

Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der
Fertigungsautomatisierung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 429

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2023

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

Bitte zitieren als

Vukovic, Petar. 2023. *Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 429. Erlangen: FAU University Press.
DOI: 10.25593/978-3-96147-674-9.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-673-2 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-674-9 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-674-9

**Simulation komplexer Kommunikationssysteme
in der Fertigungsautomatisierung**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Petar Vukovic, M.Eng.

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 25.05.2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, HSU Hamburg

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die Unterstützung während meiner Forschung, die wertvollen Impulse, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die wissenschaftliche Freiheit, welche die erfolgreiche Arbeit ermöglichten. Zudem möchte ich mich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, Leiter des Instituts für Automatisierungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, bedanken.

Des Weiteren geht mein Dank an Dr.-Ing. Stephan Höme und Dr.-Ing. Sven Kerschbaum der Siemens AG für den wertvollen Austausch und Diskussionen sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen während des Projekts.

Großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen sowohl für deren fachliche Diskussionen als auch gemeinsame Aktivitäten während meiner Zeit am Lehrstuhl. Hervorheben möchte ich Tobias Lechler, der durch seine Plant Simulation-Expertise maßgeblich bei der Ideenfindung half, meinen Forschungsbereichsleiter Jonathan Fuchs, der mich stets bei allen Anliegen unterstützte und meinen ehemaligen Bürokollegen Martin Sjarov für die angenehme Zeit und die tolle Organisation der unvergesslichen Kollegenprüfung.

Schließlich gebührt ein besonders herzlicher Dank meinen Eltern, welche mir diesen Bildungsweg erst ermöglichten und mich jederzeit und uneingeschränkt bei allen Entscheidungen und Stationen auf meinem bisherigen Lebensweg unterstützten.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Vorgehensweise	2
2 Stand der Technik und Forschung	5
2.1 Automatisierte Produktionsanlage	5
2.1.1 Lebenszyklus einer automatisierten Produktionsanlage	6
2.1.2 Die Automatisierungspyramide und ihr Einfluss auf die Struktur innerhalb der Produktion	8
2.1.3 Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide und Auswirkungen auf Kommunikationsbeziehungen	10
2.1.4 Kommunikationsschnittstellen innerhalb der Produk- tion	11
2.1.5 Verwaltungsschale zur Informationsbeschreibung .	13
2.2 Kommunikationsanforderungen	15
2.2.1 Dienstgüteparameter - Quality of Service	15
2.2.2 Echtzeit	19
2.2.3 Deterministischer und nichtdeterministischer Kom- munikationsverkehr	21
2.2.4 Spezielle Anforderungen an industrielle Kommunika- tion	23
2.2.5 Klassifizierung von Kommunikationsanforderungen nach 3GPP	24
2.3 Industrielle Kommunikationstechnologien und -protokolle in der Produktion	26
2.3.1 OSI-Referenzmodell	27
2.3.2 Industrielle Kommunikationsmedien	29
2.3.3 5G - Neuer industrieller Funkstandard	31
2.3.4 WiFi 6	38
2.3.5 Industrielle Feldbusse und Kommunikationsprotokolle	39
2.4 Planung und Simulation	46
2.4.1 Produktionsplanung und Materialflusssimulation .	46

2.4.2	Ereignisdiskrete und mathematische Kommunikations- onssimulation	47
2.5	Bestehende Forschungsansätze	49
2.6	Ableitung des Forschungsbedarfs unter Abgrenzung bestehender Forschungsansätze	51
3	Analyse der Komplexität und Herausforderungen bei industriellen Kommunikationsnetzwerken	55
3.1	Bedarf und Motivation der Umfrage	55
3.2	Umfragedesign, Fragestellung und Verteilung	56
3.3	Datenauswertung der Umfrage	59
3.4	Bewertung der Umfrageergebnisse und Ableitung der Handlungsbedarfe	65
3.4.1	Erklärungen der hohen und steigenden Komplexität von industriellen Kommunikationsnetzwerken	65
3.4.2	Erklärungen des Einsatzes von Simulationssoftware bei industriellen Kommunikationsnetzwerken	66
4	Konzept	69
4.1	Zusammenführung der Anforderungen aus Literatur und der Umfrageergebnisse	69
4.2	Co-Simulationsframework PLANET	70
5	Strukturierung industrieller IT-/OT-Applikationen hinsichtlich Kommunikationsanforderungen mithilfe eines Kommunikationstechnologie-Portfolios	75
5.1	Definition heutiger und zukünftiger industrieller Applikationen in der Fertigungsautomatisierung	76
5.2	Applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen in der automatisierten Produktionsanlage	78
5.2.1	Dynamische Kommunikationsanforderungen	79
5.2.2	Kommunikationsbeziehung in der automatisierten Produktionsanlage	80
5.2.3	Parameter applikationsbezogener Kommunikations- anforderungen	81
5.3	Applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen anhand einer beispielhaften automatisierten Produktionsanlage	83

5.4	Kommunikationstechnologie-Portfolio von industriellen Applikationen	84
5.4.1	Definition und Erläuterung der Eigenschaften des Portfolios	85
5.4.2	Erstellung der Technologiegrenzen innerhalb des Portfolios	86
5.4.3	Einordnung der Applikationen in das Portfolio	88
5.5	Fazit	89
6	Modellierung von holistischen Kommunikationsanforderungen automatisierter Produktionsanlagen	91
6.1	Kommunikationsanforderungen von Applikationen in der Planungsphase	91
6.2	Kommunikationseigenschaften in der Verwaltungsschale	93
6.2.1	Kommunikation auf Metaebene zwischen aktiven Verwaltungsschalen	93
6.2.2	Kommunikation mit einer reaktiven Verwaltungsschale	94
6.3	Abbildung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen in der Verwaltungsschale	96
6.3.1	Teilmodell Simulation	96
6.3.2	Teilmodell Simulation-Kommunikation	97
6.4	Prototypische Implementierung eines Teilmodells in der Verwaltungsschale	99
6.5	Transfer der Informationen aus der Verwaltungsschale	100
6.5.1	Anforderungen an die Schnittstelle	101
6.5.2	Konzeption der Schnittstelle	102
6.6	Fazit	103
7	Co-Simulation von komplexen industriellen Kommunikationsnetzwerken	105
7.1	Anforderungen und Zielsetzung an die Co-Simulation	105
7.2	Gesamtkonzept und Informationsaustausch der Co-Simulation	106
7.2.1	Gesamtarchitektur	107
7.3	Auswahl und Bewertung geeigneter Simulationswerkzeuge zur Co-Simulation	108
7.3.1	Definition der Kriterien zur Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge	109

