datentypen aus der OPC UA-Spezifikation zurückzugreifen und andererseits eigene Datentypen zu ergänzen.

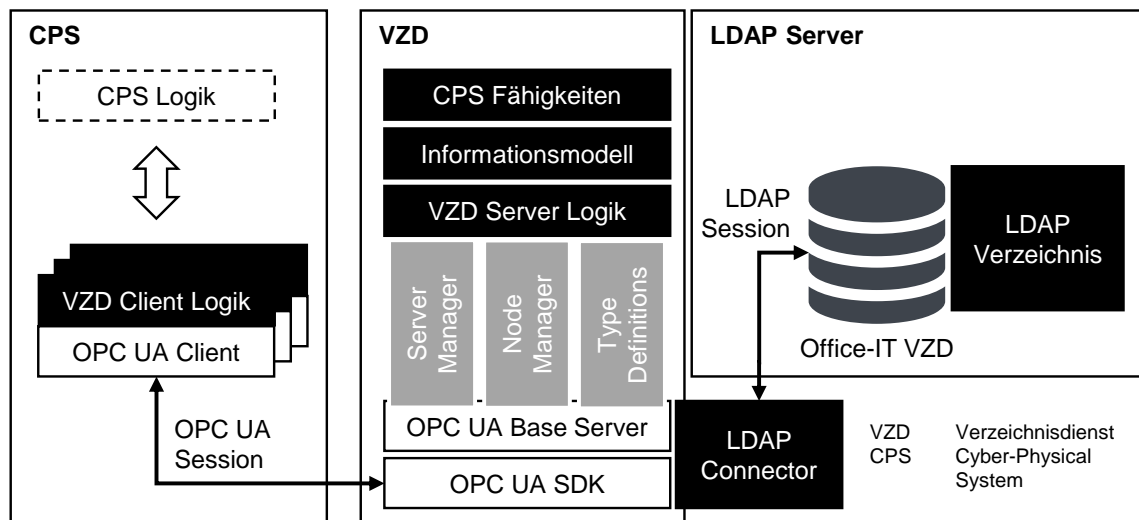


Abbildung 5.3: Architekturdiagramm von Komponenten und Kommunikation

Zur Abbildung der Szenarien aus dem Sequenzdiagramm in Abbildung 5.2 bedarf es zunächst einer **VZD Server Logik**, welche alle Methoden sowie deren Anwendungslogik bereitstellt. Die Logik verfügt als zentrales Element über eine Übersicht aller Komponenten und hat einen direkt Zugriff auf die Strukturen des SDK sowie das **Informationsmodell**. Dieses gibt dabei die Modellierungsregeln und die Struktur von Informationen innerhalb des VZD vor und ermöglicht die Anmeldung von CPS sowie deren Informationen für die Verwaltung innerhalb eines Verzeichnisdienstes. Das Informationsmodell ist elementarer Bestandteil des VZD und generiert den initialen Adressraum, welcher den Cli-

ents verfügbar gemacht wird. Abhängig vom o.g. Sequenzdiagramm und den durchgeführten Sequenzen wird durch das Informationsmodell die zugrundeliegende Struktur des Adressraums festgelegt.

Die **CPS Fähigkeiten** erweitern das Informationsmodell des VZD um Modellierungsregeln für verfügbare Fähigkeiten. D.h. Funktionen und Schnittstellen sind als Teil-Informationsmodelle gespeichert und können von den CPS aufgerufen werden. Diese Modelle werden dann als Instanzen den jeweiligen CPS innerhalb des VZD zugeordnet, welche diese Fähigkeit angemeldet haben.

Das OPC UA-Informationsmodell sowie die Abbildung von CPS Fähigkeiten stellen einen elementaren Bestandteil des VZD dar. Im folgenden Systementwurf wird daher das Informationsmodell in OPC UA-Notation sowie ein Entwurf zur Abbildung von Fähigkeiten innerhalb dieses Informationsmodells dargestellt.

5.2 Systementwurf

Durch die weite Verbreitung von OPC UA und die Notwendigkeit der Modellbeschreibung innerhalb der Spezifikation, hat sich für die einheitliche Modellierung von Adressräumen eine Konvention durchgesetzt, welche als Legende in Abbildung 5.4 dargestellt ist.

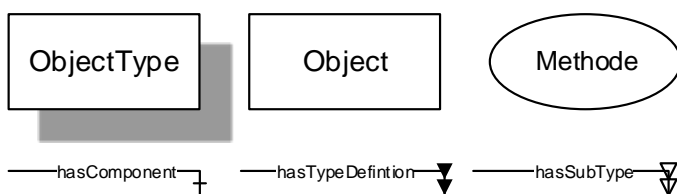


Abbildung 5.4: Legende der OPC UA-Notation zur Informationsmodellierung

Für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit sind drei Knoten und drei mögliche Beziehungen zwischen diesen ausreichend.

Der **ObjectType** beschreibt einen Knoten, welcher als Typ im Namensraum zur Verfügung steht und für die Nutzung instanziiert werden kann.

Das **Object** ist eine Instanz des ObjectType und besitzt folglich alle beschreibenden Eigenschaften inkl. der modellierten Parameter des Types. Jede Instanz eines Objects kann individuell um Knoten erweitert werden.

Eine **Methode** beschreibt eine Funktion, welche durch den Client aufgerufen werden kann und optionale Ein- oder Ausgabeparameter besitzt.

Die drei Pfeile „hasComponent“, „hasTypeDefinition“ und „hasSubType“ beschreiben die möglichen Beziehungen der Knoten untereinander.

5.2.1 Informationsmodell

Das Informationsmodell für einen VZD der serviceorientierten Produktionstechnik auf Basis von OPC UA setzt sich aus verschiedenen Typen, Objekten und Methoden zusammen, um einerseits der Abbildung von Fähigkeiten der Aufgabenträgern gerecht zu werden, andererseits eine selektive Abfrage dieser zu ermöglichen. Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 zeigen das Informationsmodell in zwei Teilen. Im ersten Teil bis zur CPS-Ebene und im zweiten Teil die Modellierung innerhalb dieser.

Grundsätzlich erfolgt der Einstieg in ein OPC UA-Informationsmodell über einen Elternknoten für dieses Modell innerhalb des „ObjectsFolder“ auf oberster Ebene eines Namensraums (Identifizier: i=85). Den obersten Knoten und Einstieg in das darunterliegende VZD-Informationsmodell bildet der „VZD“ mit der Typendefinition „VZDType“. Dieser bringt verschiedene Methoden zur Unterteilung in eine Multi-Tenant-Architektur mit.

Eine Multi-Tenant-Architektur ermöglicht das organisatorische Trennen verschiedener Einheiten, um diese einfacher voneinander isolieren zu können. Für den VZD kann somit eine Trennung von Organisationseinheiten (innerhalb eines Unternehmen) oder von Mandanten (bei Unternehmen-übergreifenden Verzeichnisdiensten) gewährleistet werden.

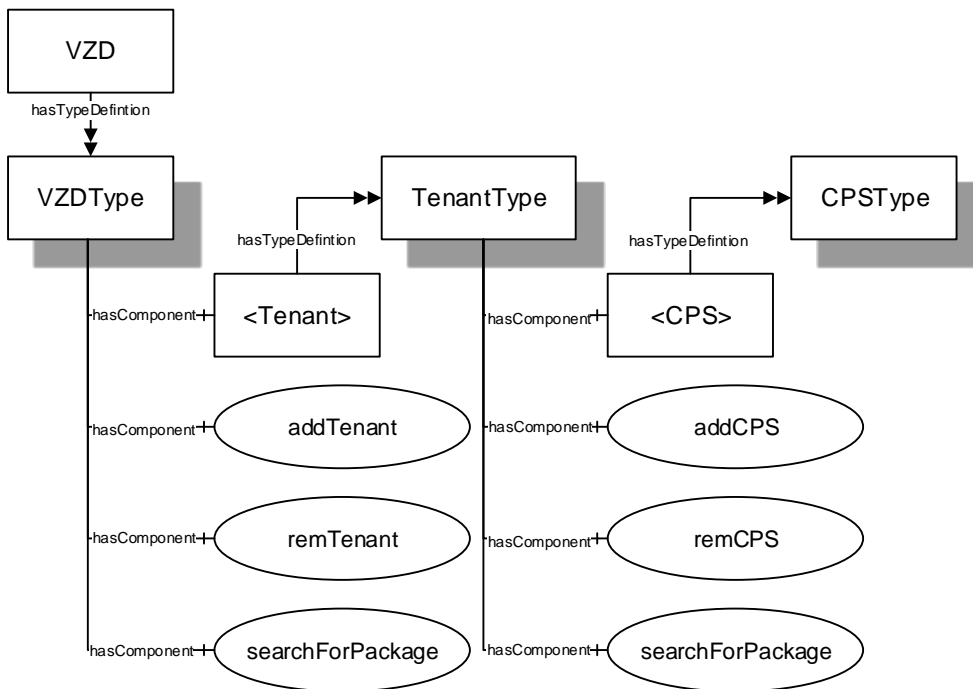


Abbildung 5.5: OPC UA-Informationenmodell des Verzeichnisdienstes (Teil 1)

Für das Hinzufügen und Entfernen von Tenants wurden die beiden Methoden „**addTenant**“ und „**remTenant**“ im Informationsmodell modelliert. Des Weiteren existiert eine Methode „**searchForPackage**“, um alle darunterliegenden Knoten nach Fähigkeiten zu durchsuchen.

Der „**Tenant**“ stellt an dieser Stelle im Informationsmodell einen sog. „Optional Placeholder“ dar, welcher unterhalb des VZD beliebig oft vom Typ „**TenantType**“ instanziiert werden kann. Als „Optional Placeholder“ kann der VZD (bspw. für die Inbetriebnahme) auch ohne Tenant gestartet werden.

Die Struktur zum Anlegen einzelner CPS, welche die Fähigkeiten beinhalten, ist analog zum VZDType aufgebaut und verfügt ebenfalls über Methoden zum Hinzufügen („**addCPS**“), Entfernen („**remCPS**“) und durchsuchen nach Fähigkeiten („**searchForPackage**“).

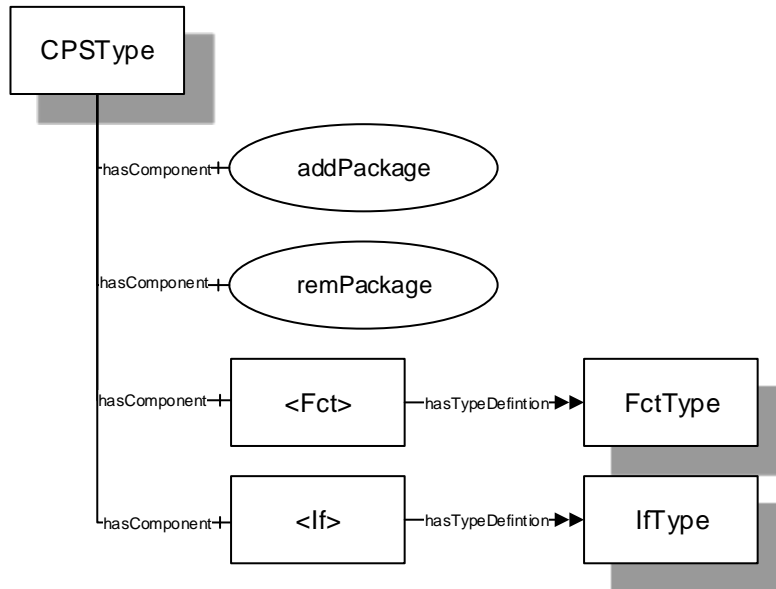


Abbildung 5.6: OPC UA-Informationsmodell des Verzeichnisdienstes (Teil 2)

Abbildung 5.6 zeigt den Aufbau des Informationsmodells für CPS „CPSType“. Der maßgebliche Teil besteht aus den beiden Methoden „**addPackage**“ und „**remPackage**“ zum Hinzufügen und Entfernen von Fähigkeiten, welche als Teil-Informationsmodelle innerhalb des VZD zur Verfügung stehen. Diese werden nach erfolgreichem Anlegen unterhalb des CPS als eigene Knoten („**Fct**“ oder „**If**“) als „Optional Placeholder“ modelliert. Zur Unterscheidung von Funktions- und Schnittstellenpaketen wurden sog. „FctType“ und „IfType“ eingeführt, innerhalb welcher die CPS Fähigkeiten abgebildet werden können. Hiermit können Fähigkeiten unterschieden werden, welche unmittelbar prozessrelevante Daten (Funktionspakete) und welche Meta-Daten (Schnittstellenpakete) zur Beschreibung und dem Verbindungsaufbau mit einer Schnittstelle enthalten.

5.2.2 Abbildung von CPS Fähigkeiten

Für die Architektur eines Verzeichnisdienstes für die serviceorientierte Produktionstechnik steht das gesamte Konzept im Vordergrund. Für die Abbildung von CPS Fähigkeiten wurde daher auf eine möglichst einfache Struktur zurückgegriffen und einzelne Fähigkeiten in zwei Kategorien erfasst.

Da ähnliche oder identische Fähigkeiten zentral bekannt sein müssen, um diese erkennen, verstehen und nutzen zu können, wurde eine hexadezimale Konvention zur Identifizierung eingeführt.

Regulärer Ausdruck:	Beispiel:
$(I F) [[:xdigit:]]\{6\}$	F01AB98
$(I F) [0-9, a-f, A-F]\{6\}$	I000000

Abbildung 5.7: Identifikation von Funktions- und Schnittstellenpaketen

Die Konvention (vgl. Abbildung 5.7) kann durch einen regulären Ausdruck verdeutlicht werden, um erlaubte und eindeutige IDs von Paketen zu definieren. Abbildung 5.7 zeigt des Weiteren zwei mögliche Beispiele. „F01AB98“ für die ID eines Funktionspakets und „I000000“ für die ID eines Schnittstellenpakets.

Die IDs werden durch den vorangestellten Buchstaben „F“ für Function oder „I“ für Interface in diese beiden Kategorien eingeteilt und besitzen im Anschluss eine sechsstellige, hexadezimale Nummer. Diese Konvention ist notwendig, da Fähigkeiten einerseits auf dem OPC UA-Server des VZD verfügbar sein müssen, um durch CPS angemeldet zu werden. Außerdem muss die Datensemantik eines Pakets einheitlich vorgegeben werden, um eine interoperable Nutzung zu ermöglichen. Bei der eigenständigen Definition der Semantik und Anmeldung eines Pakets durch jedes CPS, entstehen schnell Redundanzen und die Abbildung ähnlicher Fähigkeiten unter der Nutzung unterschiedlicher Informationsmodelle. Diese Redundanz soll durch eine zentrale Vorgabe von Paketen und die Möglichkeit der Erweiterbarkeit vermieden werden.

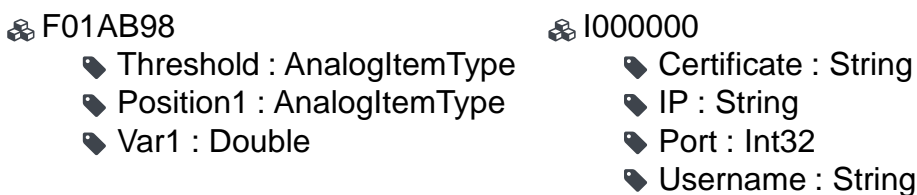


Abbildung 5.8: Beispielhaftes Modell eines Funktions- und Schnittstellenpakets

Die Teil-Informationsmodelle für die Beschreibung der Fähigkeiten müssen sich hierbei an die Modellierungsregeln von OPC UA-Informationsmodellen halten, können folglich jedoch auf alle existierenden Datentypen und Strukturen zurückgreifen, welche in diesen

enthalten sind. Die Pakete für Fähigkeiten können daher stark objektorientiert beschrieben werden, um eine möglichst große Wiederverwendbarkeit von wiederholenden Elementen zu ermöglichen. Abbildung 5.8 beschreibt den Aufbau eines Funktionspakets mit drei Variablen. „**Threshold**“ und „**Position1**“ als sog. *AnalogItemType*, welcher eine Struktur mit Einheit und Wert verschiedener Datentypen annehmen kann. „**Var1**“ als einfachen Datentyp *Double*. Das Schnittstellenpaket ist mit vier Variablen beschrieben, welche Metainformationen zum Verbindungsaufbau an dieser Schnittstelle bereitstellen:

- „**Certificate**“: Das Zertifikat (als *String*)
- „**IP**“: Die IP-Adresse (als *String*)
- „**Port**“: Der Port einer Anwendung (als *Integer*)
- „**Username**“: Der Benutzername (als *String*)

5.2.3 Verzeichnisdienst Server Logik

Die Komponente „Server Logik“ nach Abbildung 5.3 enthält die maßgebliche Anwendungslogik zur Interaktion des VZD mit Clients, welche Fähigkeiten anmelden oder eine Selektion durch Ermittlungen bestimmter Fähigkeiten durchführen möchten.

Abbildung 5.9 stellt ein vereinfachtes Klassendiagramm des VZDTypes mit den relevanten Variablen und Methodenaufrufen dar. Die zwei Variablen „nodeId“ und „name“ beschreiben den Wurzelknoten des VZD in Form der eindeutigen ID im OPC UA-Namensraum sowie einem Namen zur Darstellung des Knotens.