7.3.2	Analyse vorhandener Simulationswerkzeuge zur Materialfluss- und Kommunikationssimulation . . .	111
7.3.3	Bewertung von Simulationswerkzeugen anhand einer Matrix	114
7.4	Werkzeuge und Aufgaben innerhalb des Gesamtkonzepts .	115
7.4.1	Produktionsplanungs- und Materialflusssimulation	115
7.4.2	Kommunikationssimulation	117
7.4.3	Konfigurationsexport und -import zur Initialisierung von OMNeT++	118
7.4.4	Socketbasierter Datenaustausch zur Informationssynchronisation	120
7.4.5	Ergebnisse der Co-Simulation	122
7.5	Fazit	123
8	Umsetzung und Validierung des Gesamtsystems	125
8.1	Prototypische Implementierung	125
8.1.1	Anpassungen Plant Simulation	125
8.1.2	Anpassungen OMNeT++	127
8.1.3	Modellaufbau anhand der beispielhaften Produktion	128
8.1.4	Technologieflexibilität in der Co-Simulation	129
8.1.5	Simulationsszenario und -ergebnisse	132
8.2	Validierung der Simulation anhand eines realen Anwendungsfalls	134
8.2.1	Validierungsszenario	134
8.2.2	Messung des Kommunikationsaufkommens	136
8.3	Grenzen der Validierung und der Co-Simulation	138
8.4	Fazit	138
9	Zusammenfassung und Ausblick	141
10	Summary and Outlook	145
Anhang	149
Literaturverzeichnis	151

Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
APA	Automatisierte Produktionsanlage
CPS	Cyber Physical System
ERP	Enterprise Resource Planning
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
HMI	Human-Machine-Interface
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnologie
MC	Motion Control
MES	Manufacturing Execution System
NLOS	Non-Line-of-Sight
QoS	Quality of Service
OPC	Open Platform Communications
OSI	Open Systems Interconnection
OT	Operational Technology (Betriebstechnologie)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
TSN	Time Sensitive Networking
UDP	User Datagram Protocol
VWS	Verwaltungsschale

Bildverzeichnis

Bild 1:	Vorgehensweise	3
Bild 2:	Übersicht Stand der Technik	5
Bild 3:	Lebenszyklusphasen einer APA	7
Bild 4:	Automatisierungspyramide	8
Bild 5:	Auflösung der Automatisierungspyramide	11
Bild 6:	Drei Ebenen der industriellen Kommunikation	12
Bild 7:	QoS über gesamte Infrastruktur	16
Bild 8:	QoS Parameter Latenz und Jitter	17
Bild 9:	QoS Parameter Aktualisierungszeit	18
Bild 10:	Harte und weiche Echtzeit	20
Bild 11:	Deterministisch periodisch und aperiodisch	22
Bild 12:	OSI-Referenzmodell	27
Bild 13:	5G Dreieck	32
Bild 14:	5G Releases	36
Bild 15:	Netzwerktopologie	40
Bild 16:	PROFINET IRT	42
Bild 17:	PROFINET TSN OSI-Modell	44
Bild 18:	Anforderungen Literatur	53
Bild 19:	Umfrageverlauf	60
Bild 20:	Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke	60
Bild 21:	Häufigkeit der Planung ind. Kommunikationsnetzwerke	61
Bild 22:	Komplexität bei der Planung industrieller Kommunikationsnetzwerke	62
Bild 23:	Wichtigkeit von Simulationssoftware	62
Bild 24:	Einsatz von Simulationssoftware	64
Bild 25:	Anforderungen Literatur und Umfrage	70
Bild 26:	Co-Simulation-Framework PLANET	71
Bild 27:	Aufbau der Arbeit	72
Bild 28:	Heutige und Zukünftige Applikationen	79
Bild 29:	Beispielhafte APA	83
Bild 30:	Applikationsanforderungen FTS	85
Bild 31:	Aufbau Kommunikationstechnologie-Portfolio	86
Bild 32:	Portfolio Technologiegrenzen	88
Bild 33:	Portfolio Applikationen	89
Bild 34:	Konzept Verwaltungsschale	92
Bild 35:	VWS Interaktionsmanager	94
Bild 36:	Reaktive Verwaltungsschale	95
Bild 37:	Teilmodell Simulation	97
Bild 38:	Instanziierung Teilmodell Simulation-Kommunikation	100

Bild 39: Schnittstelle Methode	101
Bild 40: XML Aufbau	103
Bild 41: Gesamtarchitektur Co-Simulation grob	107
Bild 42: Gesamtarchitektur Co-Simulation FMC	108
Bild 43: Aufbau des Plant Simulation Modells	116
Bild 44: Aufbau des OMNeT++ Modells	118
Bild 45: Umwandlung der Simulationsdateien	119
Bild 46: Plant Simulation Netzwerkkomponenten	126
Bild 47: Plant Simulation Modell	129
Bild 48: OMNeT++ WiFi Konfiguration	131
Bild 49: OMNeT++ 5G Konfiguration	132
Bild 50: OMNeT++ Simulationsergebnisse	133
Bild 51: Plant Simulation Simulationsergebnisse	134
Bild 52: Validierungsaufbau	135
Bild 53: Messung Paketlaufzeit	136
Bild 54: Messung Applikation	137
Bild 55: Applikationsanforderungen Bearbeitungsstation	149
Bild 56: Applikationsanforderungen HMI	150
Bild 57: Applikationsanforderungen FTS 2	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Assetspezifisches Teilmodell einer sich in Betrieb befindenden Antriebsachse. [19]	14
Tabelle 2:	Unterschiedliche Dienstgüteanforderungen in Abhängigkeit zu den Ebenen und Bereichen einer Produktion. [35, 38]	24
Tabelle 3:	Parameter für die Charakterisierung des benötigten Kommunikationsnetzwerks [40]	25
Tabelle 4:	Parameter für die Charakterisierung der applikationsabhängigen Anforderungen, welche an die Schnittstelle gestellt werden [40]	26
Tabelle 5:	Vier Hauptwerkzeuge des 5G Standards [46]	33
Tabelle 6:	In welchen Bereichen sehen Sie das größte Potenzial beim Einsatz von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationsnetzwerke? (Mehrfachnennung möglich) . . .	63
Tabelle 7:	In welcher Phase des Lebenszyklus einer Anlage soll die Simulationssoftware optimalerweise unterstützen? (Mehrfachnennung möglich)	64
Tabelle 8:	Industrielle Applikationen zur Nutzung desselben Kommunikationsnetzwerks	77
Tabelle 9:	Definition der fünf Hauptkategorien für die Einordnung von industriellen Applikationen einer APA	78
Tabelle 10:	Möglichkeiten der Kommunikationsbeziehungen in einer flexiblen APA	80
Tabelle 11:	Erweiterung der Parameter für die Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk	81
Tabelle 12:	Erweiterung der Parameter für die Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle	82
Tabelle 13:	Resultierende Parameter für applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen	82
Tabelle 14:	Beschreibung der Applikationen in der beispielhaften APA	84
Tabelle 15:	Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk und die Kommunikationsschnittstelle im Teilmodell Simulation-Kommunikation der VWS	98
Tabelle 16:	Gewichtung der Kriterien zur Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge	110
Tabelle 17:	Bewertung der Simulationswerkzeuge anhand zuvor festgelegter Kriterien	114
Tabelle 18:	Bewertung der Simulationswerkzeuge nach Gewichtung der analysierten Kriterien	114