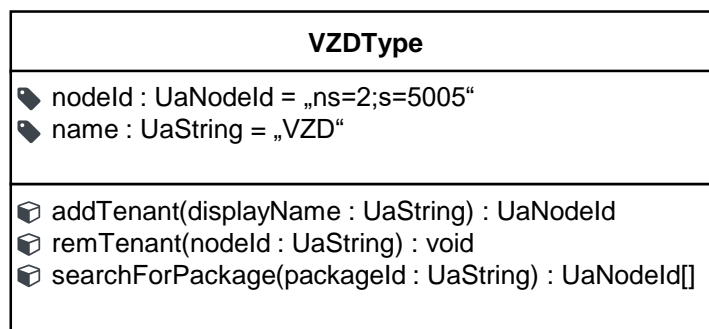


Abbildung 5.9: Klassendiagramm der Klasse VZDType

Die elementaren Aufgaben innerhalb der Logik übernehmen die drei Funktionen „addTenant“, „remTenant“ und „searchForPackage“, deren Aufgabe im Folgenden beschrieben werden:

addTenant: Die Methode liefert als Ergebnis einen Wert vom Typ *UaNodeId* und wird mit einem Eingabeparameter „displayName“ aufgerufen. Der Eingabewert entspricht dem Namen des Mandanten, welcher als neue Instanz in der Multi-Tenant-Architektur einen isolierten Bereich zugewiesen bekommt. Der Wurzelknoten dieses Bereichs wird durch den Ergebniswert der Methoden identifiziert. Diesem können neue CPS inkl. Fähigkeiten untergeordnet werden, die diesem Mandanten zugeordnet sind. Die Ausführung der Methode gilt als erfolgreich abgeschlossen, wenn eine leere Instanz des Mandanten inkl. zugehörigem Informationsmodell auf Basis des „TenantType“ erstellt wurde.

remTenant: Die Methode liefert kein Ergebnis und wird durch den Eingabeparameter „nodeId“ aufgerufen. Die Methode entfernt eine Instanz aus der Multi-Tenant-Architektur, welche durch den Eingabeparameter identifiziert wird (vgl. Ergebniswert von addTenant). Die Ausführung der Methode gilt als erfolgreich abgeschlossen, wenn der Wurzelknoten und alle darunterliegenden Kindknoten eines Mandats aus dem OPC UA-Namensraum entfernt wurden.

searchForPackage: Die Methode liefert als Ergebnis eine Liste vom Typ *UaNodeId* und wird mit dem Eingabeparameter „packageId“ aufgerufen. Sie stellt die elementare Methode dar, der Aufgabe nach einer Anfragesprache zur Selektion der Aufgabenträger gerecht zu werden. Die Methode durchsucht den ihr untergeordneten Baum (auf Höhe des VZDTypes entspricht das allen Knoten, auf Höhe des TenantTypes entspricht das allen Knoten eines Mandants) auf Basis des Eingabeparameters. Dieser enthält die ID eines Pakets zur Identifikation kompatibler CPS Fähigkeiten. Zur Verifikation wird die Eingabe mit Hilfe der Konvention aus Abschnitt 5.2.2 überprüft. Der Ergebniswert wird in Form einer Liste aller gefundenen Pakete ausgegeben. Entscheidend ist, dass ein Element dieser Liste den direkten Aufruf der dazugehörigen Fähigkeit ermöglicht. Es wird die ID des Pakets und nicht des CPS weitergegeben, um einen direkten Aufruf der Fähigkeit zu ermöglichen. Für die Erfassung weiterer Informationen zu dem dazugehörigen CPS kann auf OPC UA-Spezifikation und den Aufbau des Namensraums zurückgegriffen werden.

5.2.4 Verzeichnisdienst Client Logik

Der Server Logik steht zeitgleich eine Client Logik gegenüber, welche im Rahmen dieser Arbeit lediglich als Prozess beschrieben wird. Die Implementierung muss in jedem CPS

separat auf Basis der vorherrschenden Programmierumgebung/-sprache realisiert werden, welche meist eine Dokumentation zur Nutzung eines OPC UA Clients mitbringt. Abbildung 5.10 veranschaulicht ein Ablaufdiagramm nach UML für die Verzeichnisdienst-Client Logik, welche bspw. innerhalb eines Anwenderprogramms einer SPS-Steuerung auf Basis von IEC 61131-3 realisiert werden kann.

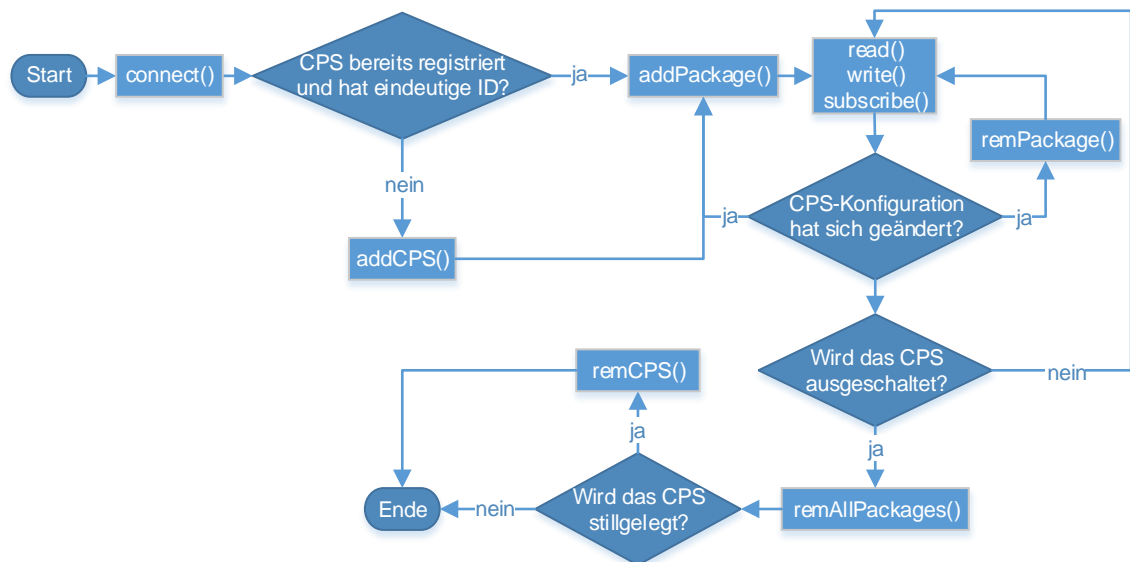


Abbildung 5.10: Ablaufdiagramm der Client Logik für den Verzeichnisdienst

Nachdem Start muss zunächst ein „**connect**“ durchgeführt werden, welcher zu der Entscheidung führt, ob das CPS bereits am VZD registriert ist. Falls nicht, muss zunächst das CPS hinzugefügt werden, um im Anschluss Pakete Fähigkeiten am CPS anzumelden. Die Inhalte der Fähigkeiten können mit den Standardaufrufen von OPC UA *read*, *write* und *subscribe* angepasst werden.

Bei einer Änderung der CPS-Konfiguration muss die Teilmenge der Fähigkeiten ggf. angepasst werden.

Wird das CPS ausgeschaltet, so werden alle angemeldeten Fähigkeiten entfernt und im Falle eines Stilllegens wird ebenfalls das CPS aus dem Verzeichnisdienst entfernt.

Um mit dem VZD kompatibel zu sein, muss ein CPS einen OPC UA Client besitzen, welcher die Features *read*, *write*, *subscribe* und *call* nach der OPC UA-Spezifikation unterstützt. Mit Hilfe dieser besteht die Möglichkeit alle notwendigen Schritte vom Verbindungsaufbau über die Registrierung, den Fähigkeitsaustausch sowie das Abmelden und Stilllegen durchzuführen.

Entscheidend ist die Möglichkeit der Rekonfiguration zur Laufzeit des CPS sowie des VZD. Mit dem Aufruf der Methoden „addPackage“ und „remPackage“ kann das CPS auf sich ändernde Konfigurationen Einfluss nehmen und ein Abbild der neuen Fähigkeitsmenge im VZD anmelden. Beispiele aus der Praxis sind ein Werkzeugwechsel eines Roboters (Änderungen in den Funktionen) oder das Einschalten einer Netzwerkkamera (Hinzufügen einer Schnittstelle).

5.2.5 LDAP-Connector

Der LDAP-Connector stellt in der Systemarchitektur die Verbindung zum LDAP-fähigen Verzeichnisdienst aus der vorherrschenden Office-IT-Struktur dar. Da zahlreiche Bibliotheken und Implementierungen existieren, welche alle einen ähnlichen Funktionsumfang liefern, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher auf den Einsatz der Bibliothek eingegangen. Innerhalb der Anwendung wird eine kompatible Bibliothek eingesetzt, welche sich in den bestehenden Quellcode integrieren lässt.

5.3 Integration bestehender Companion Specifications

Die Nutzung von Companion Specifications als Funktions- oder Schnittstellenpakete stellen für den VZD einen entscheidenden Vorteil dar. Die Bildung von 15 Arbeitskreisen innerhalb des VDMA zur Erarbeitung von OPC UA Companion Specifications für unterschiedliche Domänen und Branchen verdeutlicht die Notwendigkeit interoperabler Kommunikation (Faath 2019).

Die Architektur des Verzeichnisdienstes für eine serviceorientierte Produktionstechnik profitiert von diesen Entwicklungen unmittelbar durch die Nutzung der zugrundeliegenden Informationsmodelle. Diese können zur Abbildung entsprechender Funktionen oder Schnittstellen genutzt werden, und stehen damit als herstellerübergreifendes Standardpaket zur Verfügung.

Die Integration einer Companion Specification ist am Beispiel des „OPC UA Information Model for CNC Systems“ des VDW dargestellt (OPC Foundation 2017). Der Standard beschreibt eine OPC UA-Schnittstelle für CNC-Maschinen und bildet Komponenten (z.B. Achsen und Spindeln) als eigene Objekte mit allen notwendigen und relevanten Parametern ab. Des Weiteren ist im Informationsmodell der funktionale Zusammenhang

(CNC-Kanäle, etc.) der Komponenten abgebildet und wird durch Alarme sowie Benachrichtigungen als Events ergänzt.

Der Einstieg für die Abbildung eines CNC Systems ist durch den Knotentyp „CncInterfaceType“ spezifiziert. Dieser Typ kann als Typdefinition für ein Funktionspaket mit eindeutiger ID (bspw. „F000002“) innerhalb des VZD genutzt und somit allen Teilnehmern zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 5.11 verdeutlicht die Integration dieser Companion Specification als Funktionspaket „F000002“ innerhalb des CPSType und stellt die Integration in der OPC UA-Notation dar.

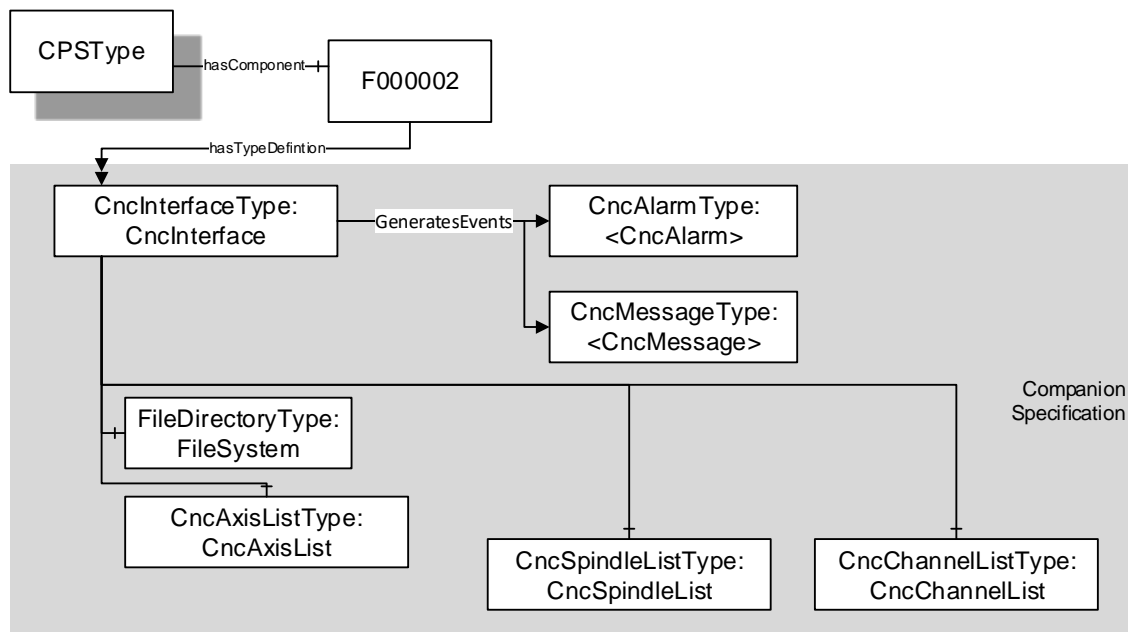


Abbildung 5.11: Beispiel der Integration einer Companion Specification

Die Nutzung bestehender Informationsmodelle sowie veröffentlichter Companion Specifications ist somit innerhalb des VZD möglich und kann innerhalb von CPS genutzt werden. Für die Abbildung von Fähigkeiten kann somit auf bestehende und sukzessive entstehende Standards zurückgegriffen werden.

5.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel zeigt auf Basis des vorangegangenen Technologievergleichs die Architektur für einen Verzeichnisdienst für die serviceorientierte Produktionstechnik auf Seiten der CPS-Anbindung.

Die Architektur wird den Aufgaben zur Verwaltung und Selektion von Aufgabenträgern gerecht, indem innerhalb eines entworfenen Informationsmodelles eine Multi-Tenant-Architektur aufgebaut sowie Fähigkeiten von CPS abgebildet werden können. Das Informationsmodell gibt dabei die Modellierungsregeln für den OPC UA-Server vor, welcher sämtliche Informationen in einem Netzwerk bereitstellt.

Die CPS Fähigkeiten werden auf Basis einer Konvention identifiziert und können dann als Teil-Informationsmodelle unter Berücksichtigung der OPC UA-Spezifikation modelliert werden.

Zur Realisierung der Funktionalität des Verzeichnisdienstes wurde die notwendige Anwendungslogik für den Server und den Client entworfen. Die Server Logik wurde mit UML-Diagrammen zu Sequenzen und der notwendigen VZDType-Klasse schematisch dargestellt und die Abläufe sowie zugehörigen Methoden beschrieben.

Für die Client Logik wurde ein Ablaufdiagramm erstellt, welches die Realisierung der Logik in verschiedenen CPS ermöglicht. Die Umsetzung erfolgt hierbei unter Nutzung vorliegender OPC UA-Client-Bibliotheken.

Alle notwendigen Komponenten eines Verzeichnisdienstes auf der Seite der Produktionstechnik wurden mit Hilfe der Technologie OPC UA entworfen und dargestellt. Zur Integration in Office-IT-Strukturen wurde die Architektur um einen LDAP-Connector ergänzt, welcher die erfassten Informationen in LDAP-basierte Verzeichnisdienste synchronisiert.

Zur Integration in vorherrschende IT-Strukturen ist der Entwurf eines LDAP-Schemas notwendig.

6 Integration in vorherrschende IT Strukturen

In diesem Kapitel sollen die Informationen innerhalb des OPC UA-Servers der VZD Architektur in vorherrschende IT Strukturen integriert werden. Im Rahmen der Entwurfsentscheidung ist LDAP die zugrundeliegende Technologie der meisten Office-IT Strukturen und somit Basis für die Synchronisation zwischen Produktions-IT bzw. OT und Office-IT.

Die folgenden Abschnitte geben zunächst eine Übersicht über den Zusammenhang zwischen OPC UA-Knoten und Namensräumen, um den Aufbau von Informationsmodellen im Gesamten zu verdeutlichen. Im Anschluss werden verschiedene Ansätze gegenübergestellt, die es ermöglichen diese Informationsmodelle in LDAP-Strukturen abzubilden. Ein Vergleich der Ansätze soll zu einer Entscheidung führen, auf Basis welcher ein LDAP-Schema zur Abbildung von OPC UA-Modellen entworfen werden kann (Howes et al. 2006).

6.1 Übersicht von OPC UA Knoten und Zusammenhang mit Namensräumen

Um den Zusammenhang von OPC UA-Knoten und Namensräumen zu verstehen, ist zunächst ein grundlegendes Verständnis des OPC UA-Datenmodells notwendig. Grundsätzlich werden Daten innerhalb von OPC UA in sog. Knoten (eng. Nodes) gespeichert, welche jeweils einen von acht verschiedenen Typen (vgl. OPC UA Spezifikation – Part 3 (IEC 62541)) annehmen können und als gerichteter Graph gespeichert werden. Innerhalb dieses Graphs kann ein Knoten mehrere Elternknoten besitzen. Der Einstieg in den Graph erfolgt über das Wurzelement „Root“ und enthält darunter die folgenden drei Knoten als Ordner:

- „Objects“ enthält alle Instanzen von Knoten, welche Daten enthalten.
- „Types“ enthält alle verfügbaren Typen, welche dem Server bekannt sind und von Knoten angenommen werden können.
- „Views“ enthält alle verfügbaren Views innerhalb des Servers und hat für die Inhalte dieser Arbeit keine weitere Relevanz.

Der gesamte Graph eines OPC UA-Servers kann in verschiedene Namensräume aufgeteilt werden, um bspw. verschiedene Domänen zu adressieren oder die Inhalte verschiedener Datenquellen besser zu strukturieren. Die Knoten innerhalb eines Namensraums können Elternknoten aus einem anderen Namensraum besitzen und bilden somit ein Konstrukt aus verschiedenen Namensräumen, die miteinander verbunden sind. Abbildung 6.1 stellt diesen Zusammenhang dar und zeigt die Referenz von „Namensraum 2“ mit dem Modell einer „Maschine 1“ (inkl. dazugehöriger Komponenten, etc.) in den Ordner „Objects“ von „Namensraum 1“.

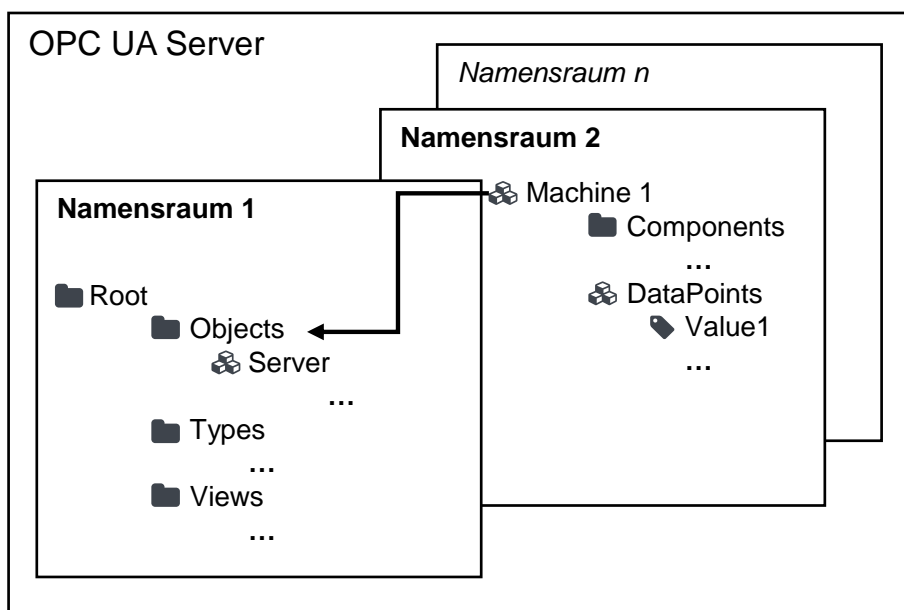


Abbildung 6.1: Nutzung verschiedener Namensräume in einem OPC UA-Server

Alle verfügbaren Namensräume eines Servers werden in einer zentralen Namespace-Tabelle gespeichert und mit einem Index identifiziert. Somit erhält ein Client eine Übersicht aller verfügbaren Namensräume.