Tabelle 19: Datenstruktur der bidirektionalen Übertragung von Plant Simulation zu OMNeT++	121
Tabelle 20: Datenstruktur der bidirektionalen Übertragung von OMNeT++ zu Plant Simulation	121
Tabelle 21: Parametrierung des Mediums, welches die Funkwellen beeinflusst	130

1 Einleitung

Der Begriff Industrie 4.0 bezeichnet die umfassende digitale Transformation in der Produktion. Dieses Zukunftsprojekt soll über verschiedene Dimensionen hinweg den steigenden Anforderungen der Zukunft begegnen und industrielle Fertigungen in Deutschland sichern und ausbauen. Die intelligente Vernetzung innerhalb und zwischen den Produktionen ist das Kernthema. Dies soll durch konsequenten Ausbau und Integration von Kommunikationstechnik bei Maschinen und Abläufen ermöglicht werden. Ziel ist es, neue Möglichkeiten innerhalb der Fertigung zu schaffen. Dazu zählen unter anderem die flexible Produktion und die wandelbare Fabrik. Diese Lösungen ermöglichen eine schnelle und ressourceneffiziente Anpassung an sich stetig ändernde Anforderungen des Markts. [1]

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die zunehmende Vernetzung von Maschinen und Abläufen stellt eine große Herausforderung für das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk dar. Um Lösungen wie eine flexible Produktion und die wandelbare Fabrik, welche sich an ändernde Anforderungen anpassen kann, zukunftssicher aufzustellen, wird zunehmend die Integration von funkbasierter Kommunikationstechnologie durchgeführt. Dadurch werden eine hohe Flexibilität des Ortes in der Produktionshalle und die Bereitstellung mobiler Applikationen ermöglicht. Diese Art von Heterogenität in der Produktion, bei der kabelgebundene und funkbasierte Technologien koexistieren, stellt die Planenden vor neue Herausforderungen, denn die Planung von Kommunikationsnetzwerken dieser Dimension und Komplexität ist ohne softwarebasierte Unterstützung nicht in ausreichender Qualität zu bewerkstelligen. Doch nicht nur die zunehmende Heterogenität von Kommunikationstechnologien erhöht die Komplexität bei der Planung. Durch die kontinuierliche Vernetzung innerhalb der Produktion ergeben sich neue Applikationen im Umfeld der industriellen Fertigung. Das Stichwort ist die Konvergenz von Informationstechnologie (IT) und Betriebstechnologie (OT, Operational Technology). Diese ermöglicht es, Applikationen, welche bis dato lediglich im Umfeld der IT genutzt wurden, durch den Zusammenschluss von Kommunikationsnetzwerken auch im OT Bereich einzusetzen. [2-4]

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, welche Planende von Kommunikationsnetzwerken bereits in der frühen Phase des Lebenszyklus einer automatisierten Produktionsanlage (APA) bei der Planung unterstützt. Durch den frühen Ansatz im Lebenszyklus lassen sich hohe Fehlerkosten im

späteren Verlauf vermeiden und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit erhalten. Planende von APA nutzen bereits heute verschiedene Methoden und Werkzeuge, um die Planung effizient und fehlerfrei zu bewerkstelligen. Eine häufig anzutreffende Methode ist dabei die ereignisdiskrete Materialflusssimulation. Diese ermöglicht es, diverse Produktionsabläufe bereits im Vorfeld zu simulieren und anhand der Ergebnisse zu optimieren. Jedoch bilden heutige Materialflusssimulationen nicht das kommunikationstechnische Verhalten der Teilnehmer ab, welchen Einfluss diese auf das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk besitzen. Diese neuartige Kombination von zwei Simulatoren im Sinne einer Co-Simulation ermöglicht die Nutzung bereits vorhandener Informationen in der Materialflusssimulation. Dadurch können Kommunikationsnetzwerke frühzeitig und ressourceneffizient geplant werden. Die zu erforschende Methode soll einen Beitrag zur Komplexitätsreduktion beim Aufbau von Kommunikationsnetzwerken dienen. Hieraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Kann das Kommunikationsverhalten komplexer industrieller Automatisierungssysteme mittels Co-Simulation von ereignisdiskreter Materialflusssimulation und Kommunikationsnetzwerksimulation abgebildet werden?

1.2 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise dieser Arbeit erläutert. Bild 1 zeigt den Kapitelüberblick, welche Themen dabei adressiert werden.

Kapitel 2 widmet sich der strukturierten Analyse des Stands der Technik. Neben der Untersuchung von APA und deren Lebenszyklen soll zudem gezeigt werden, wie Informationen in der frühen Phase einer Planung verarbeitet werden. Dies dient als Grundlage für die nachfolgende Betrachtung von Kommunikationsanforderungen und industriellen Kommunikationstechnologien. Dazu werden für die Arbeit notwendige Fachtermini definiert und entscheidende Technologien, die bei der späteren Betrachtung berücksichtigt werden, erläutert. Die Untersuchung bestehender, für diese Arbeit relevanter Planungen und Simulationen sollen zusammen mit den bestehenden Forschungsansätzen die Grundlage für das methodische Vorgehen aufzeigen. Ziel dieses Kapitels ist die Ableitung des Forschungsbedarf unter Berücksichtigung bestehender Forschungsansätze.

In Kapitel 3 wird eine quantitative Studie vorgestellt. Diese soll zusammen mit dem abgeleiteten Forschungsbedarf in Kapitel 2 die Anforderungen schärfen.



Bild 1: Vorgehensweise der Arbeit

Dazu beantworten Teilnehmende der Umfrage Fragen bezüglich des Einsatzes von Kommunikationstechnik und Simulationen im Produktionskontext. Darüber hinaus soll auch die persönliche Meinung über die zukünftige Entwicklung eingeholt werden, um diese am Forschungsbedarf zu spiegeln. Auf Basis der Umfrageergebnisse wird ein gezieltes Vorgehen zur Erforschung der neuen Methode gewährleistet.

In Kapitel 4 werden die herausgearbeiteten Forschungsbedarfe aus Kapitel 2 und den Umfrageergebnissen in Kapitel 3 zusammengeführt, um Anforderungen an den Lösungsansatz dieser Arbeit zu etablieren. Dies dient als Grundlage für die strukturierte Ausarbeitung der notwendigen Handlungsfelder zur Beantwortung der Forschungsfrage. Zudem wird in diesem Kapitel das in dieser Arbeit entstehende Co-Simulationsframework PLANET inklusive der notwendigen Vorarbeiten eingeführt.

Kapitel 5 befasst sich mit der strukturierten Analyse industrieller Applikationen. Diese sollen hinsichtlich ihrer Kommunikationseigenschaften untersucht und die daraus resultierenden Parameter definiert werden. Zusammen mit dynamischen Parametern aus der Materialflusssimulation ergeben sich applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen, welche mithilfe eines Kommunikationstechnologie-Portfolios visuell dargestellt werden. Dieses Portfolio dient letztendlich als Entscheidungshilfe für Planende, ob die Umsetzung einer Applikation mithilfe funkbasierter Lösungen möglich ist, oder eine kabelgebundene Technologie bevorzugt werden sollte.

Die Modellierung applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen erfolgt in Kapitel 6. Dazu soll eine standardisierte Beschreibungssprache entwickelt werden, welche sich in die Verwaltungsschale integrieren lässt. Dabei wird ein zusätzlicher Beitrag für die Vereinheitlichung der Informationsablage von Kommunikationsanforderungen vorgeschlagen. Ziel dieses Kapitels ist die Bereitstellung applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen mithilfe einer Schnittstelle. Dies ermöglicht den Zugriff und anschließende Verarbeitung des Co-Simulationsframeworks PLANET auf diese Informationen.

In Kapitel 7 wird der Co-Simulationsteil des Frameworks PLANET vorgestellt. Dazu wird zunächst die notwendige Architektur von PLANET konzipiert, um im Anschluss eine strukturierte Auswahl und Bewertung geeigneter Simulationswerkzeuge durchzuführen. In diesem Kapitel werden alle bereits erforschten Erkenntnisse aus vorherigen Kapiteln genutzt und in die Co-Simulation eingepflegt. Dies stellt den letzten Baustein für das holistische Co-Simulationsframework PLANET für Planende von Kommunikationsnetzwerken.

Ziel von Kapitel 8 ist das Aufzeigen der prototypischen Umsetzung und die darauffolgende Validierung des Co-Simulationsansatzes. Hierbei wird zunächst eine prototypische Implementierung der Co-Simulation vorgenommen und eine beispielhafte Produktion eingeführt. Diese soll als Basis für das Simulationsszenario bilden. Die Ergebnisse der Simulation werden zudem vorgestellt. Anschließend wird eine Validierung anhand eines definierten Szenarios vorgenommen. Die Messung des Kommunikationsaufkommens und der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen werden anschließend genutzt, um sie mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Schlussendlich folgt eine Bewertung des Vergleichs und über die Aussagequalität der Simulation.

Die Zusammenfassung der erforschten Ergebnisse und einen Ausblick über mögliche und notwendige Folgearbeiten wird in Kapitel 9 gegeben.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der vorliegenden Arbeit erläutert. Auf Basis einer Analyse von APA mit dem Fokus der Kommunikation und ihren Schnittstellen wird anschließend eine nähere Betrachtung der Kommunikationsanforderungen im industriellen Umfeld durchgeführt. Für die Einhaltung dieser Anforderungen sind diverse Kommunikationstechnologien und ihre -protokolle zuständig. Damit sowohl APA als auch die zugrundeliegenden Kommunikationsnetzwerke optimal funktionieren, bedarf es Planung und Simulation. Die hierzu möglichen Methoden und Werkzeuge werden abschließend vorgestellt.

Bild 2 zeigt die Struktur dieses Kapitels. In folgenden Kapiteln wird zunächst eine strukturierte Analyse vorhandener Literatur und die Definition verschiedener Fachtermini durchgeführt. Anschließend werden bestehende Forschungsansätze im Bereich der Kommunikationssimulation im industriellen Umfeld analysiert, um abschließend die Handlungsbedarfe unter Abgrenzung der bestehenden Forschungsansätze aus der Literatur abzuleiten.

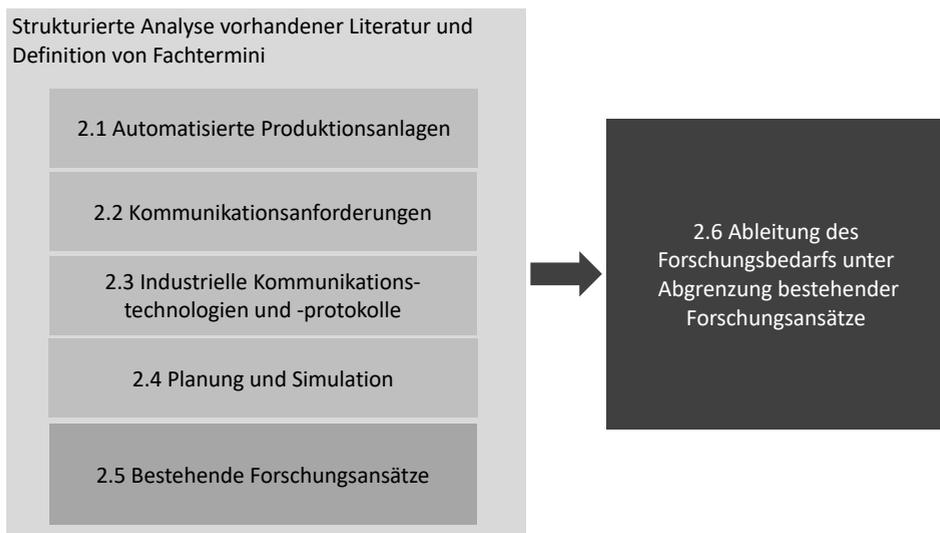


Bild 2: Übersicht der Kapitel und Strukturierung des Stands der Technik

2.1 Automatisierte Produktionsanlage

Unter Produktionsanlagen wird eine Vernetzung mehrerer Maschinenkomponente bzw. Maschinenzellen zur Produktion bzw. Recycling von Gütern ver-

standen. Die Automatisierung der Einzelkomponenten erfolgt dabei zunehmend auf Grundlage speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS). Die Automatisierung von Produktionsanlagen ermöglicht den Betrieb nach vorgegebenen Abläufen ohne bzw. mit geringer Unterstützung des Menschen. Dabei zeichnen sich automatisierte Produktionsanlagen (APA) durch eine hohe Flexibilität während des Betriebs, Wandelbarkeit, Individualisierung von Produkten und einen hohen Grad an Vernetzung sowohl innerhalb als auch außerhalb der APA aus. [5]

In diesem Kapitel werden zunächst in der Literatur vorhandene Lebenszyklen einer APA analysiert. Anschließend wird die Automatisierungspyramide betrachtet, um anhand der Ebenen typische Kommunikationsbeziehungen und -schnittstellen zu identifizieren. Auch wenn der Wandel in der industriellen Praxis noch nicht vollständig vollzogen ist, wird im nächsten Schritt die sukzessive Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide und ihre Folgen für Kommunikationsbeziehungen betrachtet. Nachfolgend lassen sich diese Kommunikationsbeziehungen hinsichtlich ihrer Anforderungen und Schnittstellen in drei industriellen Ebenen der Kommunikation aufteilen. Das Kapitel endet mit der Informationsbeschreibung der Teilnehmer einer APA im Rahmen von RAMI 4.0 und der Verwaltungsschale.