Für die Abbildung eines vollständigen Informationsmodells müssen alle Eigenschaften und Abhängigkeiten (Type des Knoten, Namensraum, Elternknoten, etc.) erhalten bleiben und zeitgleich in die Baumstruktur eines LDAP-Verzeichnisses gebracht werden. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass ein Knoten nur einen Elternknoten hat und folglich in einer abgeleiteten Baumstruktur nicht zweimal vorkommt (theoretisch ist es nach OPC UA-Spezifikation möglich, die Instanz eines Knotens doppelt als Kindknoten zu referenzieren).

Hierfür werden im Folgenden drei Ansätze vorgestellt, welche im Anschluss gegenübergestellt werden.

6.2 Ansätze zur Abbildung von OPC UA-Servern in LDAP

Die Ansätze können wie folgt unterschieden werden:

- Knoten als Liste unterhalb der zugehörigen Namensräume
- Knoten als Baum unterhalb der zugehörigen Namensräume
- Knoten als Baum außerhalb der zugehörigen Namensräume

6.2.1 Knoten als Liste unterhalb deren Namensräume

Der erste Ansatz orientiert sich an der technischen Datenstruktur im Arbeitsspeicher eines OPC UA-Servers. Die Knoten liegen hierbei als einfache Liste innerhalb ihrer zugehörigen Namensräume (vgl. Abbildung 6.2) und werden auf diese Art in der Baumstruktur des LDAP-Verzeichnisdienstes abgebildet.

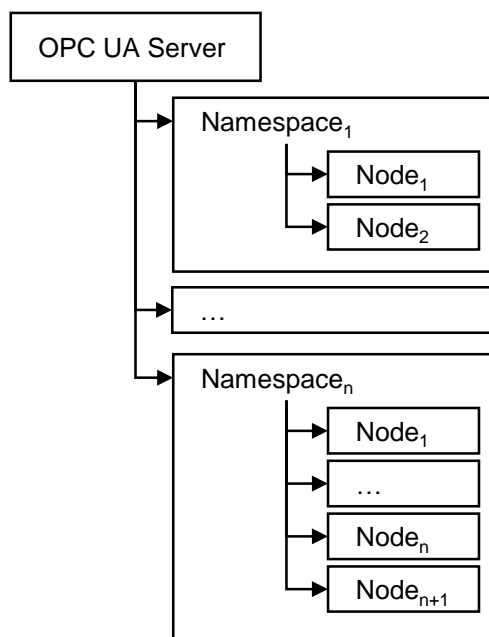


Abbildung 6.2: Abbildung der Knoten als Liste im Namensraum

Jeder Knoten enthält zusätzliche Informationen zu seinem dazugehörigen Eltern- und Kindknoten. Somit kann die resultierende Baumstruktur der Knoten untereinander durch ein Auslesen dieser Informationen generiert werden.

Aus diesem Ansatz ist die Baumstruktur aus dem OPC UA-Server in LDAP nicht ersichtlich und die performante Unterstützung solcher Strukturen wird durch LDAP nicht genutzt.

6.2.2 Knoten als Baum unterhalb deren Namensräume

Der zweite Ansatz nutzt die Möglichkeit von Baumstrukturen in LDAP und stellt die Knoten des OPC UA-Servers in einer Baumstruktur unterhalb ihrer Namensräume dar (vgl. Abbildung 6.3).

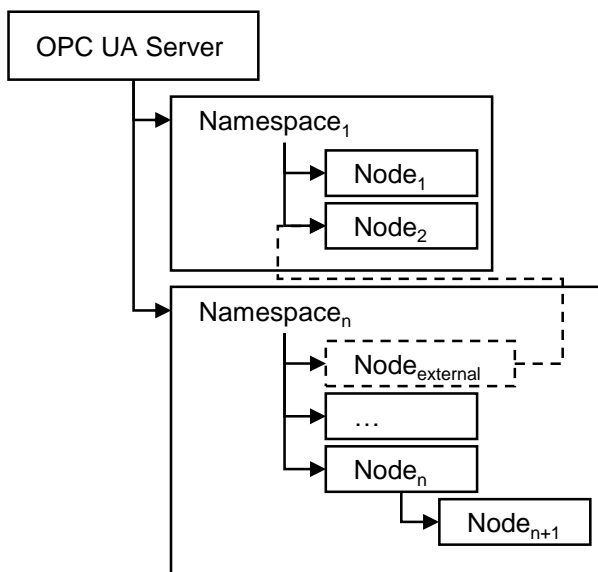


Abbildung 6.3: Abbildung der Knoten als Baum im Namensraum

Da Knoten Elternknoten aus einem anderen Namensraum besitzen können (vgl. Abschnitt 6.1), werden sog. externe Knoten eingeführt. Diese dienen als virtueller Platzhalter im LDAP-Verzeichnisdienst, um die Struktur des Baumes zu erhalten, verweisen jedoch direkt auf einen Knoten innerhalb eines anderen Namensraumes. Hierdurch sind der Aufbau und die Zuordnung von Knoten innerhalb von LDAP sofort ersichtlich. Dieser Ansatz erlaubt, aufgrund der Stärken von LDAP-Verzeichnisdiensten, performante Manipulationen (z.B. Lösch- oder Verschiebeoperationen) von Namensraum-Strukturen.

6.2.3 Knoten als Baum außerhalb deren Namensräume

Der dritte Ansatz orientiert sich an der Ansicht eines OPC UA-Servers durch einen OPC UA-Client. Dieser erhält eine Baumstruktur aller Knoten unabhängig ihrer Namensräume. Der Ansatz besteht daher aus einer einzigen - Namensraum unabhängigen - Baumstruktur, welche allen Knoten eine klare Zuordnung zu ihren Elternknoten ermöglicht (vgl. Abbildung 6.4).

Die Namensräume werden als separate Objekte im LDAP-Verzeichnis geführt, um eine Übersicht aller Namensräume zu erhalten.

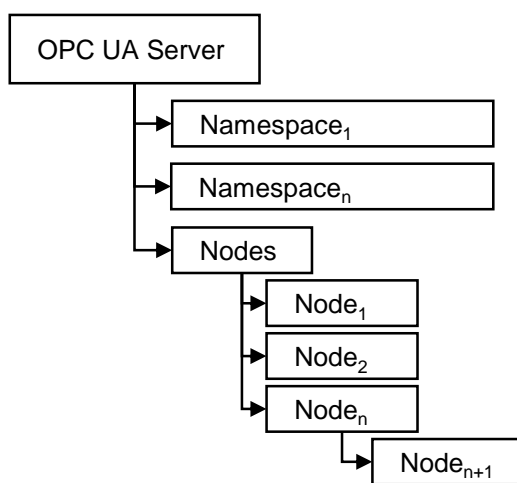


Abbildung 6.4: Abbildung der Knoten als Baum außerhalb des Namensraums

Das LDAP-Schema muss für diesen Ansatz ein zusätzliches Attribut im Knotenobjekt vorsehen, um die Zugehörigkeit eines Knotens zu seinem Namensraum zu gewährleisten.

Dieser Ansatz nutzt die performante Baumstruktur eines LDAP-Verzeichnisses aus, ohne die Notwendigkeit der externen Knoten. Andererseits ist der Aufwand zur Löschung eines Namensraums höher, da alle zugehörigen Knoten zunächst gesucht werden müssen.

6.3 Vergleich der Ansätze

Im Vergleich zeigen der erste und zweite Ansatz einen möglichen Überblick der gesamten Struktur aus Knoten erst nach Auswertung aller Namensräume und nutzen zum Teil die performanten Eigenschaften von LDAP-Verzeichnissen nicht aus. Des Weiteren besteht innerhalb dieser Ansätze die Möglichkeit, dass ein Elternknoten nicht existiert und die

Struktur dennoch im LDAP-Verzeichnis verfügbar ist, was zu Inkonsistenzen in der Synchronisierung zwischen OPC UA- und LDAP-Server führen kann (Kretschmer et al. 2018b).

Der dritte Ansatz besitzt diese Nachteile nicht, garantiert jedoch keine Zugehörigkeit eines Knotens zu einem Namensraum. Knoten können daher ohne Namensraum existieren, bspw. um die Baumstruktur in Takt zu halten und keine „schwebenden“ Zweige zu erzeugen.

Ein Vergleich der Ansätze unter Berücksichtigung einzelner Kriterien ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

Die Ansätze werden bewertet nach:

- Ausnutzung der Performanz, nach welcher LDAP-Strukturen entworfen wurden
- Abbildung der hierarchischen Struktur des OPC UA-Servers im Baum
- Alle Knoten besitzen einen Elternknoten
- Alle Knoten besitzen einen Namensraum
- Keine Nutzung des Konzepts „externer Knoten“

	Nutzung der LDAP-Struktur	Hierarchische Struktur im Baum abgebildet	Alle Knoten besitzen einen Elternknoten	Alle Knoten besitzen einen Namensraum	Keine Nutzung externer Knoten
Knoten als Liste unterhalb deren Namensräume	-	-	-	+	+
Knoten als Baum unterhalb deren Namensräume	+	o	+	+	-
Knoten als Baum außerhalb deren Namensräume	+	+	+	-	o

+ gut | o neutral / keine Aussage | - schlecht

Tabelle 6.1: Vergleich der Ansätze zur Abbildung von OPC UA in LDAP

Ansatz zwei und drei sind identisch bewertet und können daher zur Umsetzung in Betracht gezogen werden. Da Ansatz drei der realen Abbildung der Knoten eines OPC

UA-Servers entspricht, sollte dieser Ansatz bevorzugt werden, da bspw. die Durchführung von Debugging-Aufgaben oder die Ursachenforschung vereinfacht wird.

6.4 Mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten

Alle drei Ansätze berücksichtigen bisher keine mehrfache Referenz eines Knotens. Gemäß OPC UA-Spezifikation ist es möglich dieselbe Instanz eines Knotens als Kind an zwei verschiedenen Elternknoten zu referenzieren.

Um dies ebenfalls in der strikten Baumstruktur des LDAP-Verzeichnisses zu ermöglichen, müssen die Ansätze zwei und drei erweitert werden. Die mögliche Lösung ist analog zu Ansatz zwei der virtuelle Platzhalter, welcher als externer Knoten realisiert wird und als Attribut lediglich die Adresse eines realen Knotens besitzt. Somit ist es möglich zusätzliche Referenzen auf einen Knoten zu realisieren (vgl. Abbildung 6.5).

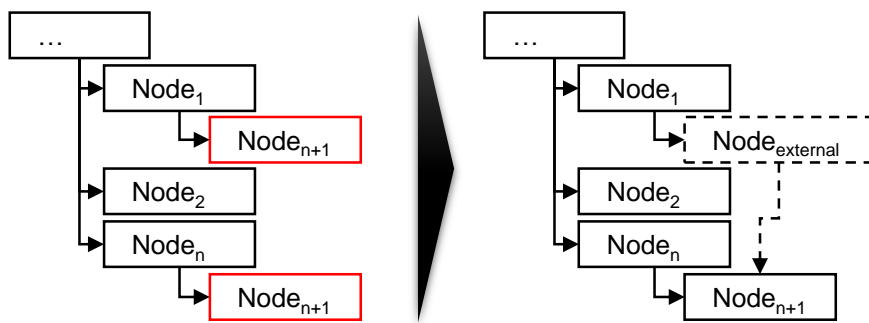


Abbildung 6.5: Abbildung von Mehrfach-Referenzen eines Kindknoten in LDAP

Da Ansatz zwei bereits das Konzept dieser virtuellen Platzhalter nutzen würde, um Knoten aus anderen Namensräumen als Elternknoten in einem fremden Namensraum nutzbar zu machen, steigt in diesem Ansatz die Komplexität unverhältnismäßig an und eignet sich daher nicht mehr zur Umsetzung.

Ansatz drei ist daher die logische Wahl zur Realisierung eines LDAP-Schemas und der Abbildung von OPC UA-Namensräumen.

6.5 LDAP-Schema für OPC UA

6.5.1 Abbildung der OPC UA-Informationen

Vergleicht man die OPC UA-Spezifikation mit Erläuterungen zu LDAP, lassen sich Parallelen zwischen OPC UA-Knoten und LDAP-Objekten feststellen. Innerhalb von LDAP-Verzeichnissen werden Objekte miteinander in Beziehung gesetzt, werden durch einen Satz von Eigenschaften (sog. Attributen) beschrieben und können in sog. Objektklassen dem objektorientierten Entwurf folgen. OPC UA-Knoten unterliegen einem ähnlichen Paradigma und werden objektorientiert entworfen sowie durch Attribute beschrieben.

Zur Umsetzung des o.g. Ansatzes der Abbildung von OPC UA in LDAP müssen die folgenden Objektklassen im LDAP-Schema definiert werden:

OpcUaServer repräsentiert ein OPC UA-Serverobjekt. Hierunter liegen Knoten und Namensräume als Objekte. Diese Klasse besitzt keine Attribute.

Namespace repräsentiert einen Namensraum und erlaubt als Elternknoten das Objekt *OpcUaServer*. Die Klasse enthält das Attribut *UniformResourceIdentifier* zur eindeutigen Identifikation des Namensraumes.

Nodes können die o.g. acht möglichen Knotentypen (sog. NodeClasses) annehmen und enthalten unterschiedliche Teilmengen von Attributen. Die Typen sind nach OPC UA-Spezifikation Teil 3 (IEC 62541) in Tabelle 6.2 dargestellt und können in Instanzen (enthalten die realen Informationen) und Typen (vererben Ihren Entwurf an eine Instanz) differenziert werden.

NodeClasses				
Instanzen	Variable	Object	Method	View
Typen	VariableType	ReferenceType	ObjectType	DataType

Tabelle 6.2: Übersicht von OPC UA-NodeClasses

Abbildung 6.6 zeigt die Vererbungshierarchie, welche zur Abbildung der Knotentypen in LDAP-Klassen genutzt werden kann. *BaseNode* stellt damit das oberste Element dar von

welchem alle Instanzen sowie die abstrakte Klasse *TypeNode* erbt. Die Typen erben Attribute im Anschluss von *TypeNode*.

Hierbei werden die unterschiedlichen Teilmengen von Attributen in erster Line den Instanzen und den Typen zugeordnet. Attribute, welche für alle Knoten gelten, sind in der Klasse *BaseNode* abgebildet. *TypeNode* enthält alle zusätzlichen Attribute für die Typen.

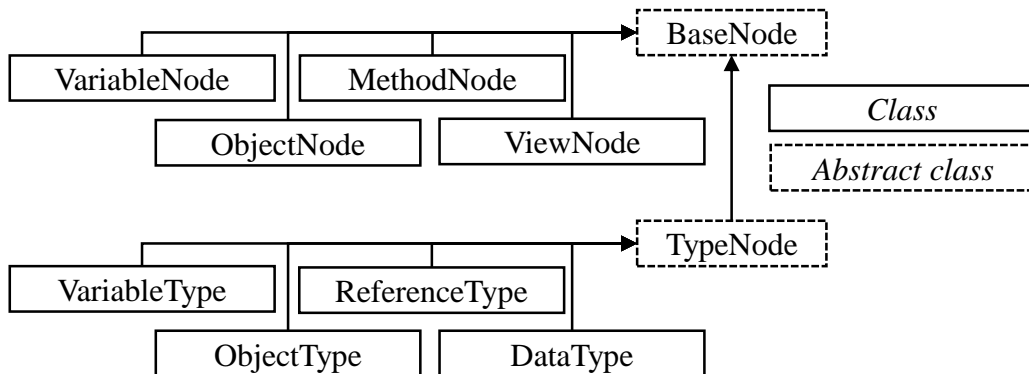


Abbildung 6.6: Vererbungshierarchie des LDAP-Schema für OPC UA

Aus der OPC UA-Spezifikation erhält man alle möglichen Attribute der Knotentypen sowie deren verpflichtende (eng. mandatory) oder optionale (eng. optional) Zugehörigkeit zu einem Knotentyp. Um die Attribute nun der Vererbungshierarchie des LDAP-Schemas zuzuordnen, muss eine Übersicht der Zugehörigkeiten zwischen Attribut und Knotentyp abgebildet werden. Diese ist in Tabelle 6.3 dargestellt.

Darüber hinaus verdeutlicht die Tabelle die Attribute der übergeordneten, abstrakten LDAP-Klassen *BaseNode* und *TypeNode*.

Attribute	NodeClasses								Übergeordnete LDAP-Klasse
	Instanzen				Typen				
	Variable	Object	Method	View	Variable-Type	Reference-Type	Object-Type	DataType	
BrowseName	m	m	m	m	m	m	m	m	BaseNode
Description	o	o	o	o	o	o	o	o	
DisplayName	m	m	m	m	m	m	m	m	
NodeClass	m	m	m	m	m	m	m	m	
NodeId	m	m	m	m	m	m	m	m	
Reference-ToParent	m	m	m	m	m	m	m	m	

WriteMask	o	o	o	o	o	o	o	o	
AccessLevel	m								
ArrayDimensions	o				o				
ContainsNoLoops				m					
DataType	m				m				
EventNotifier		m		m					
Executable			m						
Historizing	m								
InverseName						o			
IsAbstract					m	m	m	m	Type-Node
MinimumSamplingInterval	o								
Symmetric						m			
Value	m				o				
ValueRank	m				m				
m: mandatory o: optional									

Tabelle 6.3: Übersicht der OPC UA-Attribute und deren Knotentypzugehörigkeit

Auf Basis der gesammelten Informationen aus der OPC UA-Spezifikation und der Ableitung des Aufbaus eines LDAP-Schemas, lassen sich die Objektklassen und Attribute nun im sog. LDAP Data Interchange Format (LDIF) beschreiben. LDIF ist ein Standard zur Beschreibung von Verzeichnisdiensteinträgen in LDAP-Verzeichnissen und ist nach dem RFC2849 spezifiziert (Good 2000; Howes et al. 2006).

Zu Beginn des Schemaentwurfs wurde der globale Object Identifier (OID) 1.3.6.1.4.1.48279 bei der Internet Assigned Numbers Authority (IANA) registriert, um das LDAP-Schema für OPC UA international einheitlich zu identifizieren. Daran angeschlossen werden alle erstellten Objektklassen und Attribute nummeriert (vgl. Anhang Abbildung 9.1).

Zur exemplarischen Verdeutlichung des Entwurfs ist in Abbildung 6.7 die abstrakte Objektklasse BaseNode dargestellt. Diese musste für die Abbildung innerhalb eines LDAP-Verzeichnisses um das Attribut „referenceToParent“ erweitert werden, um die Beziehung zum Elternknoten zu beschreiben. Im Gegensatz zu LDAP kann dies innerhalb von OPC UA über eine Definition der Kante erfolgen.

```

objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.3 NAME 'baseNode'
  DESC 'IEC 62541-3:2015 The OPC UA Address Space Model defines a Base
  NodeClass from which all other NodeClasses are derived.'
  SUP top
  ABSTRACT
  MUST ( browseName $ displayName $ nodeClass $ nodeId $ referenceToPar-
ent )
  MAY ( description $ writeMask ) )

```

Abbildung 6.7: LDAP-Schema der Objektklasse BaseNode

Die Beschreibung beginnt mit der OID, weiteren Parametern zur Identifikation und Beschreibung des Elements. Am Ende des Schema-Abschnitts werden die verpflichtenden und optionalen Attribute mit „MUST“ oder „MAY“ definiert.

Abbildung 6.8 verdeutlicht die Beschreibung eines Attributs am Beispiel von nodeId.

```

attributetype ( 1.3.6.1.4.1.48279.1.2 NAME 'nodeId'
  DESC 'Identifies the node'
  SINGLE-VALUE
  USAGE userApplications )

```

Abbildung 6.8: LDAP-Schema des Attributs nodeId

Ein Attribut wird ebenfalls über die OID sowie einen Namen und eine Beschreibung definiert. Im Anschluss besteht die Möglichkeit, weitere Charakteristiken des Attributs und eine optionale Syntaxbeschreibung zu bestimmen.

6.5.2 Erweiterung für mehrfaches Referenzieren eines Kindknoten

Für die Abbildung von mehrfachen Referenzen auf einen Kindknoten wurde das Konzept von externen Knoten (eng. external nodes) verfolgt. Hierzu wurde ein weiteres Objekt entworfen, welches den Typ der Referenz zum Elternknoten sowie die ID des Knotens beinhaltet. Die Klasse ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

```

objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.13 NAME 'externalNode'
  DESC 'Extension for mapping multiple referenced OPC UA nodes within
the tree structure of LDAP.'
  SUP top
  STRUCTURAL
  MUST ( nodeId $ referenceToParent ) )

```

Abbildung 6.9: LDAP-Schema für die Objektklasse externer Knoten

Das komplette LDAP-Schema wurde dieser Arbeit in Abbildung 9.1 hinzugefügt.

6.6 Zusammenfassung

Das Kapitel beschreibt einen Ansatz zur Abbildung von Namensräumen eines OPC UA-Servers in LDAP-Verzeichnisdiensten und entwirft im Anschluss das notwendige LDAP-Schema, um sämtliche Namensräume, deren Beschreibungen und Knoten vollständig abzubilden.

Hierbei wurden die verschiedenen möglichen Knotentypen sowie deren Attribute berücksichtigt und in einem objektorientierten Entwurf auf das LDAP-Schema übertragen.

Mit Hilfe dieses Schemas ist es möglich alle Informationen zwischen OPC UA-Server und LDAP-Verzeichnisdienst einheitlich zu synchronisieren.

7 Anwendung und Realisierung

Die entworfene Architektur für einen Verzeichnisdienst für die serviceorientierte Produktionstechnik adaptiert einerseits das Konzept von Verzeichnisdiensten aus der Office-IT und lässt andererseits die Anwendung des SOA Paradigmas in der Produktionstechnik zu. Das SOA-Dreieck (vgl. Abschnitt 3.2.3) lässt sich auf eine Anwendung für die serviceorientierte Produktionstechnik überführen. Abbildung 7.1 stellt diesen Zusammenhang dar und verdeutlicht das Verhältnis von CPS mit einem VZD für die OT. Losgelöst von ihrer Anwendungslogik können CPS Fähigkeiten bereitstellen oder von verfügbaren CPS suchen. Der Datenfluss erfolgt direkt zwischen den beiden CPS. Alle verfügbaren Fähigkeiten aus der OT werden über den o.g. Brückenschlag in einen Verzeichnisdienst der IT synchronisiert und Office-IT Applikationen verfügbar gemacht. Folglich ist der Status verfügbarer Ressourcen in beiden Welten transparent.

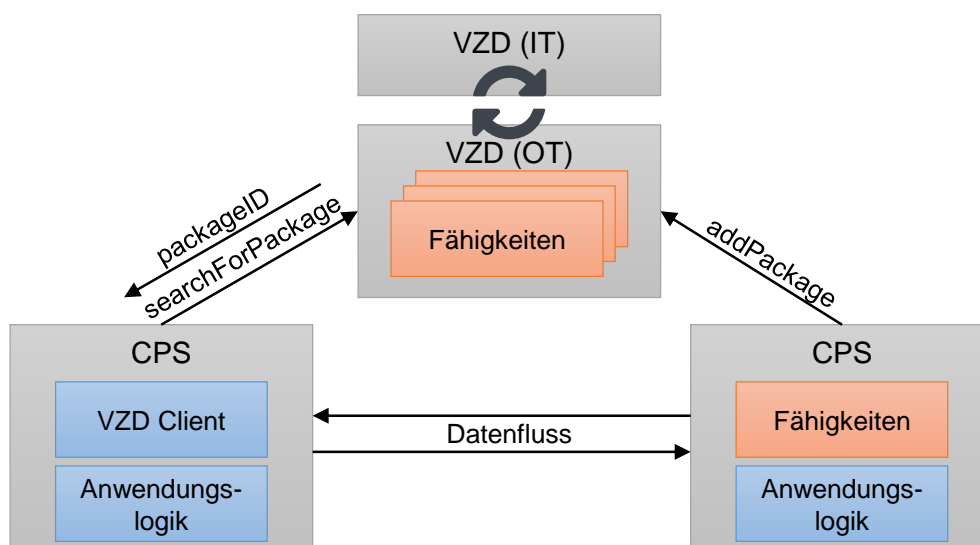


Abbildung 7.1: SOA-Dreieck für die serviceorientierte Produktionstechnik

Dies soll im Folgenden an einem Beispiel und einem realen Anwendungsfall demonstriert werden. Innerhalb des Kapitels wird zunächst der Anwendungsfall anhand von wandlungsfähiger Montagetechnik vorgestellt. Hierzu wird die dazugehörige Softwarearchitektur in einem Überblick vorgestellt und die Identifikation abzubildender Informationsmodelle vorgenommen. Nach der Integration in die bestehende Softwarearchitektur wird die Nutzung des Verzeichnisdienstes in Form eines Sequenzdiagramms dargestellt.

7.1 Vorstellung des Anwendungsfalls: Wandlungsfähige Montage- technik – CESA³R

Vorwort: Die folgenden Ergebnisse sind in Kooperation mit dem Dissertationsvorhaben von Marian Vorderer und der Robert Bosch GmbH entstanden (Verl et al. 2016; Vorderer et al. 2016b; Vorderer et al. 2018). Der physische Aufbau sowie das Konzept hinter der wandlungsfähigen Montagetechnik entstand in der Arbeit Vorderer, die Kommunikations-Middleware zur Vernetzung und dem Datenaustausch der Komponenten sowie die Integration in übergeordnete Dienste, sind Ergebnisse dieser Arbeit.

Das „Concept for Engineering free, Scalable, Advanced Automated Assembly systems for Rapid ramp up“ (CESA³R) ist ein System für wandlungsfähige Montagetechnik der Robert Bosch GmbH. Es zeichnet sich durch eine rasterfreie Positionierung einzelner Komponenten eines Prozesses (sog. mechatronische Objekte (MO)) aus, welche beliebig auf einer Basisplatte positioniert und orientiert werden können (vgl. Abbildung 7.2).

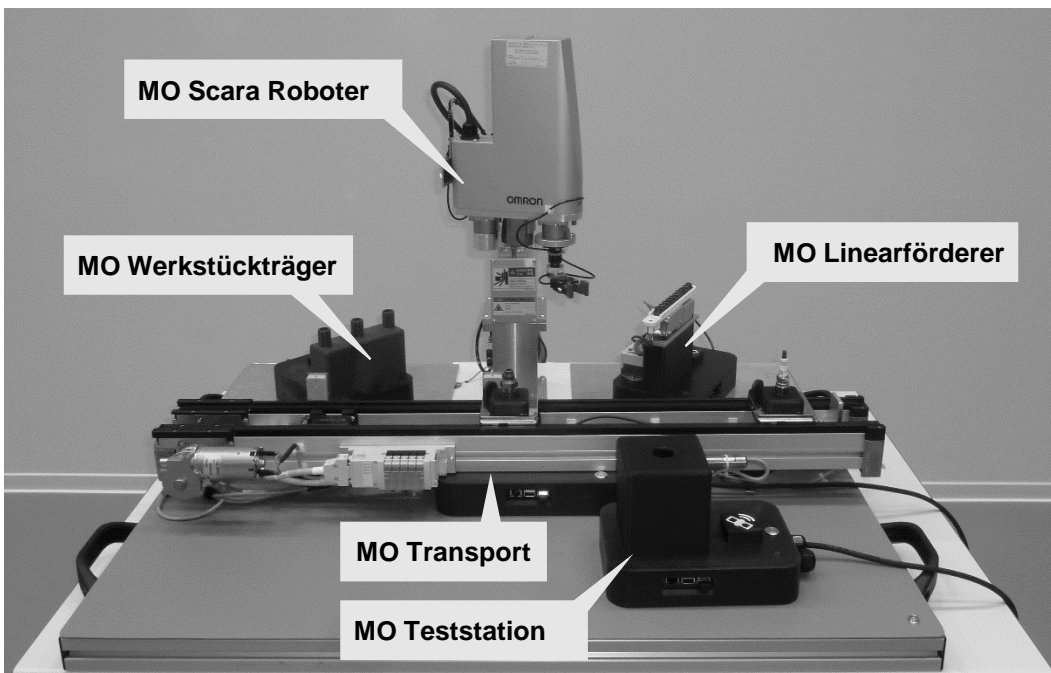


Abbildung 7.2: CESA³R Demonstrator mit mechatronischen Objekten

Abbildung 7.2 zeigt CESA³R mit fünf mechatronischen Objekten, welche je eine oder mehrere Fähigkeiten (eng. Skill) besitzen und innerhalb eines Montageprozesses beliebig

miteinander verknüpft werden können. Jedes MO ist in der Lage seine Fähigkeiten unabhängig von anderen MOs auszuführen. Der mechanische Aufbau wird durch eine maßgebliche Master-Einheit bzw. Steuerung ergänzt, welche die drei Module und notwendige Anwendungslogik für das Engineering, die Code-Generierung und Visualisierung enthält. Jedes MO enthält eine eigene Rechereinheit, um lokale Abläufe zu realisieren und mit der Aktorik und Sensorik zu interagieren. Des Weiteren enthält diese Einheit ein Kommunikationsmodul für den Datenaustausch mit der Master-Einheit. Die Master-Einheit sowie jedes der verfügbaren MO entsprechen der bisherigen Beschreibung von CPS innerhalb dieser Arbeit.

Zur Bekanntmachung und Vernetzung aller zu einem Zeitpunkt verfügbaren MOs mit der Master-Einheit, sowie einer Abbildung möglicher Fähigkeiten, soll nun die entworfene Architektur eines Verzeichnisdienstes für die serviceorientierte Produktionstechnik genutzt werden. Hierüber ist eine automatische Verknüpfung verfügbarer sowie eine Erkennung neuer MOs möglich und stellt ein Verzeichnis mit allen notwendigen Daten für die Realisierung eines Montageprozesses bereit.

Zur Integration in den Verzeichnisdienst müssen zunächst die verfügbaren Fähigkeiten in den Informationsmodellen des Verzeichnisdienstes modular und wiederverwendbar abgebildet werden.

7.2 Abbilden von Fähigkeiten in Informationsmodellen und Kommunikationsarchitektur

Die bestehende Softwarestruktur innerhalb von CESA³R und die Programmierung der MOs verfolgt ein fähigkeitsbasiertes Konzept auf Basis der DIN 8593 zu fügenden Fertigungsverfahren. Eine Montageaufgabe kann somit durch die verschiedenen Einzelschritte nach der Norm beschrieben werden und die Programmierung ist nur einmal für jede Fähigkeit notwendig.

Für die Durchführung eines Montageprozesses müssen alle Fähigkeiten jedoch in einem Informationsmodell beschrieben werden, um die Programmierung durch Parameter zu konfigurieren und anzupassen.

Hierzu wurden alle Parameter, welche ein mechatronisches Objekt besitzt sowie seine verfügbaren Fähigkeiten erfasst und in fünf Gruppen kategorisiert (vgl. Abbildung 7.3).

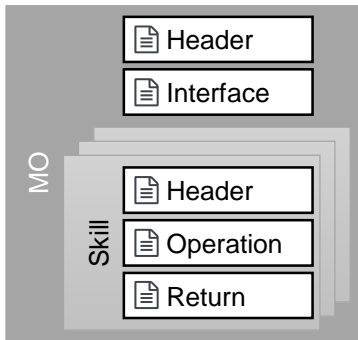


Abbildung 7.3: Kategorisierung des Informationsmodells mechatronischer Objekte

Die Gruppen aus Abbildung 7.3 können in allgemeine Parameter eines MOs und Parameter eines Skills unterschieden werden:

Der **MO Header** ist ein Teilmodell des gesamten Informationsmodells, welcher allgemeine Parameter des MOs bereitstellt. Diese umfassen beispielsweise den Namen, Typ sowie die Position. Im Header können des Weiteren umfangreiche Statusinformationen, die das gesamte MO betreffen, bereitgestellt werden.

Das **MO Interface** beschreibt verfügbare Schnittstellen, welche das MO bereitstellt. Bei standardisierten Schnittstellen (bspw. SSH) ermöglicht die Modellierung dieser eine Wiederverwendung in anderen Anwendungsfällen, welche den Verzeichnisdienst einsetzen.

Da ein MO mehrere Fähigkeiten besitzen kann, können die folgenden drei Teilmodelle auch mehrfach innerhalb eines MOs instanziiert sein.

Der **Skill Header** spezifiziert die zugrundeliegende Fähigkeit (bspw. durch die Angabe von Maßen, Drehmomenten, etc.).

Die **Skill Operation** enthält Informationen zur Ausführung der Fähigkeit und dem einzuhaltenden Ablauf. Hierbei kann es sinnvoll sein die Informationen in Form eines Zustandsautomaten zu modellieren und abzulegen.

Das Teilmodell **Skill Return** enthält nach Ausführen einer Fähigkeit alle notwendigen Rückgabeparameter, welche für weiterverarbeitende Schritte oder übergeordnete Qualitätssicherungs-Systeme relevant sind.

Die Informationsmodelle werden innerhalb des Verzeichnisdienstes abgespeichert und stehen allen MOs sowie der Master-Einheit über OPC UA zur Nutzung zur Verfügung.

Die resultierende Kommunikationsarchitektur ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Master-Einheit besteht aus den drei Modulen:

- Das **Engineering** (Eng.) dient der Erstellung von Montageabläufen basierend auf den verfügbaren MOs und deren Fähigkeiten
- Das Modul **Generator** (Gen.) generiert die notwendigen Informationsabläufe zwischen MOs auf Basis der erstellten Montageabläufe
- Die **Visualisierung** (Visu.) stellt den aktuellen Status und Aufgaben der Montageabläufe zur Überwachung dem Anwender dar

Die einzelnen mechatronischen Objekte können in beliebigen Teilmengen dem Aufbau hinzugefügt oder entfernt werden und enthalten alle o.g. Parameter, welche innerhalb des VZD zur Verfügung gestellt werden.

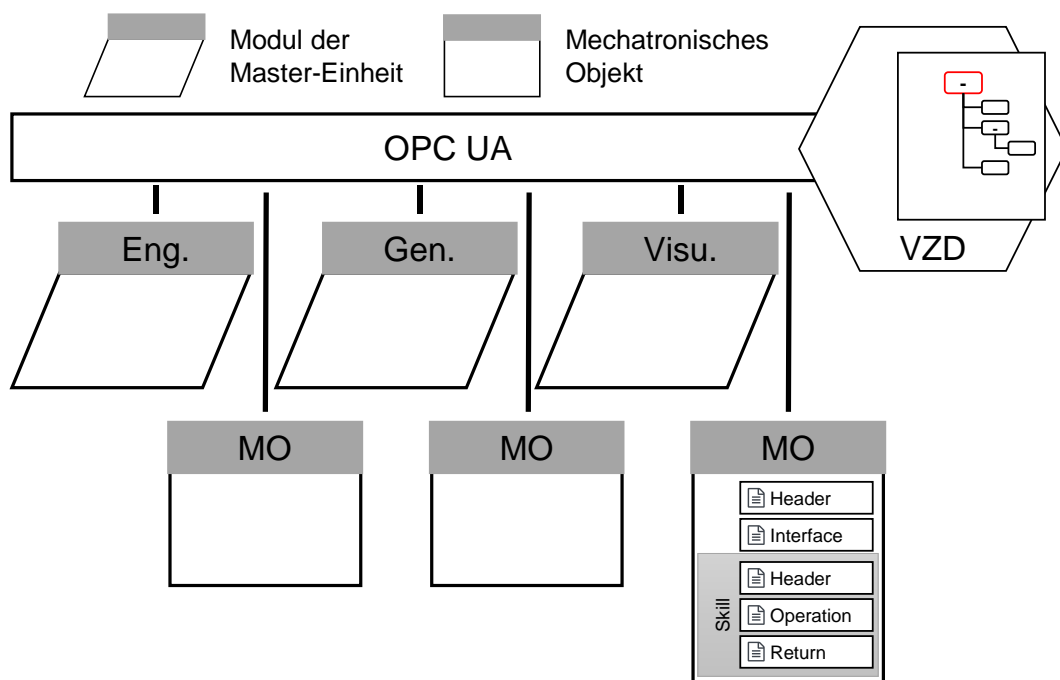


Abbildung 7.4: Kommunikation für MOs und Module der Master-Einheit

Der Verzeichnisdienst (VZD) enthält eine hierarchische Struktur und speichert in dieser alle verfügbaren und registrierten MOs sowie die Module der Master-Einheit als CPS.