2.1.1 Lebenszyklus einer automatisierten Produktionsanlage

Der Lebenszyklus einer APA bezeichnet den fortlaufenden Prozess von der Planungsphase bis hin zum Service bzw. Rückbau. Hierzu existieren verschiedene Definitionen, die sich in der Bezeichnung der Lebenszyklusphasen sowie deren Abgrenzung unterscheiden. Zudem unterscheiden diese Modelle zur Abbildung von Lebenszyklen auch eine unterschiedliche Anzahl an Phasen. Die Anzahl und die Abgrenzung zu benachbarten Phasen ist abhängig von der jeweiligen Definition des Erstellers der Modelle. [6]

Es zeigt sich, dass in der Literatur ein Lebenszyklus zwischen drei [7] und elf [8] verschiedene Phasen enthält. Bei einer Abgrenzung in sechs Lebenszyklusphasen wird zwischen Planung, Entwicklung, Inbetriebnahme, Betrieb, Optimierung und Service unterschieden [9]. Dabei lassen sich aus verschiedenen Lebenszyklusmodellen [10–12] fünf klar abgrenzende aufeinander aufbauende Phasen eines vereinfachten Lebenszyklus-Modells für diese Arbeit identifizieren die in Bild 3 zu erkennen sind:

1. Planung und Design - Diese Phase umfasst Arbeitsabläufe rund um das Thema Layout des Hallenabschnitts, Positionierung der Anlage, Standortauswahl und Grobplanung der Produktionsabläufe einer APA.

2. Entwicklung - Hier liegt der Fokus auf der mechanischen und elektrischen Konstruktion sowie der Programmierung von Anlagen. Zusätzlich werden Bestellungen der benötigten Teile in Auftrag gegeben.
3. Inbetriebnahme - Es erfolgt der Aufbau gemäß Konstruktionen, Fertigstellung der Programmierung sowie anschließender Parametrierung und Anpassung anhand der realen bzw. abweichenden Gegebenheiten.
4. Betrieb - Die fertig aufgebaute und programmierte APA befindet sich im produktiven Betrieb und produziert gemäß Spezifikation aus Planungs- und Designphase.
5. Service bzw. Rückbau - Innerhalb dieser Phase werden entweder Optimierungsmaßnahmen bzw. Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt oder der finale Rückbau der APA vollzogen.

Hierbei ist hervorzuheben, dass zuvor genannte Aufzählungen nur einen Teilausschnitt der Abläufe innerhalb der einzelnen Phasen widerspiegeln. Zudem ergeben sich weitere wichtige Erkenntnisse bei der Betrachtung der Lebenszyklen einer APA. So zeigt sich, dass die entstehenden Kosten eines Fehlers (sog. Fehlerkosten) umso höher sind, je später sie im Lebenszyklus auftreten. Damit diese Fehlerkosten niedrig gehalten werden, ist der Anteil der verwendeten Simulationen besonders in den ersten Phasen höher. [13]

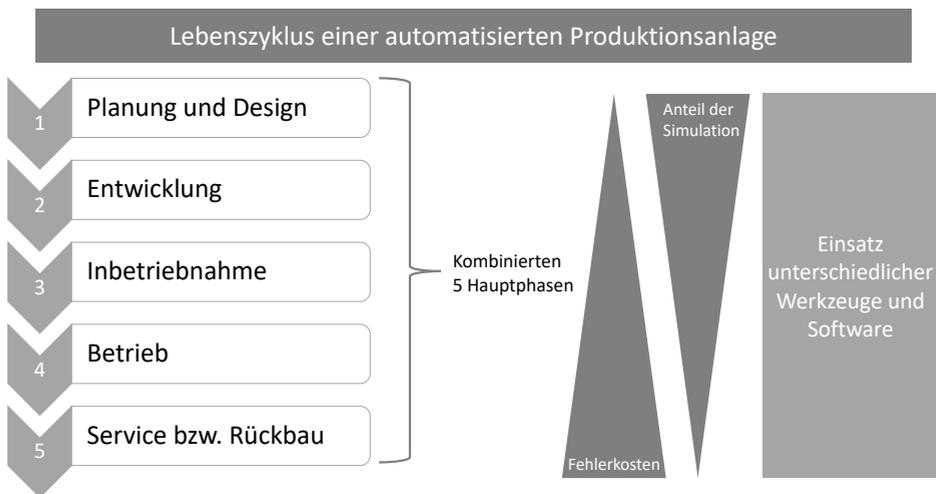


Bild 3: Kombinierte fünf Hauptphasen des Lebenszyklus einer APA

Die vorgestellten fünf Hauptphasen des Lebenszyklus einer APA repräsentieren eine geeignete Zusammenfassung der einschlägigen Literatur [6]. Gleichzeitig wird durch die klare Abgrenzung der verschiedenen Phasen ein gemeinsames Verständnis der Definitionen erlangt.

2.1.2 Die Automatisierungspyramide und ihr Einfluss auf die Struktur innerhalb der Produktion

Sowohl Prozesse als auch die Kommunikationsbeziehungen werden heutzutage maßgeblich von der Hierarchie innerhalb einer Produktion bestimmt [14]. Die Automatisierungspyramide beschreibt vorhandene Beziehungen zwischen den verschiedenen Ebenen. Dabei ist die Anzahl der Ebenen in der Automatisierungspyramide innerhalb der Literatur jedoch unterschiedlich [15]. So weisen kompakte Modelle drei unterschiedliche Ebenen auf, wohingegen auf RAMI 4.0 basierende Modelle bis zu sieben verschiedene Ebenen aufzeigen [15]. Entlang dieser strikt getrennten Ebenen werden diverse Systeme während der Produktion eingesetzt. Von Ein- und Ausgangssignalen, dessen Informationen von einer SPS eingesammelt werden, bis hin zu Supervisory Control and Data Acquisition- (SCADA), Manufacturing Execution- (MES) und Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP) zur Steuerung der Unternehmens-, Betriebs- und Prozesslogik sind diese maßgeblich für die Namensgebung der jeweiligen Ebene verantwortlich [16]. Die klassische Automatisierungspyramide besitzt nach SIEPMANN sechs verschiedene Level der industriellen Fertigung. Diese sind in Bild 4 zu sehen werden wie folgt definiert [17]:

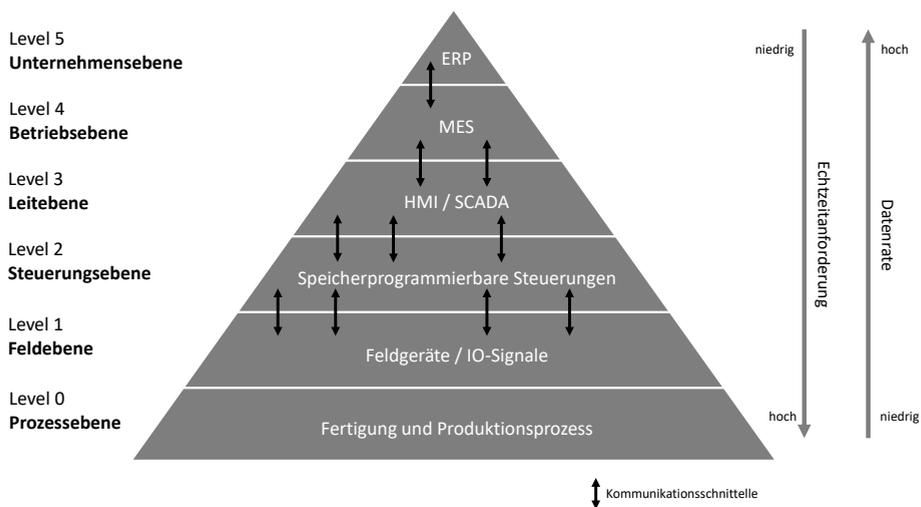


Bild 4: Klassische Automatisierungspyramide mit sechs Ebenen nach SIEPMANN i.A.a. [17]