Die Teilmodelle der mechatronischen Objekte werden ebenfalls genutzt, um die verfügbaren Fähigkeiten und Schnittstellen jedes MOs mit den MO-spezifischen Informationen zu füllen und den Modulen für Engineering, Generierung und Visualisierung bereitzustellen.

7.3 Integration in CESA³R Architektur

Die existierende CESA³R Architektur verfügt bereits über Kommunikationsmodule in den einzelnen Komponenten zur Administration (über SSH) sowie einer statischen und unflexiblen Kommunikation zwischen diesen. Zur Integration des Verzeichnisdienstes für eine serviceorientierte Produktionstechnik muss die bestehende Architektur erweitert werden.

Abbildung 7.5 verdeutlicht hierbei die Schnittstellenidentifikation und die notwendige Erweiterung durch eine Programmierschnittstelle (API) zur Kommunikation mit dem Verzeichnisdienst. Die einheitliche Kommunikationsschicht basiert auf OPC UA und dem Transport via *opc.tcp* Paketen.

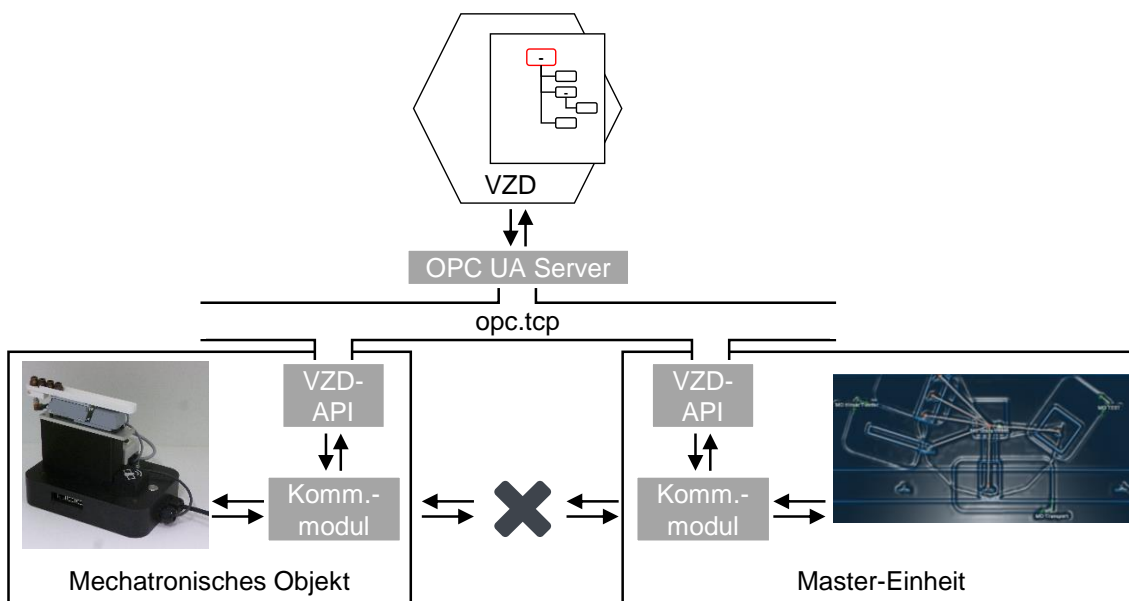


Abbildung 7.5: Schnittstellenidentifikation innerhalb der CESA³R Architektur

Das bereits existente Kommunikationsmodul von CESA³R wird durch die VZD API als Wrapper für die Kommunikation benutzt und baut keine weiteren bidirektionalen Kommunikationskanäle auf. Somit ist gewährleistet, dass alle Informationsflüsse zentral am VZD zur Verfügung stehen und von allen CPS genutzt werden können.

Die hierbei identifizierten Informationen für diesen Austausch sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Der direkte Informationsaustausch erfolgt lediglich zwischen mechatronischem Objekt und Verzeichnisdienst oder der Master-Einheit und dem Verzeichnisdienst. Die Informationen zwischen mechatronischem Objekt und Master-Einheit werden indirekt mittels Verzeichnisdienst ausgetauscht (vgl. indirekten Informationsaustausch als gestrichelte Linien in Abbildung 7.6).

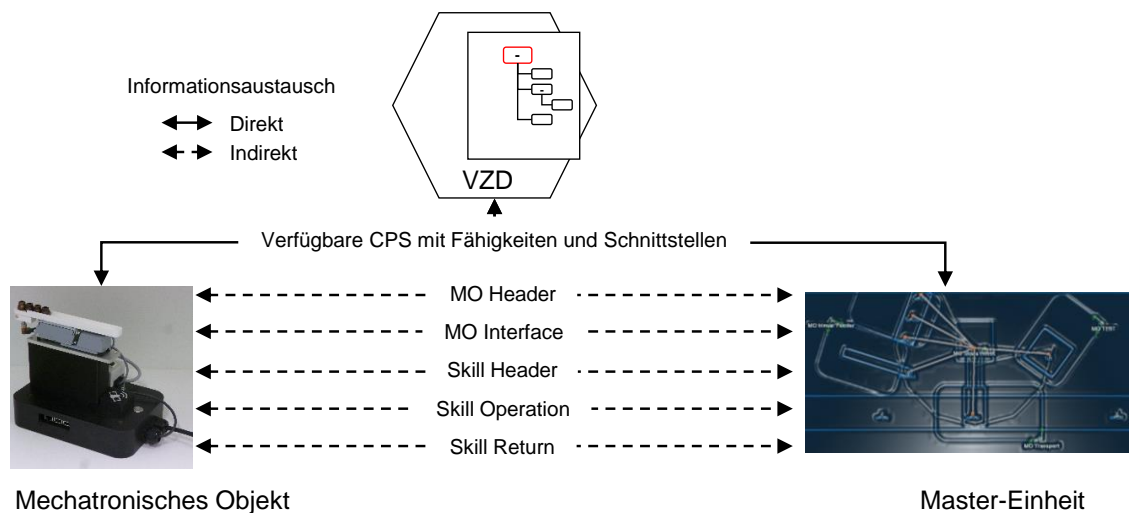


Abbildung 7.6: Informationsaustausch innerhalb der CESA³R Architektur

7.4 Einsatz des Verzeichnisdienstes in der wandlungsfähige Montagetechnik

Für die Verdeutlichung des Einsatzes des Verzeichnisdienstes in der wandlungsfähigen Montagetechnik wurden zwei Abbildungen erstellt.

Abbildung 7.7 zeigt ein vereinfachtes Sequenzdiagramm in UML für den Ablauf der Positionsaktualisierung. Das Visualisierungsmodul der Master-Einheit durchsucht den VZD nach der Fähigkeit „MO Head“ und erstellt ein Abonnement auf die notwendigen Parameter (*subscribe(MO Head)*), um über die Aktualisierung der Daten durch das MO informiert zu sein und diese innerhalb der Visualisierung darstellen zu können.

Wird durch das MO nun eine neue Position geschrieben (*writeNewOrigin(coordinates)*) so werden diese der Master-Einheit umgehend mitgeteilt (*notification(coordinates)*), um ein Update der Visualisierung durchführen zu können (*updateVisualization(coordinates)*).

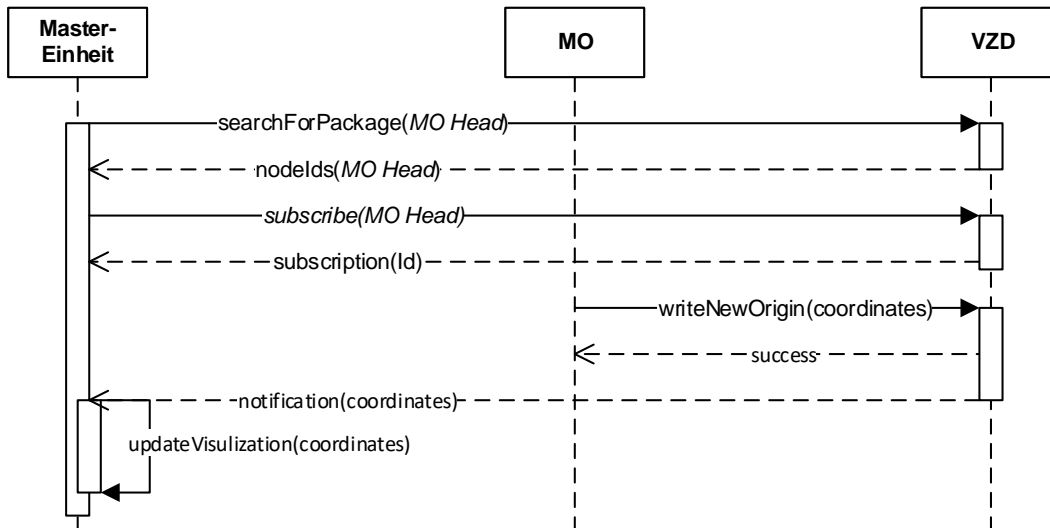


Abbildung 7.7: Sequenzdiagramm der Positionierung von CESA³R über VZD

Durch die Nutzung des VZD besteht nun auch die Möglichkeit der Abbildung von CESA³R in Verzeichnisdiensten der Office-IT. Die bestehenden LDAP-Verzeichnisse aus der Office-IT können um das erstellte LDAP-Schema dieser Arbeit erweitert werden, um anschließend eine Organisationseinheit (OU) für OPC UA-Server innerhalb des LDAP-Verzeichnisses aufzubauen. Diese wird genutzt, um die OPC UA-Server verschiedener CESA³R Anlagen als Serverobjekte mit den dazugehörigen Knoten anzulegen.

Abbildung 7.8 verdeutlicht den Nutzen des VZD durch die Integration in bestehende IT-Strukturen auf Basis von LDAP. Im Verzeichnisdienst der Robert Bosch GmbH wird die OU angelegt und um eine Gruppierung in *Labor* und *Produktion* erweitert. Darin lassen sich dann alle Informationen aus dem VZD zu CESA³R synchronisieren. Die abgelegten Informationen lassen sich dann logisch in natürliche LDAP Informationen (obere graue Schicht) und in synchronisierte OPC UA Informationen (untere graue Schicht) teilen.

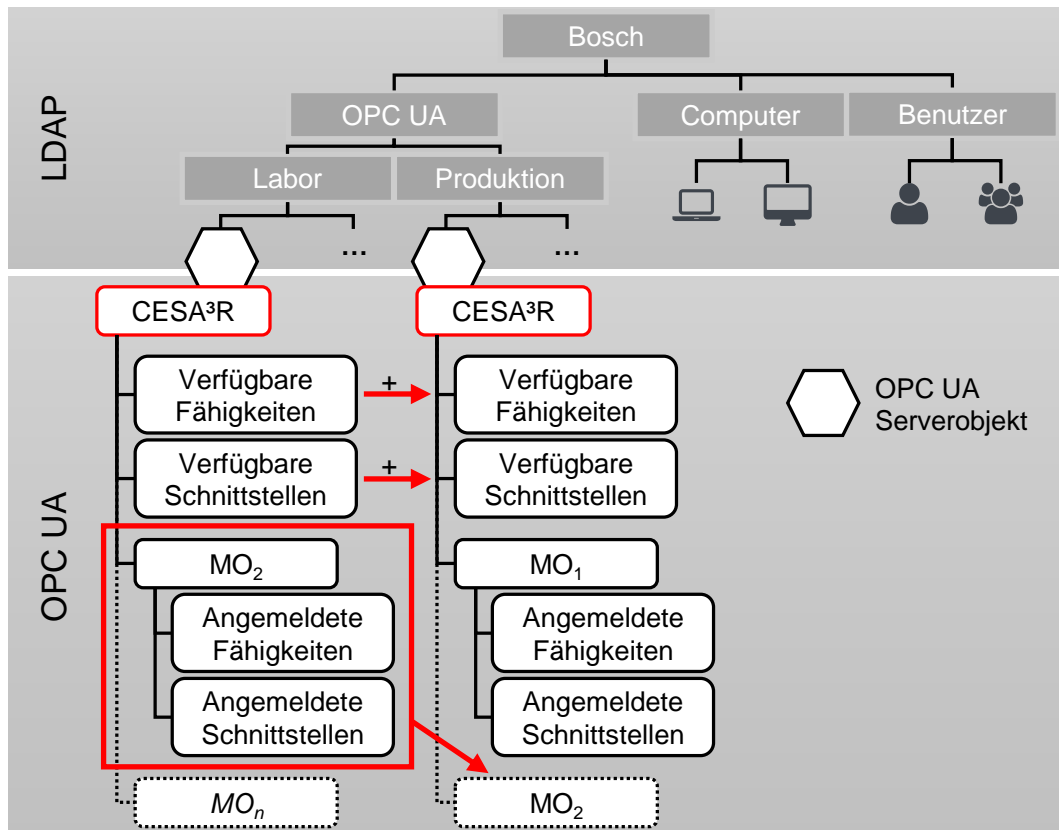


Abbildung 7.8: LDAP-seitige Integration des VZD und Nutzen für IT

Die roten Pfeile in Abbildung 7.8 innerhalb der OPC UA-Schicht verdeutlichen den Nutzen für die IT durch Verschiebung von Objekten innerhalb von OPC UA. So können beispielsweise erstellte Informationsmodelle von Fähigkeiten und Schnittstellen (abgespeichert in „Verfügbare Fähigkeiten“ und „Verfügbare Schnittstellen“) aus einer LDAP-Organisationseinheit für ein *Labor* in eine OU für die *Produktion* verschoben werden.

Analog hierzu ist es möglich neue MOs zu entwickeln und diese innerhalb der Laborumgebung unter realen Bedingungen zu testen. Nach Abschluss der Testphasen können die Objekte durch einen IT-Administrator in die OU der Produktion verschoben werden und müssen nicht erneut in Betrieb genommen werden. Die verschobene Datenbasis steht unmittelbar allen CPS in der Produktion zur Verfügung.

Die Realisierung verdeutlicht, dass zur Laufzeit des Prozesses neue Teilnehmer in Form von CPS (oder MOs) in die Kommunikationsarchitektur aufgenommen werden können und Informationen unmittelbar zur Verfügung stehen. Stillstandszeiten für eine Inbetriebnahme und Integration sind somit nicht erforderlich und mögliche Prozess können ad-hoc angepasst und auf neue Produktionsabläufe eingestellt werden.

Innerhalb von CESA^{3R} werden alle Informationen einheitlich und über ein offenes Protokoll (OPC UA) zur Verfügung gestellt und dienen somit nicht nur dem System selbst als Kommunikationsplattform, sondern können ebenfalls durch übergeordnete Systeme (bspw. für Ressourcenplanung, Auftragsplanung, etc.) genutzt werden.

Die direkte Integration bzw. Synchronisation aller Informationen aus der OT-Technologie OPC UA in eine IT-Technologie (LDAP) lassen auch eine nahtlose Integration klassischer IT-Systeme zu. Die Bereitgestellten Informationen innerhalb von LDAP-Verzeichnissen können somit ohne Kenntnisse und Kompatibilitäten von OPC UA genutzt werden.

Neben den Vorteilen des einheitlichen Informationsaustausches, bieten die Verzeichnisdienste einfachere Handhabung durch Bediener oder Produktionsplaner. Registrierte CPS innerhalb des Verzeichnisdienstes können somit an geplante Änderungen (bspw. Standortverschiebung) mit bestehenden Werkzeugen angepasst werden. Des Weiteren lassen sich bestehende Security-Maßnahmen aus den IT-Verzeichnisdiensten anwenden.

Der Verzeichnisdienst für serviceorientierte Produktionstechnik kommt somit den Anforderungen und Trends durch Industrie 4.0 nach und ermöglicht schnelle Kommunikation unter Berücksichtigung des Einsatzes von Informationsmodellen für standardisierte Semantiken.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die wachsende Bedeutung an Flexibilität in der Produktion sowie die resultierende Komplexität fordern Lösungen zur Beherrschbarkeit. Die Austauschbarkeit von Fähigkeiten, das Rekonfigurieren bestehender Anlagen gepaart mit heterogenen Anlagen und Schnittstellen zeigt einen Bedarf an zentraler Bekanntmachung aller zur Verfügung stehenden Ressourcen. Neben Planungsaufgaben stellen hierbei auch nicht-funktionale Anforderungen wie Security eine maßgebliche Rolle.

Technologien aus der Informationstechnik beherrschen bereits Aufgaben, um die Anforderungen für Office-IT Geräte (Laptops, mobile Endgeräte, Drucker, etc.) zu erfüllen. Über die vergangenen Jahre haben sich Verzeichnisdienste zur Verwaltung und dem Management von Benutzern und Geräten durchgesetzt, um Unternehmens-IT-Landschaften beherrschbar zu machen. Gleichzeitig bekommt IT eine immer größere Bedeutung im Produktions-/OT-Umfeld und es besteht der Bedarf eines Brückenschlags zwischen beiden Welten (die sog. IT-OT-Konvergenz).

Dieser Aufgabe stellt sich diese Arbeit, um die Vorteile eines Verzeichnisdienstes aus der IT für die OT nutzbar zu machen. Beginnend mit dem Stand der Technik wurden zunächst maßgebliche Kommunikationsparadigmen und -techniken aus der IT und OT erfasst und IP-Traffic als Basis-Konnektivität in der IT identifiziert. Im Vordergrund der OT standen die deutlich höheren Anforderungen sowie ein stark vertikal und horizontal geprägter Datenaustausch (vgl. Automatisierungspyramide).

Des Weiteren wurden Designparadigmen und Referenzarchitekturmodelle vorgestellt, welche in beiden Welten Ansatz finden bzw. die Konvergenz der Welten verdeutlichen. Insbesondere der Ansatz der serviceorientierten Architektur aus der Softwaretechnik ermöglicht unter Berücksichtigung seiner Entwurfsprinzipien einen Aufbruch statischer Verbindungen und eine deutlich höhere Flexibilität in dem Einsatz von klar definierten Services.

Dieses Paradigma lässt sich ebenfalls auf den Trend der Produktionstechnik übertragen und erfordert einen Verzeichnisdienst zur Erfassung verfügbarer Produktionsressourcen. Nach einem Vergleich verfügbarer Lösungen für Verzeichnisdienste aus IT und OT sowie der Berücksichtigung nutzbarer Technologien hierfür, stellt sich heraus, dass die hohe

Diversität den Fokus auf eine Technologie verbietet. Die Lösung ist eine Brücke aus OPC UA für die OT und LDAP für die IT. Beide Technologien können als de facto Standard in ihren Branchen angesehen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Architektur für einen Verzeichnisdienst entworfen, der die Abbildung und Erfassung bestehender Produktionsressourcen in Form von CPS ermöglicht und zeitgleich eine Synchronisation dieser Informationen in IT-bewährte Verzeichnisdienste unterstützt. Die Architektur sowie ihre Komponenten wurden hierbei unter Berücksichtigung der Industrie 4.0 Paradigmen und dem Gesichtspunkt der Standardisierung entworfen.

Die entwickelte Architektur wurde anschließend auf das SOA Paradigma adaptiert und an einem Demonstrator für wandlungsfähige Montagetechnik gespiegelt. Der Einsatz zeigt, dass die lose Bindung neuer Produktionsteilnehmer große Vorteile in der Wandlungsfähigkeit hat und jederzeit ein Abbild der Produktion sowie den Datenzugriff auf relevante Informationen erlaubt.

9 Anhang

9.1 CVE-Bewertungen und Mittelwertberechnung

Microsoft Active Directory	6,3
2013-1282	5
2013-3868	5
2013-1282	5
2009-2928	7,8
2001-2014	9
2005-0545	7,2
2010-0654	10
2018-1679	5
2015-1757	4,3
2014-6331	5
2013-1438	5
2013-3185	5
2011-1264	4,3
2007-0040	10
2003-0533	7,5
2009-1138	10
2009-2508	6,9
2009-2509	9
2015-2535	4
2008-1445	7,1
2007-3038	5
2011-0040	5
2015-1638	5,8
2014-3185	5
2011-3406	9
2018-8340	4
2018-0890	3,5
2009-1928	7,8
2011-2014	9
2010-0820	9
2016-3226	4
2016-0037	5
2003-0507	7,5
2008-0088	6,8
2017-0043	2,9
2002-2328	7,1
2008-5112	5
2008-4023	10

	2017-0164	3,5
	2018-8326	3,5
Active Directory Application Mode	2009-1139	7,8

Tabelle 9.1: CVE-Bewertung für Microsoft Active Directory

Bonjour	5,47
2008-3630	6,4
2008-2326	5
2008-2326	5

Tabelle 9.2: CVE-Bewertung für Bonjour

jabberd2	5,25
2011-1755	5
2017-18226	2,1
2017-18225	4,6
2017-10807	7,5
2015-2058	6,5
2012-3525	5,8

Tabelle 9.3: CVE-Bewertung für jabberd2

COM/DCOM	6,15
2003-0352	7,5
2017-0298	4,4
2003-0715	10
2004-0124	2,6
2003-0605	7,5
2017-0100	4,4
2003-0813	5,1
2002-2077	5
2004-0116	5
2003-0528	10

Tabelle 9.4: CVE-Bewertung für COM/DCOM

9.2 Entworfenes LDAP-Schema für OPC UA

```
attributetype ( 1.3.6.1.4.1.48279.1.1 NAME 'uniformResourceIdentifier'  
    DESC 'URI for identifying namespaces.'  
    SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15  
    SINGLE-VALUE  
    USAGE userApplications )  
attributetype ( 1.3.6.1.4.1.48279.1.10 NAME 'historizing'  
    DESC 'IEC 62541-3:2015 The Historizing Attribute indicates whether the  
Server is actively collecting data for the history of the Variable.'  
    SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.7  
    SINGLE-VALUE  
    USAGE userApplications )
```

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.11 **NAME** 'minimumSamplingInterval'
DESC 'IEC 62541-3:2015 The MinimumSamplingInterval Attribute indicates how "current" the Value of the Variable will be kept.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.27
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.12 **NAME** 'eventNotifier'
DESC 'IEC 62541-3:2015 The EventNotifier Attribute is used to indicate if the Node can be used to subscribe to Events or to read / write historic Events.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.6
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.13 **NAME** 'browseName'
DESC 'IEC 62541-3:2015 Nodes have a BrowseName Attribute that is used as a non-localised human-readable name when browsing the AddressSpace to create paths out of BrowseNames.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.14 **NAME** 'displayName'
DESC 'IEC 62541-3:2015 The DisplayName Attribute contains the localised name of the Node.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.15 **NAME** 'containsNoLoops'
DESC 'IEC 62541-3:2015 If set to "true" this Attribute indicates that by following the References in the context of the View there are no loops, i.e. starting from a Node "A" contained in the View and following the forward References in the context of the View Node "A" will not be reached again.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.7
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.16 **NAME** 'executable'
DESC 'IEC 62541-3:2015 The Executable Attribute indicates if the Method is currently executable ("False" means not executable, "True" means executable).'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.7
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.17 **NAME** 'inverseName'
DESC 'IEC 62541-3:015 The inverse name of the Reference, which is the meaning of the ReferenceType as seen from the TargetNode.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.18 **NAME** 'isAbstract'
DESC 'IEC 62541-3:2015 A boolean Attribute with the following values: TRUE it is an abstract VariableType, i.e. no Variable of this type shall exist, only of its subtypes. FALSE it is not an abstract VariableType, i.e. Variables of this type can exist.'
SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.7
SINGLE-VALUE
USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.19 **NAME** 'symmetric'

DESC 'IEC 62541-3:2015 A boolean Attribute with the following values: TRUE the meaning of the ReferenceType is the same as seen from both the SourceNode and the TargetNode. FALSE the meaning of the ReferenceType as seen from the TargetNode is the inverse of that as seen from the SourceNode.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.7

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.2 **NAME** 'nodeId'

DESC 'IEC 62541-3:2015 This Attribute is composed of three elements that identify a Node within a Server.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.20 **NAME** 'referenceToParent'

DESC 'Additional attribute besides OPC UA specification to identify reference type to parent node.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.3 **NAME** 'nodeClass'

DESC 'IEC 62541-3:2015 The NodeClass Attribute identifies the Node-Class of a Node.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.4 **NAME** 'writeMask'

DESC 'IEC 62541-3:2015 The optional WriteMask Attribute exposes the possibilities of a client to write the Attributes of the Node.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.27

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.5 **NAME** 'valueRank'

DESC 'IEC 62541-3:2015 This Attribute indicates whether the Value Attribute of the Variable is an array and how many dimensions the array has.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.27

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.6 **NAME** 'arrayDimensions'

DESC 'IEC 62541-3:2015 This Attribute specifies the maximum supported length of each dimension.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.7 **NAME** 'value'

DESC 'IEC 62541-3:2015 The most recent value of the Variable that the Server has.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.8 **NAME** 'dataType'

DESC 'IEC 62541-3:2015 NodeId of the DataType definition for the Value Attribute.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.15

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

attributetype (1.3.6.1.4.1.48279.1.9 **NAME** 'accessLevel'

DESC 'IEC 62541-3:2015 The AccessLevel Attribute is used to indicate how the Value of a Variable can be accessed (read/write) and if it contains current and/or historic data.'

SYNTAX 1.3.6.1.4.1.1466.115.121.1.27

SINGLE-VALUE

USAGE userApplications)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.1 **NAME** 'opcUaServer'

DESC 'Describes the object of an OPC UA Server.'

SUP top

STRUCTURAL)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.13 **NAME** 'externalNode'

DESC 'Extension for mapping multiple referenced OPC UA nodes within the tree structure of LDAP.'

SUP top

STRUCTURAL

MUST (nodeId \$ referenceToParent))

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.2 **NAME** 'namespace'

DESC 'Object for an existing namespace within the OPC UA server.'

SUP top

STRUCTURAL

MUST uniformResourceIdentifier)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.3 **NAME** 'baseNode'

DESC 'IEC 62541-3:2015

The OPC UA Address Space Model defines a Base NodeClass from which all other NodeClasses are derived.'

SUP top

ABSTRACT

MUST (browseName \$ displayName \$ nodeClass \$ nodeId \$ referenceToParent)

MAY (description \$ writeMask))

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.4 **NAME** 'variableNode'

DESC 'IEC 62541-3:2015

Variables are used to represent values which may be simple or complex.'

SUP baseNode

STRUCTURAL

MUST (accessLevel \$ dataType \$ historizing \$ value \$ valueRank)

MAY (arrayDimensions \$ minimumSamplingInterval))

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.5 **NAME** 'objectNode'

DESC 'IEC 62541-3:2015

Objects are used to represent systems, system components, real-world objects and software objects.'

SUP baseNode

STRUCTURAL

MUST eventNotifier)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.6 **NAME** 'typeNode'

DESC 'Defines the abstract class for all type nodes.'

SUP baseNode

ABSTRACT

MUST isAbstract)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.7 **NAME** 'objectTypeNode'

DESC 'IEC 62541-3:2015

ObjectTypes provide definitions for Objects.'

SUP typeNode

STRUCTURAL)

objectclass (1.3.6.1.4.1.48279.2.8 **NAME** 'methodNode'

DESC 'IEC 62541-3:2015

Methods define callable functions.'


```
SUP baseNode
STRUCTURAL
MUST executable )
objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.9 NAME 'referenceTypeNode'
DESC 'IEC 62541-3:2015
References are defined as instances of ReferenceType Nodes.'
SUP typeNode
STRUCTURAL
MUST symmetric
MAY inverseName )
objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.10 NAME 'viewNode'
DESC 'IEC 62541-3:2015
All Nodes contained in a View shall be accessible starting from the View Node
when browsing in the context of the View.'
SUP baseNode
STRUCTURAL
MUST ( containsNoLoops $ eventNotifier ) )
objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.11 NAME 'dataTypeNode'
DESC 'IEC 62541-3:2015
The DataType NodeClass describes the syntax of a Variable Value.'
SUP typeNode
STRUCTURAL )
objectclass ( 1.3.6.1.4.1.48279.2.12 NAME 'variableTypeNode'
DESC 'IEC 62541-3:2015
VariableTypes are used to provide type definitions for Variables.'
SUP typeNode
STRUCTURAL
MUST ( dataType $ valueRank )
MAY ( arrayDimensions $ value ) )
```

Abbildung 9.1: Schema zur Abbildung von OPC UA Servern in LDAP

10 Literaturverzeichnis

Abel et al. 2013

Abel, M; Klemm, P., 2013.
Flexible SOA Based Platform for Research on Start-Up Procedures for Reconfigurable Production Machines.
In: Azevedo, Américo (Hrsg.): *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*. Heidelberg: Springer International Publishing, S. 489–501
ISBN 978-3-319-00556-0
DOI: 10.1007/978-3-319-00557-7_40

Adolphs et al. 2015

Adolphs, Peter; Bedenbender, Heinz; Dirzus, Dagmar; Ehlich, Martin; Epple, Ulrich; Hankel, Martin; Heidel, Roland; Hoffmeister, Michael; Huhle, Haimo; Kärcher, Bernd; Koziolok, Heiko; Pichler, Reinhold; Pollmeier, Stefan; Schewe, Frank; Walter, Armin; Waser, Bernd; Wollschlaeger, Martin, 2015. *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0): Statusreport*. Düsseldorf, Frankfurt am Main.
Verfügbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/user_upload/VDI-GMA_Statusreport_Referenzarchitekturmodell-Industrie40.pdf
Zugriff am: 02.11.2018

Apple Inc.

Apple Inc.
Bonjour: Apple Developer.
Verfügbar unter: <https://developer.apple.com/bonjour/>
Zugriff am: 20.06.2020

Apple Inc. 2019

Apple Inc., 2019.
Prepare for changes to macOS Server 5.7.1.
Verfügbar unter: <https://support.apple.com/en-us/HT208312>
Zugriff am: 04.03.2019

ascolab GmbH

ascolab GmbH.
OPC UA Konzepte.
Verfügbar unter: <http://www.ascolab.com/de/unified-architecture/konzept.html>
Zugriff am: 01.11.2018

- Balter 2015** Balter, Ben, 2015.
6 motivations for consuming or publishing open source software.
Verfügbar unter: <https://opensource.com/life/15/12/why-open-source>
Zugriff am: 25.02.2019
- Barnstedt et al. 2016** Barnstedt, Erich; Regen, Martin; Pocock, Nathan; Schier, Marc; Gschossmann, Hans; Moldovean, Alin, 2016.
Official OPC UA .Net Standard Stack and Samples from the OPC Foundation.
Verfügbar unter: <https://github.com/OPCFoundation/UA-.NETStandard/blob/master/README.md>
Zugriff am: 27.02.2019
- Bauernhansl 2014** Bauernhansl, Thomas, 2014.
Automobilindustrie ohne Band und Takt - Forschungscampus ARENA2036.
In: *23. Deutscher Materialfluss-Kongress*
- Bauernhansl et al. 2014** Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.), 2014.
Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-04682-8
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>
- Belson 2017** Belson, David, 2017.
akamai's [state of the internet], Q1 2017 report.
Verfügbar unter: <https://www.akamai.com/de/de/multimedia/documents/state-of-the-internet/q1-2017-state-of-the-internet-connectivity-report.pdf>
Zugriff am: 29.08.2018

- Birkhofer et al. 2018** Birkhofer, Rolf; Wickinger, Jens; Risch, Carsten; Scholing, Heinz; Dietz, Holger; Feldmeier, Günter; Ohme, Arnd; Kalhoff, Johannes; Wollschlaeger, Martin; Michels, Jan, 2018.
Industrie-Software 4.0?: Welchen Herausforderungen hat sich die industrielle Softwareentwicklung durch den Einzug von Industrie-4.0-Konzepten zu stellen?
Frankfurt am Main
Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/White_Paper_Industrie-Software_4.0_/White_Paper_Industrie-Software-40-DE-aktuell.pdf
- Birrell et al. 1983** Birrell, Andrew D; Nelson, Bruce Jay, 1983.
Implementing remote procedure calls.
Palo Alto, Calif.: XEROX Corp. Palo Alto Research Center.
CSL / XEROX Palo Alto Research Center 83,7
- Biswas et al. 2005** Biswas, Debmalya; Vidyasankar, K., 2005.
A Nested Transaction Model for LDAP Transactions.
In: Hutchison, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C; Naor, Moni; Nierstrasz, Oscar; Pandu Rangan, C; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Dough; Vardi, Moshe Y; Weikum, Gerhard; Ghosh, R. K; Mohanty, Hrushikesh (Hrsg.): *Distributed Computing and Internet Technology.*
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 117–126
ISBN 978-3-540-24075-4
DOI: 10.1007/978-3-540-30555-2_14
- Blum 2015** Blum, Erik, 2015.
Active Directory facts Infographics.
Verfügbar unter: <https://www.itsmdaily.com/active-directos-infographics/>
Zugriff am: 27.02.2019

- Boddenberg 2016** Boddenberg, Ulrich B., 2016.
Windows Server 2012 R2.
4., aktualisierte Auflage, 2., korrigierter Nachdruck
2016.
Bonn: Rheinwerk.
Rheinwerk Computing.
ISBN 978-3-8362-2013-2
- Boyd et al. 2008** Boyd, Alan; Noller, David; Peters, Paul; Salkeld,
Dave; Thomasma, Tim; Gifford, Charlie; Pike,
Steve; Smith, Alison, 2008.
SOA in Manufacturing: Guidebook.
Chandler, AZ, USA
Verfügbar unter: ftp://public.dhe.ibm.com/software/plm/pdif/MESA_SOAINManufacturingGuidebook.pdf
- Bußler 1998** Bußler, Christoph, 1998.
Organisationsverwaltung in Workflow-Management-Systemen.
Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
ISBN 9783824421022
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-08832-5>
DOI: 10.1007/978-3-663-08832-5
- Calvert et al. 1997** Calvert, K. L; Doar, M. B; Zegura, E. W., 1997.
Modeling Internet topology.
IEEE communications magazine **35** (6), S. 160–163
DOI: 10.1109/35.587723
- Cerf et al. 1983** Cerf, Vinton G; Cain, Edward, 1983. The DoD internet
architecture model.
Computer Networks (1976) **7** (5), S. 307–318
DOI: 10.1016/0376-5075(83)90042-9
- Cheshire et al. 2013a** Cheshire, S; Krochmal, M., 2013.
Multicast DNS, RFC6762.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc6762>
Zugriff am: 22.02.2019
- Cheshire et al. 2013b** Cheshire, S; Krochmal, M., 2013.
DNS-Based Service Discovery, RFC6763.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc6763>
Zugriff am: 22.02.2019

- Chinnici et al. 2007** Chinnici, Roberto; Moreau, Jean-Jacques; Ryman, Arthur; Weerawarana, Sanjiva, 2007.
Web Services Description Language (WSDL) Version 2.0 Part 1: Core Language.
Verfügbar unter: <https://www.w3.org/TR/wsdl20/>
Zugriff am: 31.08.2018
- Decotignie 2009** Decotignie, J.-d., 2009. The Many Faces of Industrial Ethernet [Past and Present].
IEEE Industrial Electronics Magazine **3** (1), S. 8–19
DOI: 10.1109/MIE.2009.932171
- Decotignie et al. 1993** Decotignie, Jean-Dominique; Pleinevaux, Patrick, 1993. A survey on industrial communication networks.
Annales Des Télécommunications **48** (9), S. 435–448
DOI: 10.1007/BF02995472
- Deiretsbacher et al. 2016** Deiretsbacher, Karl-Heinz; Mahnke, Wolfgang; Felt, Alexandre; Jasperneite, Juergen; Lorenz, Carsten; Merz, Silvio; Grünhagen Eike; Essmann, Roland; Vasters, Clemens; Reichl, Bernhard, 2016.
OPC Unified Architecture: Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things.
Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2016/05/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN-v5.pdf>
Zugriff am: 01.11.2018
- der Kinderen et al. 2016** der Kinderen, Guus; Taylor, Mike; Mons, Edwin; Schäfer, Jonas; Lukas, Georg; Timothée, Jaussoin; Peyrot, Emmanuel Gil, 2016.
An Overview of XMPP.
Verfügbar unter: <https://xmpp.org/about/technology-overview.html>
Zugriff am: 01.03.2019
- Deuter 2014** Deuter, Andreas, 2014.
Software wird auch im Maschinenbau zur Kernkompetenz.
Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/software-wird-auch-im-maschinenbau-zur-kernkompetenz/>
Zugriff am: 05.10.2018
- DIN 62264** DIN 62264:00.2014-07.
Integration von Unternehmensführungs- und Leit-systemen.