Level 0: Prozessebene

Der Produktionsprozess und die Fertigung sind in dieser Ebene verortet und bilden die erste und somit unterste Ebene der klassischen Automatisierungspyramide. Informationen bezüglich Produkteigenschaften und Produktions-

schritten werden von intelligenten Produkten, wie zum Beispiel RFID-Chips bereitgestellt.

Level 1: Feldebene / Shopfloor

Die Feldebene repräsentiert den Ort der Wertschöpfung beziehungsweise den Produktionsbereich. Hier sind sowohl Sensoren, wie zum Beispiel Lagesensoren, induktive Sensoren und Lichtschranken, als auch Aktoren, beispielsweise Motoren und Schütze vorzufinden. Diese Sensor- und Aktordaten sind die Basis für spätere Regelungs- und Steuerungsaufgaben.

Level 2: Steuerungsebene

Innerhalb der Steuerungsebene sind häufig SPS vorzufinden, welche die Sensorinformationen aus der Feldebene einsammeln und verarbeiten. Basierend auf programmierter Logik werden wiederum Aktoren im Shopfloor angesprochen. Diese Ebene ist entscheidend für die Maschinen- und Anlagensteuerung.

Level 3: (Prozess-) Leitebene

Die Hauptaufgabe der Leitebene ist die Visualisierung von Produktionsvorgängen und Warnmeldungen der SPS mit Hilfe von SCADA-, HMI- und Prozessleitsystemen. Sie dient somit als Bedien- und Beobachtungssystem in Form einer Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Level 4: Betriebsebene

Die Betriebsebene dient der Steuerung und Kontrolle der Produktionsabläufe. Ein MES dient als Bindeglied zwischen der Leit- und Unternehmensebene. Auf Basis von produktionsrelevanten Daten findet eine Feinsteuerung, Erfassung und Auswertung des Produktionsablaufs statt mit einer starken Schnittstelle zu ERP-Systemen.

Level 5: Unternehmensebene / Topfloor

Der Hauptbestandteil der Unternehmensebene ist das ERP-System, welches für die Bestellabwicklung und Produktionsgrobplanung verantwortlich ist. Zudem werden unterlagerte MES-Systeme mit notwendigen historischen Daten aus vorherigen Produktionsläufen zur optimalen Produktionsfeinplanung versorgt.

Bild 4 zeigt die Integration der einzelnen Ebenen in vertikaler Richtung. Entscheidend hierbei ist, dass die Datenerfassung aufsteigend von der untersten und die Planung absteigend von der obersten Ebene erfolgt [17]. Des Weiteren nimmt auch die Anzahl der Kommunikationsschnittstellen und Geräte zwischen den Ebenen ab, je höher sich die Ebene innerhalb der Pyramide befindet. Zudem sind die Anforderungen an das Echtzeitverhalten der Teilnehmer höher, je tiefer sie sich in der Pyramide befinden. Umgekehrt verhält es sich mit der Datenrate der Übertragung, denn diese steigt bei den

Teilnehmern, welche sich an der Spitze der Pyramide befinden. Die Pyramidenform lässt einen Rückschluss auf die zunehmende Verteilung und Anzahl der eingesetzten Systeme innerhalb der Ebene schließen [16].

2.1.3 Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide und Auswirkungen auf Kommunikationsbeziehungen

Mit der Einführung von Industrie 4.0 beginnt die Veränderung der Produktion und ihren Kommunikationsbeziehungen. Die strikten Grenzen der bisher bekannten klassischen Automatisierungspyramide von der Feldebene bis in die Unternehmensebene werden immer weiter aufgelöst. Sie durchlebt einen Wandel hin zu cyber-physischen Produktionssystemen, die mittels Anpassungsfähigkeit, Effizienz und Flexibilität den Anforderungen von Industrie 4.0 gerecht werden. Das Fertigen in Losgröße eins und daraus resultierenden schnellen Reaktionen auf ändernde Marktanforderungen gilt als Treiber für die Umsetzung von Flexibilität innerhalb der Produktion. Die Zunahme der Heterogenität an Kommunikationstechnologien und das steigende Kommunikationsaufkommen innerhalb der Produktion führt zu immer komplexer werdenden Kommunikationsnetzwerken. Offene und ebenenübergreifende Kommunikationsstandards sollen die Verknüpfung autarker Systeme vereinfachen und Komplexität reduzieren. Wie in Bild 5 zu sehen ist, ermöglicht dieser Wandel die direkte Verknüpfung sämtlicher kommunikationsfähiger Teilnehmer ohne zusätzliche Schnittstellen der Ebenen einer klassischen Automatisierungspyramide.

Diese Transformation wird Cyber-physical System (CPS) genannt. Trotz der Auflösung der festen Grenzen bei der klassischen Automatisierungspyramide, verändern sich die Anforderungen jedes Teilnehmers an das Kommunikationsnetzwerk nicht. Viele Standardisierungsvorhaben im Bereich der Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und -technologien, wie in späteren Kapiteln beschrieben, unterstützen dabei, diesen Wandel zu vollziehen. Dennoch bleiben bekannte Anforderungen hinsichtlich industrieller Dienstgüteparameter bestehen. Bei der Anzahl von Kommunikationsbeziehungen innerhalb der Produktion lässt sich feststellen, dass diese immer weiter zunehmen werden. Wo bisher die Kommunikationsteilnehmer mit einer geringen Anzahl an Endpunkten interagiert haben ist die zukünftige Entwicklung, dass die Kommunikationsteilnehmer auch vermehrt untereinander und über bekannte Ebenen der Automatisierungspyramide hinweg kommunizieren. Zudem zeigt der Trend auf, dass zukünftig immer mehr Teilnehmer innerhalb der Produktion kommunikationsfähig werden, um ihre produzierten und vorhandenen Daten zukünftig zur Verfügung zu stellen. Dies hat Auswirkungen