- DIN EN 62541** Norm DIN EN 62541 (IEC 62541).
OPC Unified Architecture.
- DIN SPEC 91345** Norm DIN SPEC 91345:2016-04.
Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0).
- Dostal 2005** Dostal, Wolfgang, 2005.
Service-orientierte Architekturen mit Web Services: Konzepte - Standards - Praxis.
1. Aufl.
München: Elsevier Spektrum Akad. Verl.
ISBN 3-8274-1457-1
- Drolshagen 2015** Drolshagen, René, 2015.
Evaluation von M2M-Kommunikationsansätzen für Industrie 4.0 und Herleitung von Entscheidungskriterien für deren Einsatz.
Wiesbaden, Hochschule RheinMain, Masterarbeit, 2015.
<https://wwwvs.cs.hs-rm.de/downloads/extern/pubs/thesis/drolshagen15.pdf>
- Egan 2005** Egan, Sean, 2005.
Jingle All The Way.
Verfügbar unter: <http://google-talk.blogspot.com/2005/12/jingle-all-way.html>
Zugriff am: 01.03.2019
- Elsberger 2015** Elsberger, Markus, 2015.
Kurz und Knapp: Was ist eine Active Directory?
Verfügbar unter: <https://it-learner.de/kurz-und-knapp-was-ist-eine-active-directory/>
Zugriff am: 08.02.2019
- Erl 2006** Erl, Thomas, 2006.
Service-oriented architecture: Concepts, technology, and design.
5th print.
Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
ISBN 0-13-185858-0
- Erl 2010** Erl, Thomas, 2010.
SOA: Entwurfsprinzipien für serviceorientierte Architektur.
[Repr. der Ausg. 2008].
München: Addison Wesley.
Programmer's Choice.
ISBN 978-3-8273-2651-5

- Faath 2019** Faath, Andreas, 2019.
Die Companion Specs des VDMA.
Verfügbar unter: <https://www.computer-automation.de/feldebene/vernetzung/artikel/162133/>
Zugriff am: 13.08.2019
- Fischer et al. 2010** Fischer, Jörg; Liesenfeld, André, 2010.
Unified Communication: Praxisleitfaden ; vereinigte Kommunikationsdienste planen, implementieren und erfolgreich einsetzen.
München: Hanser.
ISBN 978-3-446-41834-9
Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446418349>DOI:
10.3139/9783446423930
- Forstner et al. 2014** Forstner, Lisa; Dümmler, Mathias, 2014. Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke – Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0.
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik **131** (7), S. 199–201
DOI: 10.1007/s00502-014-0224-y
- George 2017a** George, Sam, 2017.
Simplifying OPC UA security for everyone.
Verfügbar unter: <https://azure.microsoft.com/de-de/blog/simplifying-opc-ua-security-for-everyone/>
Zugriff am: 21.02.2019
- George 2017b** George, Sam, 2017.
Azure IoT Suite connected factory now available.
Verfügbar unter: <https://azure.microsoft.com/de-de/blog/azure-iot-suite-connected-factory-now-available/>
Zugriff am: 21.02.2019
- Gómez 2012** Gómez, Jorge, 2012.
Serviceorientierte Architektur.
Verfügbar unter: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Softwarearchitektur/Architekturparadigmen/Serviceorientierte-Architektur/index.html>
Zugriff am: 01.10.2018

- Good 2000** Good, G., 2000.
The LDAP Data Interchange Format (LDIF) - Technical Specification, RFC2849.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc2849>
Zugriff am: 22.02.2019
- Gould** Gould, K.
Open Source: Vorteile von Open Source Software.
Verfügbar unter: <https://www.aoe.com/de/open-source.html>
Zugriff am: 25.02.2019
- Guttman 2004** Guttman, Erik, 2004.
Zero Configuration Networking (zeroconf).
Verfügbar unter: <https://datatracker.ietf.org/wg/zeroconf/charter/>
Zugriff am: 22.02.2019
- Halladay 2018** Halladay, James, 2018.
Moore's Law and the Future IoT: A future we can all take advantage of.
Verfügbar unter: <https://medium.com/mybitdapp/moores-law-and-the-future-of-iot-d9ed7d725f0a>
Zugriff am: 03.10.2019
- Hankel 2015** Hankel, Martin, 2015.
Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0).
Hannover.
Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Das_Referenzarchitekturmodell_Industrie_4.0__RAMI_4.0_/Faktenblatt-Industrie4_0-RAMI-4_0.pdf
Zugriff am: 05.10.2018
- Hankel et al. 2016** Hankel, Martin; Hoffmeister, Michael, 2016.
Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) erklärt.
Frankfurt am Main.
Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=fFIQ2o-5QLo>
Zugriff am: 02.11.2018

- Heinrich et al. 2015** Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael, 2015.
Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-05961-3
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05961-3>DOI: 10.1007/978-3-658-05961-3
- Herkommer 2017** Herkommer, Günter, 2017.
Die Marktanteile industrieller Netzwerke in 2017.
o.O.
Verfügbar unter: <https://www.computer-automation.de/feldebene/vernetzung/artikel/139254/>
Zugriff am: 31.08.2018
- Herrmann et al. 2014** Herrmann, Wolfgang; Hill, Jürgen, 2014.
Software Defined X: Wenn die IT zum Service wird.
München.
Verfügbar unter: <https://www.computerwoche.de/a/wenn-die-it-zum-service-wird,2547908>
Zugriff am: 28.10.2018
- Herzog et al. 2016** Herzog, Christian; Beckereit, Frank; Wittmann, In-
golf; Keller, Lorenz; Mey, Georg; Hamm, Ulrich;
Harrer, Thomas; Rimikis, Georgios, 2016.
*Überblick Software Defined »X«: Grundlagen und
Status Quo.*
Berlin.
Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/noindex/Publicationen/2016/Leitfaden/Software-Defined-X/160209-LF-SDX.pdf>
Zugriff am: 28.10.2018
- Hoppe 2017** Hoppe, Stefan, 2017.
Standardisierte horizontale und vertikale Kommuni-
kation.
In: *Handbuch Industrie 4.0.*
Berlin: Springer Vieweg, S. 371–390
ISBN 978-3-662-53247-8
- Howes et al. 2006** Howes, Timothy A; Smith, Mark C; Good, Gordon
S., 2006.
*Understanding and deploying LDAP directory ser-
vices.*
2nd ed., 4th print.
Boston: Addison-Wesley.
ISBN 0-672-32316-8

- Hunkar 2014** Hunkar, Paul, 2014.
OPC UA vs OPC Classic.
Verfügbar unter: <http://www.dsinteroperability.com/OPCClassicVSUA.pdf>
Zugriff am: 01.03.2019
- IEC 62541** Norm IEC 62541-3:2015:2015-03.
OPC unified architecture - Part 3: Address Space Model.
- IIA Austria 2016** Institut für Interne Revision Österreich, 2016.
Informationssicherheitsmanagementsystem: Damoklesschwert Daten-Gau – systematische Prüfung und wirksame Prävention.
Linde international.
ISBN 978-3-7094-0850-6
- ISO 7498** ISO/IEC 7498-1:00.1994-11.
Informationstechnik - Kommunikation Offener Systeme - Basis-Referenzmodell.
- ITEA 2006** Information Technology for European Advancement (ITEA), 2006.
Service-oriented common framework: Applying SOA to embedded environments at device level, Project SIRENA.
Eindhoven, NL.
Verfügbar unter: <https://itea3.org/project/sirena.html>
Zugriff am: 04.10.2018
- Jasperneite et al. 2015** Jasperneite, Juergen; Neumann, Arne; Pethig, Florian, 2015.
OPC UA versus MTConnect.
Verfügbar unter: <https://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/artikel/119808/>
Zugriff am: 01.03.2019
- Kagermann et al. 2013** Kagermann, Henning; Wahlster Wolfgang; Helbig Johannes, 2013.
Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0
Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf

- Kersken 2013** Kersken, Sascha, 2013.
IT-Handbuch für Fachinformatiker: [der Auszubildungsbegleiter; EDV-Grundlagen Netzwerktechnik Programmierung...].
6., aktualis. u. erw. Aufl.
Bonn: Galileo Press.
Galileo Computing.
ISBN 978-3-8362-2234-1
- Klein et al. 2016** Klein, Alexander; Wolters, Felix; Dederichs, Stefanie; Karl, Florian, 2016. Welcher Kommunikationsstandard für künftige Industrie 4.0-Fabriken?
VDI-Z Integrierte Produktion **158** (12), S. 20–23
- Klenzendorf 2003** Klenzendorf, Brad, 2003.
How Much Broadcast and Multicast Traffic Should I Allow in My Network?, PowerConnect Application Note #5
Verfügbar unter: https://www.dell.com/downloads/global/products/pwcnt/en/app_note_5.pdf
- Klünter et al. 2003** Klünter, Dieter; Laser, Jochen, 2003.
LDAP verstehen, OpenLDAP einsetzen: Grundlagen, Praxiseinsatz, Single-sign-on-Mechanismen.
1. Aufl.
Heidelberg: dpunkt-Verl.
ISBN 3-89864-217-8
- Knoll 2016** Knoll, Andreas, 2016.
OPC UA, DDS und MTConnect für I4.0: Jeder Anwendung ihr Protokoll.
Verfügbar unter: <https://www.elektro-niknet.de/markt-technik/automation/jeder-anwendung-ihr-protokoll-135448.html>
Zugriff am: 01.03.2019
- Koren 2010** Koren, Yoram, 2010.
The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems.
Hoboken, N.J.: Wiley.
Wiley series in systems engineering and management.
ISBN 9780470583777
Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/academic-completetitles/home.actionDOI:10.1002/9780470618813>

- Kretschmer 2017a** Kretschmer, Felix, 2017. Forschungsprojekt Picasso: Ein Jahr danach.
SPS Magazin **30** (9), S. 28–30
- Kretschmer 2017b** Kretschmer, Felix, 2017.
Industrie 4.0 - Mutation der Schatten IT?
In: TeDo Verlag GmbH (Hrsg.): *Steuerungstechnik aus der Cloud*, S. 48–49
- Kretschmer et al. 2015** Kretschmer, Felix; Lechler, Armin, 2015.
Teilnehmerverwaltung und -zuordnung innerhalb einer cloud-basierten Steuerungsplattform.
In: *Industrie 4.0 - innovative Konzepte zur Automatisierung*
- Kretschmer et al. 2016** Kretschmer, Felix; Borisov, Alexander; Pöschko, Reiner; Chemnitz, Moritz; Vick, Axel, 2016. Steuerungstechnik aus der Cloud: Anwendungsszenarien für cloudbasierte Produktion im Rahmen des Forschungsprojekts pICASSO.
wt Werkstattstechnik - Online **106** (5), S. 308–313
Verfügbar unter: [https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data\[article_id\]=85835](https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data[article_id]=85835)
- Kretschmer et al. 2018a** Kretschmer, Felix; Dripke, Caren; Wohlfeld, Andreas, 2018. Branchenorientierte Companion Specifications für OPC UA: Der Trend und seine Herausforderungen.
SPS Magazin **31** (9), S. 63–65
Verfügbar unter: https://www.sps-magazin.de/?inc=artikel/article_show&nr=147020
- Kretschmer et al. 2018b** Kretschmer, Felix; von Arnim, Christian; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2018. Persistent data backend for OPC UA namespaces in IT infrastructures.
Procedia CIRP **72**, S. 174–178
DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.233
- Larisch 2000** Larisch, Dirk, 2000.
Verzeichnisdienste im Netzwerk: NDS, Active Directory und andere.
München: Hanser.
ISBN 3-446-21290-6

- Lawall et al. 2011** Lawall, Alexander; Reichelt, Dominik; Schaller, Thomas, 2011.
Intelligente Verzeichnisdienst.
In: Barton, Thomas (Hrsg.): *Betriebliche Anwendungssysteme*.
Berlin: Verlag News et Media, S. 87–100
ISBN 978-3-936527-26-1
Verfügbar unter: <https://core.ac.uk/download/pdf/33985313.pdf#page=89>
- Lechler 2011** Lechler, Armin, 2011.
Konzeption einer funktional einheitlichen Applikationsschnittstelle für Ethernet-basierte Bussysteme,
Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2011 (Nicht für den Austausch), 2011
- Lechler et al. 2013** Lechler, Armin; Keinert, Matthias; Eberspächer, Philipp; Batke, Christoph; Schlechtendahl, Jan, 2013.
Analyse von Anwendungsfällen für OPC-UA als einheitliche Schnittstelle für Maschinendaten (OPC-UA).
Frankfurt: DFAM 9.
ISBN 978-3-8163-0645-0
- Lechler et al. 2017** Lechler, Armin; Verl, Alexander, Sunday 2017.
Software Defined Manufacturing Extends Cloud-Based Control.
In: *Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems*,
Sunday 4 June 2017, Los Angeles, California, USA, V003T04A025
- Lechler et al. 2018** Lechler, Armin; Kircher, Christian; Verl, Alexander, 2018. SDM – Software Defined Manufacturing.
wt Werkstattstechnik - Online **108** (5), S. 307–312
Verfügbar unter: [https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data\[article_id\]=89627](https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data[article_id]=89627)
- Lehman 1980** Lehman, Meir M., 1980. Programs, life cycles, and laws of software evolution.
IEEE Proceedings

- Levi et al. 2003** Levi, Paul; Rembold, Ulrich, 2003.
Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und Ingenieure.
4., aktualisierte und überarb. Aufl.
München: Hanser.
ISBN 978-3446219328
Verfügbar unter: <http://www.hanser-library.com/isbn/9783446219328>
- Liebhart 2007** Liebhart, Daniel, 2007.
SOA goes real: Service-orientierte Architekturen erfolgreich planen und einführen.
München: Hanser.
ISBN 978-3-446-41088-6
Verfügbar unter: <http://www.hanser-library.com/isbn/9783446410886DOI:10.3139/9783446413191>
- Lindner et al. 2000** Schneider Electric USA Inc., 2003.
PLC executive with integrated web server.
US6640140 (B1),
10/28/2003
- Linten et al. 2013** Linten, Martin; Schemberg, Axel; Surendorf, Kai, 2013.
PC-Netzwerke: Das umfassende Handbuch ; LAN und WLAN sicher und performant einrichten ; Windows, OS X und Linux vernetzen ; VoIP, Streaming, Virtualisierung und Cloud-Computing nutzen ; aktuell auch zu Windows 8.
6., aktualisierte und erw. Aufl.
Bonn: Galileo Press.
Galileo Computing.
ISBN 978-3-8362-1899-3
Verfügbar unter: <http://www.vlb.de/Get-Blob.aspx?strDisposition=a&strIsbn=9783836218993>
- Linthicum 2005** Linthicum, Dave, 2005.
UDDI is a Dead Parrot.
Verfügbar unter: https://web.archive.org/web/20060103121926/http://weblog.in-foworld.com/realworldsoa/archives/2005/12/uddi_is_a_dead.html
Zugriff am: 04.03.2019

- Linux Foundation 2014** Linux Foundation, 2014.
2014 Enterprise End User Trends Report: Fourth Annual Survey of Enterprise Linux Users.
Verfügbar unter: https://www2.thelinuxfoundation.org/1/6342/2014-12-02/ymp9w/6342/117822/lf_end_user_report_1214.pdf
Zugriff am: 27.02.2019
- Mahnke et al. 2009** Mahnke, Wolfgang; Leitner, Stefan-Helmut; Damm, Matthias, 2009.
OPC Unified Architecture.
1st ed.
Berlin: Springer.
ISBN 9783540688983
Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=437827>
- Mathers et al. 2018** Mathers, Bill; olprod, 2018.
Was ist eine Hybrididentität?
Verfügbar unter: <https://docs.microsoft.com/de-de/azure/active-directory/hybrid/whatis-hybrid-identity>
Zugriff am: 08.02.2019
- Mathes et al. 2009** Mathes, Markus; Gärtner, Jochen; Dohmann, Helmut; Freisleben, Bernd, 2009 - 2009.
SOAP4IPC: A Real-Time SOAP Engine for Industrial Automation.
In: *2009 17th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing*,
18.02.2009 - 20.02.2009, Weimar, Germany, S. 220–226
- Melzer 2010** Melzer, Ingo, 2010.
Service-orientierte Architekturen mit Web Services: Konzepte - Standards - Praxis.
4. Aufl.
Heidelberg, Neckar: Spektrum Akademischer Verlag.
ISBN 978-3-8274-2550-8
Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10379408DOI:10.1007/978-3-8274-2550-8>

- Melzer et al. 2007** Melzer, Ingo; Werner, Sebastian, 2007.
Service-orientierte Architekturen mit Web Services: Konzepte - Standards - Praxis.
2. Aufl.
München: Elsevier Spektrum Akad. Verl.
ISBN 978-3-8274-1885-2
Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2922213&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- Microsoft Corp. 2017a** Microsoft Corp., 2017.
Konfigurieren von AD FS zum Authentifizieren von Benutzern in LDAP-Verzeichnissen gespeichert.
Verfügbar unter: <https://docs.microsoft.com/de-de/windows-server/identity/ad-fs/operations/configure-ad-fs-to-authenticate-users-stored-in-ldap-directories>
Zugriff am: 27.02.2019
- Microsoft Corp. 2017b** Microsoft Corp., 2017.
History of DCOM.
Verfügbar unter: [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/6zzy7zky\(v=vs.140\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/6zzy7zky(v=vs.140))
Zugriff am: 04.03.2019
- Microsoft Corp. 2018** Microsoft Corp., 2018.
July 30, 2018 - KB4346877.
Verfügbar unter: <https://support.microsoft.com/en-us/help/4346877/windows-10-update-kb4346877>
Zugriff am: 04.03.2019
- Microsoft Corp. 2019a** Microsoft Corp., 2019.
KB4487044 (OS Build 17763.316).
Verfügbar unter: <https://support.microsoft.com/en-us/help/4487044>
Zugriff am: 27.02.2019
- Microsoft Corp. 2019b** Microsoft Corp., 2019.
Azure Active Directory – Preise.
Verfügbar unter: <https://azure.microsoft.com/de-de/pricing/details/active-directory/>
Zugriff am: 08.02.2019
- Mínguez 2012** Mínguez, Jorge, 2012.
A service-oriented integration platform for flexible information provisioning in the real-time factory.
Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2012.
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-74225>

- OPC Foundation a** OPC Foundation.
Unified Architecture.
Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
Zugriff am: 01.11.2018
- OPC Foundation b** OPC Foundation.
What is OPC?
Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>
Zugriff am: 01.05.2016
- OPC Foundation 07.02.18** Industry Standard Specification Part 12:07.02.18.
OPC Unified Architecture Discovery and Global Services.
- OPC Foundation 2014** OPC Foundation, 2014.
OPC Unified Architecture: Wegbereiter der 4. industriellen (R)Evolution, Broschüre.
Verfügbar unter: https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2014/03/OPC_UA_I_4.0_Wegbereiter_DE_v2.pdf
Zugriff am: 01.05.201623.05.2016
- OPC Foundation 2016a** OPC Foundation, 2016.
OPC UA Local Discovery Server with Multicast Extensions (LDS-ME).
Verfügbar unter: <https://opcfoundation.github.io/UA-LDS/>
Zugriff am: 27.02.2019
- OPC Foundation 2016b** OPC Foundation, 2016.
OPC UA Local Discovery Server with Multicast Extensions (LDS-ME).
Verfügbar unter: <http://opcfoundation.github.io/UA-LDS/>
Zugriff am: 20.02.2019
- OPC Foundation 2017** Companion Specification 40502:2017-07.
OPC UA for Computerized Numerical Control (CNC) Systems.
- OpenLDAP Foundation 2013a** OpenLDAP Foundation, 2013.
What LDAPv3 features/extensions are NOT supported by the OpenLDAP server?
Verfügbar unter: <https://www.openldap.org/faq/data/cache/649.html>
Zugriff am: 27.02.2019

- OpenLDAP Foundation 2013b** OpenLDAP Foundation, 2013.
What LDAPv3 features/extensions are supported by the OpenLDAP server?
Verfügbar unter: <https://www.openldap.org/faq/data/cache/645.html>
Zugriff am: 27.02.2019
- OpenLDAP Foundation 2013c** OpenLDAP Foundation, 2013.
Are "packaged" releases of OpenLDAP Software available?
Verfügbar unter: <http://www.openldap.org/faq/data/cache/108.html>
Zugriff am: 27.02.2019
- Özkan 2019a** Özkan, Serkan, 2019.
CVE Details: The ultimate security vulnerability database.
Verfügbar unter: <https://www.cvedetails.com>
Zugriff am: 25.02.2019
- Özkan 2019b** Özkan, Serkan, 2019.
CVE Details: The ultimate security vulnerability database.
Verfügbar unter: https://www.cvedetails.com/cvss-score-charts.php?fromform=1&vendor_id=&product_id=755&startdate=1999-01-01&enddate=2019-06-10
Zugriff am: 10.06.2019
- Papazoglou 2003** Papazoglou, M. P., 2003.
Service-oriented computing: concepts, characteristics and directions.
In: *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*,
10-12 Dec. 2003, Rome, Italy, S. 3–12
- Pape 2011** Pape, Miliou, 2011.
TwinCAT OPC UA to Integrate the Shop Floor with the Top Floor SAP Manufacturing Demo.
Verfügbar unter: <http://ftp.beckhoff.com/download/Software/TwinCAT/TwinCAT2/Solutions/PLC-ConnectedTo-SAP/OPC-UA-SAP-Beckhoff-v2.pdf>
Zugriff am: 12.03.2019

- Paul 2009** Paul, Georg, 2009.
Grundlagen der Informatik für Ingenieure: Eine Einführung mit C/C++.
1. Aufl., unveränd. Nachdr.
Wiesbaden: Teubner.
Studium.
ISBN 3-519-00428-3
- Poettering et al. 2020** Poettering, Lennart; Lloyd, Trent; Simons, Sjoerd, 2020.
Welcome to Avahi.
Verfügbar unter: <https://www.avahi.org/>
Zugriff am: 20.06.2020/22.02.2019
- Pritschow 2006** Pritschow, Günter, 2006.
Einführung in die Steuerungstechnik: Mit 388 Bildern und 40 Tab.
München, Wien: Hanser.
ISBN 3-446-21422-4
- Regen 2017** Regen, Martin, 2017.
UA .Net Standard Global Discovery Server and Client.
Verfügbar unter: <https://github.com/OPCFoundation/UA-.NETStandard/blob/master/SampleApplications/Samples/GDS/README.md>
Zugriff am: 27.02.2019
- Riggert 2012** Riggert, Wolfgang, 2012.
Rechnernetze: Grundlagen - Ethernet - Internet; mit ... 61 Beispielen und 120 Fragen zur Wissensüberprüfung.
4., aktualisierte und erw. Aufl.
München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.
ISBN 3-446-43164-0
- Saint-Andre 2011** Saint-Andre, P., 2011.
Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core, RFC6120.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc6120>
Zugriff am: 01.03.2019

- SAP SE 2019** SAP SE, 2019.
SAP Plant Connectivity: Harness the IIoT with manufacturing automation software.
Verfügbar unter: <https://www.sap.com/products/manufacturing-automation-plant-connectivity.product-capabilities.html#why-sap>
Zugriff am: 12.03.2019
- Schaar 2018** Schaar, Dirk, 2018.
SPS-Studie: Trend zu OPC UA und Cloud.
Verfügbar unter: <https://www.industrielle-automation.net/sps-studie-trend-zu-opc-ua-und-cloud/>
Zugriff am: 27.02.2019
- Schallehn 2008** Schallehn, Eike (Hrsg.), 2008.
Grundlagen der Informatik für Ingenieure.
Magdeburg
- Schaller 1998** Schaller, Thomas, 1998.
Organisationsverwaltung in CSCW-Systemen
- Schill et al. 2012** Schill, Alexander; Springer, Thomas, 2012.
Verteilte Systeme: Grundlagen und Basistechnologien.
2. Aufl. 2012.
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
eXamen.press.
ISBN 978-3-642-25796-4
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25796-4> DOI: 10.1007/978-3-642-25796-4
- Schlechtendahl 2016** Schlechtendahl, Jan, 2016. Steuerungstechnik aus der Cloud: Vision, Fiktion oder schon Realität.
SPS Magazin (06/16)
- Schlechtendahl et al. 2014** Schlechtendahl, Jan; Kretschmer, Felix; Contreras, Louis; Lechler, Armin, 2014.
Cloudbasierte Steuerungen für teilautomatisierte Handarbeitsplätze.
In: Höpf, Michael; Verl, Alexander (Hrsg.): *SPS IPC Drives 2014: Elektrische Automatisierung, Systeme und Komponenten. Internationale Fachmesse und Kongress 25.-27.11.2014, Nürnberg; Tagungsband.*
Aachen: Apprimus
ISBN 9783863592721

- Schlechtendahl et al. 2015** Schlechtendahl, Jan; Kretschmer, Felix; Lechler, Armin, 2015. I4.0 - totale Vernetzung von der Klemme bis zur Cloud, S. 8–11.
Industrie 4.0 Management **2015** (6.2015), Dezember 2015
- Schroth et al. 2007** Schroth, C; Janner, T., 2007. Web 2.0 and SOA: Converging Concepts Enabling the Internet of Services.
IT Professional **9** (3), S. 36–41
DOI: 10.1109/MITP.2007.60
- Schuh et al. 2017** Schuh, Günther; Riesener, Michael; Barg, Sebastian; Mattern, Christian, 2017. Handlungsfelder zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 in der F & E.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb **112** (1-2), S. 86–90
DOI: 10.3139/104.111669
- Siamwalla et al. 1998** Siamwalla, R; Sharma, R; Keshav, S., 1998. Discovering internet topology.
Unpublished manuscript
- Siepmann 2016** Siepmann, David, 2016. Industrie 4.0 - technologische Komponenten.
In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 : Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*.
Berlin: Springer Gabler, S. 47–72
ISBN 978-3-662-48504-0
- Silcher 2014** Silcher, Stefan, 2014.
Adaptive und wandlungsfähige IT-Architektur für Produktionsunternehmen.
Stuttgart, Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2014, 2014.
<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9445>
- StatCounter 2019** StatCounter, 2019.
Marktanteile der führenden Betriebssysteme weltweit von Januar 2009 bis Januar 2019.
Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157902/umfrage/marktanteil-der-genutzten-betriebssysteme-weltweit-seit-2009/>
Zugriff am: 25.02.2019

- Stein 2008** Stein, Erich, 2008.
Taschenbuch Rechnernetze und Internet: Mit 94 Tabellen.
3., neu bearb. Aufl.
München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.
ISBN 3446409769
- Steinkamp 2010** Steinkamp, Markus, 2010.
Konzeption und Erstellung eines IT-Grundschutz-Bausteins für den Verzeichnisdienst OpenLDAP.
Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Integrierte Informationssysteme, Masterarbeit, 2010.
https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Hilfsmittel/Extern/Diplomarbeiten/OpenLDAP_Steinkamp.pdf;jsessionid=A732A60568FD5CBDCB20841E6FD23AE8.2_cid360?__blob=publicationFile&v=1
- Stenzel 2005** Stenzel, H., 2005. Verzeichnisdienste und Identity Management in Hochschulen – ein Überblick.
PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation **28** (3), S. 176–181
DOI: 10.1515/PIKO.2005.176
- Takai 2017** Takai, Daniel, 2017.
Architektur für Websysteme: Serviceorientierte Architektur, Microservices, domänengetriebener Entwurf.
München: Hanser.
Hanser eLibrary.
ISBN 978-3-446-45056-1
Verfügbar unter:
<http://dx.doi.org/10.3139/9783446452480>DOI:
10.3139/9783446452480
- Tsai 2017** Tsai, Peter, 2017.
Windows 10 Adoption: Who's using it two years after launch?
Verfügbar unter: <https://community.spiceworks.com/networking/articles/2719-windows-10-adoption-who-s-using-it-two-years-after-launch>
Zugriff am: 27.02.2019

- Tsalgatidou et al. 2002** Tsalgatidou, Aphrodite; Pilioura, Thomi, 2002. An Overview of Standards and Related Technology in Web Services.
Distributed and Parallel Databases **12** (2), S. 135–162
DOI: 10.1023/A:1016599017660
- VDI/VDE April 2013** VDI/VDE-Gesellschaft Mess und Automatisierungstechnik (GMA), 2013 : 9.
Cyber-physical systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation: Thesen und Handlungsfelder
- Verl et al. 2016** Verl, Alexander; Vorderer, Marian; Kretschmer, Felix; Fechter, Manuel, 2016. Wandlungsfähige Produktion von morgen: Anwendungsszenarien und Umsetzung in der Forschungsfabrik ARENA2036.
wt Werkstattstechnik - Online **106** (7/8), S. 533–538
Verfügbar unter: [https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data\[article_id\]=86236](https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data[article_id]=86236)
- Vogel-Heuser 2017** Vogel-Heuser, Birgit, 2017.
Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik.
In: *Handbuch Industrie 4.0*.
Berlin: Springer Vieweg, S. 33–44
ISBN 978-3-662-53247-8
- Vogel-Heuser et al. 2008** Vogel-Heuser, Birgit; Kegel, Gunther; Bender, Klaus; Wucherer Klaus, 2008. Global Information Architecture for Industrial Automation, S. 108–115.
atp **2009** (1-2.2009), 19.12.2008
- Vorderer et al. 2016a** Vorderer, Marian; Junker, Stefan; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2016. Wandlungsfähiges Konzept für die Montage 4.0: Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von automatisierten Montageanlagen.
wt Werkstattstechnik - Online (5), S. 314–319
- Vorderer et al. 2016b** Vorderer, Marian; Junker, Stefan; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2016 - 2016.
CESA 3 R: Highly versatile plug-and-produce assembly system.
In: *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*,
21.08.2016 - 25.08.2016, Fort Worth, TX, USA, S. 745–750

- Vorderer et al. 2018** Vorderer, Marian; Kretschmer, Felix; Ringhoffer, Tim; Verl, Alexander, 2018 - 2018.
Platform for Information Exchange in Versatile Production Systems.
In: *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 20.11.2018 - 22.11.2018, Stuttgart, S. 1–5
- W3Techs 2019** W3Techs, 2019.
Usage of operating systems for websites.
Verfügbar unter: https://w3techs.com/technologies/overview/operating_system/all
Zugriff am: 27.02.2019
- Wang et al. 1997** Wang, Yi-Min; Damani, O. P; Lee, Woei-Jyh, 1997.
Reliability and availability issues in distributed component object model (DCOM).
In: *1997 Fourth International Workshop on Community Networking Processing*, 11-12 Sept. 1997, Atlanta, GA, USA, S. 59–63
- Weerawarana 2008** Weerawarana, Sanjiva, 2008.
Web services platform architecture: SOAP, WSDL, WS-policy, WS-addressing, WS-BPEL, WS-reliable messaging and more.
5. printing.
Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall/PTR.
ISBN 0-13-148874-0
- Westkämper et al. 2013** Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim (Hrsg.), 2013.
Digitale Produktion.
Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
ISBN 978-3-642-20258-2
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20259-9>
DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9
- Wikipedia 2019** Wikipedia, 2019.
Active Directory.
Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Active_Directory
Zugriff am: 20.02.2019

- Wollschlaeger et al. 2017** Wollschlaeger, Martin; Sauter, Thilo; Jasperneite, Juergen, 2017. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0.
IEEE Industrial Electronics Magazine **11** (1), S. 17–27
DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104
- Wollschlaeger et al. 2018** Wollschlaeger, Martin; Debes, Thomas; Kalhoff, Johannes; Wickinger, Jens; Dietz, Holger; Feldmeier, Günter; Michels, Jan; Scholing, Heinz; Billmann, Meik, 2018.
Kommunikation im Industrie-4.0-Umfeld: Welchen Herausforderungen hat sich die industrielle Kommunikation im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0 zu stellen?
Frankfurt am Main
Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/April/Kommunikation_im_Industrie-4.0-Umfeld/Kommunikation_im_Industrie-4.0-Umfeld_Download.pdf
- Wu et al. 2008** Wu, B; Xi, L.-F; Zhou, B.-H., 2008. Service-oriented communication architecture for automated manufacturing system integration.
International Journal of Computer Integrated Manufacturing **21** (5), S. 599–615
DOI: 10.1080/09511920701370746
- Xu 2012** Xu, Xun, 2012. From cloud computing to cloud manufacturing **28** (1), S. 75–86
DOI: 10.1016/j.rcim.2011.07.002
- Yeong et al. 1993** Yeong, W; Howes, T; Kille, S., 1993.
X.500 Lightweight Directory Access Protocol, RFC1487.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc1487>
Zugriff am: 20.02.2019
- Zahn et al. 2017** Zahn, Peter; Frick, Florian; Lechler, Armin, 2017. Perspektive TSN: Echtzeitfähiges Ethernet für die Automatisierung.
In: TeDo Verlag GmbH (Hrsg.): *Steuerungstechnik aus der Cloud: Echtzeitfähiges Ethernet für die Automatisierung*, S. 43–44

Zeilenga 2006

Zeilenga, K., 2006.
*Lightweight Directory Access Protocol (LDAP):
Technical Specification Road Map*, RFC4510.
Verfügbar unter: <https://tools.ietf.org/html/rfc4510>
Zugriff am: 22.02.2019

Zeppenfeld et al. 2009

Zeppenfeld, Klaus; Finger, Patrick, 2009.
SOA und WebServices.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidel-
berg.
Informatik im Fokus.
ISBN 9783540769910
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-76991-0>
DOI: 10.1007/978-3-540-76991-0



In dieser Arbeit wird eine Architektur entworfen, welche den Bedürfnissen einer serviceorientierten Produktionstechnik gerecht wird und einen Verzeichnisdienst bereitstellt, der unter Adaption serviceorientierter Architekturen den Schulterschluss von IT und OT ermöglicht. Hierfür werden zunächst verfügbare Technologien und Lösungen verglichen.

Durch die weite Verbreitung von Verzeichnisdiensten in der IT existieren bereits zahlreiche Lösungen, die sich mit sehr unterschiedlichem Erfolg durchgesetzt haben. In der OT hingegen existieren bisher keine vergleichbaren Lösungen, dennoch stehen standardisierte Technologien zur Verfügung, welche die Funktionalität eines Verzeichnisdienstes erfüllen können.

Auf Basis von OPC UA wird ein Verzeichnisdienst entworfen, der Fähigkeiten und Schnittstellen von cyberphysischen Systemen im Produktionsumfeld bereitstellt. Dies erfolgt über die Abbildung der Daten in Informationsmodellen, welche auf LDAP-Verzeichnisse in der Office-IT synchronisiert werden können.