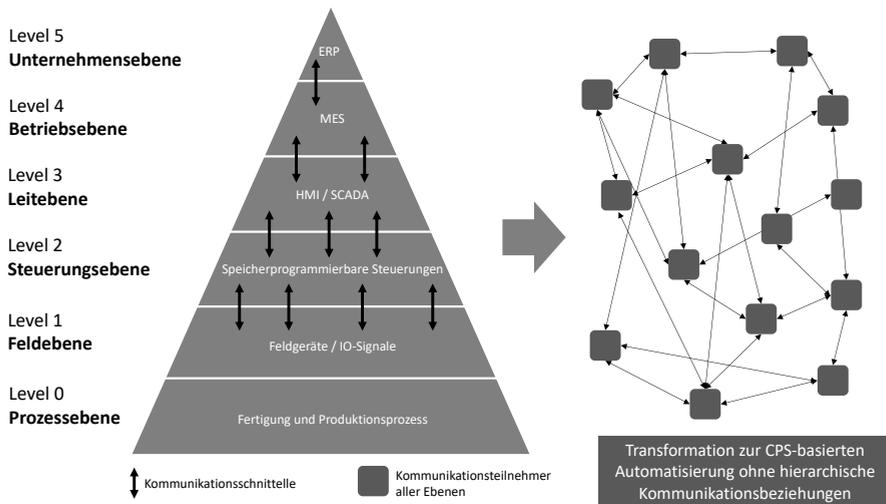


Bild 5: Transformation der Automatisierungspyramide zur CPS-basierten Automatisierung i.A.a. [4]

gen auf das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerke, da die Auslastung von Netzwerkkomponenten zwangsläufig zunimmt. [3]

2.1.4 Kommunikationsschnittstellen innerhalb der Produktion

Genauso wie sich die Kommunikationsbeziehungen verändern, müssen sich auch zukünftige Schnittstellen zwischen den einzelnen Produktionsebenen anpassen. Innerhalb einer Produktion müssen deshalb verschiedenste Schnittstellen, Protokolle und Kommunikationstechnologien koexistieren, um Daten zwischen den einzelnen Teilnehmern auszutauschen. Die Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide erfordert dabei eine genaue Betrachtung der einzelnen Schnittstellen, um die Kommunikationsanforderungen zwischen verschiedene Netzwerke zu gewährleisten. Die Teilnehmer innerhalb eines industriellen Kommunikationsnetzwerks lassen sich in folgende drei Ebenen [2] differenzieren:

- Applikation
- Kommunikationsdienste und Middleware
- Transportprotokolle

Wie in Bild 6 zu erkennen ist findet zwischen den einzelnen Ebenen Informationsaustausch statt. Dieses generische Modell spezifiziert vor allem die zu erwartenden Anforderungen der Teilnehmer an das Netzwerk. In der obersten Ebene, der Applikationsebene, sind Geschäftslogiken und produktions-

übergreifende Funktionen verortet. Die mittlere Ebene enthält Middleware- und Kommunikationsdienste und die unterste Ebene garantiert Dienstgüteparameter mit Hilfe von transportorientierten Protokollen. Zwischen den einzelnen Ebenen wird mittels geeigneter Services und APIs die nötigen Schnittstellen bereitgestellt, um Informationen zu übertragen. Dabei lassen sich folgende Kommunikationsbeziehungen identifizieren:

- Maschine-zu-Komponente (bspw. Sensor oder Aktor)
- Maschine-zu-Cloud (bzw. Edge)

Als Maschine wird die Verknüpfung von Steuerungsebene und Teilen der Leitebene (HMI) verstanden. Je nach Ebene werden zudem unterschiedliche Kommunikationsprotokolle und Kommunikationstechnologien verwendet, um die Anforderungen an die Kommunikation zu erfüllen. Innerhalb einer Ebene sind ebenfalls diverse Schnittstelle vorhanden, um Informationen zwischen Teilnehmern auszutauschen. Diese werden genauso mit Services oder APIs angeboten. Dazu gehören die typischen Vertreter Maschine-zu-Maschine-Kommunikation in der mittleren Ebene oder die Funktion-zu-Funktion-Kommunikation in der obersten Ebene. [2]

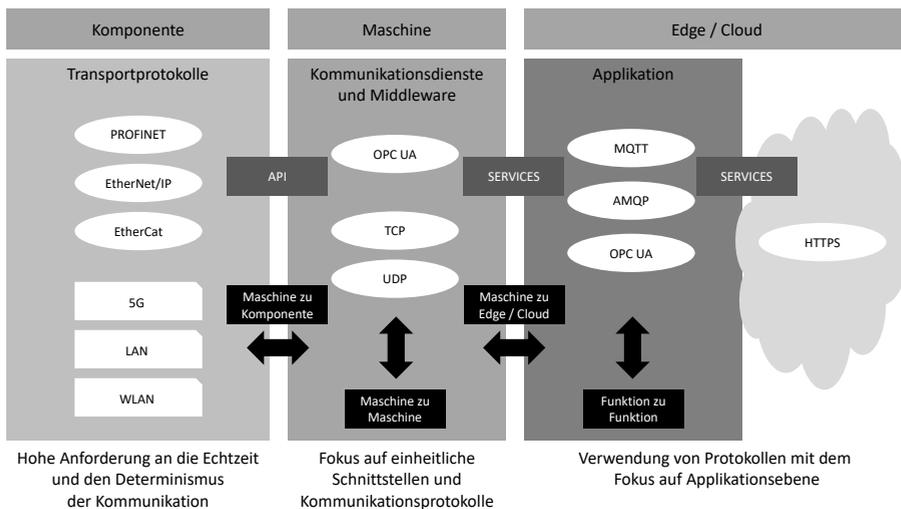


Bild 6: Die drei Ebenen der industriellen Kommunikation mit ihren jeweiligen Technologien und Protokollen i.A.a. [2]

Obwohl sich die Automatisierungspyramide in zukünftigen Produktionen immer weiter auflöst (2.1.3), bleiben die Kommunikationsanforderungen der jeweiligen Teilnehmer in einer Produktion weiterhin bestehen. So zeigt

sich, dass die unterste Eben der industriellen Kommunikation die Anforderungen von typischen Feldgeräten und Steuerungsgeräten erfüllen muss. Diese haben typischerweise Anforderungen an eine niedrige Latenz, weshalb transportorientierte Protokolle eingesetzt werden. In der mittleren Ebene existieren vermehrt die Kommunikationsbeziehungen zwischen Maschinen. Diese erwarten eine standardisierte Schnittstelle und generische Informationsmodelle zur Abbildung ihrer Funktionen. Anforderungen an Latenz und Echtzeit sind dabei niedriger als in der untersten Ebene. Wohingegen in der obersten Eben der industriellen Kommunikation vermehrt hohe Datenraten aufgrund der Menge an versendeten Daten erzielt werden. Typischerweise sind hier Verbindungen zu Cloud und Edge zu nennen, welche dezentrale Auswertungen der Produktion mithilfe von großen Datenmengen durchführen. Die klare Definition von Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen ist dabei essentiell, um eine durchgehende Vernetzung in der Produktion zu ermöglichen und zu realisieren.

2.1.5 Verwaltungsschale zur Informationsbeschreibung

Damit im Zuge von Industrie 4.0 eine einheitliche Vernetzung verschiedener Teilnehmer in der Produktion erfolgen kann, wird eine generische Beschreibung der Teilnehmer benötigt. Das sogenannte RAMI 4.0 (Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0) dient als abstraktes Modell, welches anhand drei verschiedener Dimensionen sowohl Denkweisen als auch Begriffe definieren soll. Dabei spannt das RAMI 4.0 einen Würfel aus folgenden Dimensionen auf:

- Lebenszyklus der Komponente, Maschine oder Anlage (Entwicklung bis Betrieb)
- Funktionalitäten durch Hierarchiestufen (Produkt bis vernetzte Welt)
- IT-relevante Schichten (Gerät bis Unternehmensnetzwerk)

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass RAMI 4.0 lediglich die verwendeten Begrifflichkeiten und Definitionen festlegt und nicht eine implementierfertige Architektur darstellt. [18]

In diesem Zusammenhang fällt ebenso der Begriff der Verwaltungsschale (VWS). Sie soll bereits während der Planungsphase existieren und gilt als technische Umsetzung des digitalen Zwillings einer Komponente. Dadurch liegen eine Vielzahl an Informationen der Komponenten frühzeitig bereit, die im weiteren Verlauf des Lebenszyklus effektiv verwendet werden können. Die Definition der Inhalte innerhalb der VWS werden durch die Arbeitsgruppe Plattform Industrie 4.0 standardisiert. Zudem können Inhalte spezifisch für die jeweilige Komponente bzw. Maschine oder Anlage sein. [18]

Die VWS repräsentiert dabei das digitale Abbild sowohl von physischen als auch virtuellen Komponenten. In diesem Kontext werden sie auch als Assets bezeichnet. Zur korrekten Beschreibung der Assets besteht die VWS aus einer eindeutigen Identifikation mittels Identifier und einem oder mehreren Teilmodellen. Die Teilmodelle beinhalten dabei sowohl funktionale als auch beschreibende Aspekte wie zum Beispiel Prozesseigenschaften, Safety zur Abbildung von funktionaler Sicherheit, Security zur Beschreibung der IT-Sicherheit und Energiemanagement als Indikator für den Energieverbrauch des Assets. Damit Teilmodelle eines bestimmten Assets immer die gleiche Beschreibung beinhalten, sollen diese standardisiert werden. Es können sowohl assetspezifische, als auch assetunabhängige Teilmodelle in diesem Kontext existieren. Tabelle 1 zeigt ein assetspezifisches Teilmodell, welches die Information einer Antriebsachse zur Laufzeit beschreibt. Dieses Teilmodell kann anschließend zur Laufzeit anhand der aktuellen Realwerte ergänzt werden. [19]

Tabelle 1: Assetspezifisches Teilmodell einer sich in Betrieb befindenden Antriebsachse. [19]

Merkmal	ID	Einheit	Beschreibung
Bewegungsprofil	MotionProfile	num[1..5]	Gibt die Art der Achsbewegung an, mit welcher die Achse konfiguriert ist
Zusätzliche Last	AdditionalLoad	kg	Gewicht des zusätzlichen Gewichts, welches die Achse mit sich führt
Aktuelle Position	AcutalPosition	coord[x y z]	Aktuelle Position der Achse in X-Y-Z-Koordinaten
Aktuelle Geschwindigkeit	AcutalSpeed	m/s	Aktuelle Geschwindigkeit der Achse in m/s unter Einhaltung der Maximalgeschwindigkeit

Zusammenfassend ist die Verwaltungsschale des RAMI 4.0 eine geeignete Möglichkeit, Informationen von Assets bereits in einer frühen Phase der Planung bereitzustellen. Aufgrund der Nutzung der VWS im weiteren Verlauf des Lebenszyklus, wird diese zudem aktuell gehalten und mit realen Informationen aktualisiert. Die Möglichkeit assetspezifische Teilmodelle zu implementieren ermöglicht es, Informationen auch für spezifische Anwendungen, wie zum Beispiel innerhalb einer Simulation, zu verwenden.

2.2 Kommunikationsanforderungen

Basierend auf den zuvor vorgestellten APA und den jeweiligen Kommunikationsbeziehungen, ergeben sich Anforderungen an das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk. Mit Kommunikationsanforderungen können sowohl Mindestkriterien an das Kommunikationsnetzwerk festlegt als auch das Verhalten eines oder mehrerer Teilnehmer beschrieben werden. Die Beschreibung dieser Anforderungen wird mithilfe von Dienstgüteparametern durchgeführt. Speziell im industriellen Umfeld existieren besondere Anforderungen bzgl. der Echtzeit und der deterministischen Kommunikation, weshalb diese gesondert vorgestellt werden. Abschließend wird eine Möglichkeit der Klassifizierung von Kommunikationsanforderungen beschrieben.

2.2.1 Dienstgüteparameter - Quality of Service

Dienstgüteparameter bzw. Quality of Service (QoS) Anforderungen werden bei der Übertragung von Informationen über ein Kommunikationsnetzwerk benötigt. Sie beschreiben dabei die notwendigen Ressourcen innerhalb des Kommunikationsnetzwerkes. Dies ermöglicht die Unterscheidung und Priorisierung verschiedener Anwendungen oder Dienste innerhalb des gleichen Kommunikationsnetzwerks.[20]

Trotz der Notwendigkeit und häufigen Verwendung von Dienstgüteparametern, existiert kein genereller Konsens und somit einheitliche Definition der Anzahl sowie Beschreibung dieser Parameter [21]. Ihren Ursprung haben Sie mit der Einführung des Internets, bei dem verschiedene Dienste mit unterschiedlicher Priorität über das gleiche Kommunikationsnetzwerk übertragen werden. Da die Paket- und somit Informationsübertragung über das Internet stochastischer Natur ist, unterstützen Dienstgüteparameter bei der zielgerichteten und priorisierten Übertragung. Dies ermöglicht den Transfer von Daten unter garantierter Dienstgüte, obwohl das zugrundeliegende Netzwerk Pakete nach dem Zufallsprinzip verarbeitet. [22]

Dienstgüteparameter werden somit häufig verwendet, um die Übertragung zwischen zwei Applikationen zu beschreiben und ihr Verhalten innerhalb des Kommunikationsnetzwerks zu regeln [23]. Diese Ende-zu-Ende-Beziehung erwartet immer die gleichen Dienstgüteparameter während der Übertragung von Daten. So kann gewährleistet werden, dass während der gesamten Übertragungszeit die Applikationen den bereitgestellten QoS vom zugrundeliegenden Kommunikationsnetzwerk erhalten. Wie in Bild 7 zu sehen ist, gilt diese Garantie über den gesamten Übertragungsweg des Kommunikationsnetzwerks. Sowohl Sender und Empfänger als auch das Kommunikationsnetzwerk sind mit der Informationsbereitstellung und -verarbeitung bei

der Einhaltung der QoS entscheidend. Verzögerungen in einem Glied haben Auswirkungen auf die gesamte Kette.

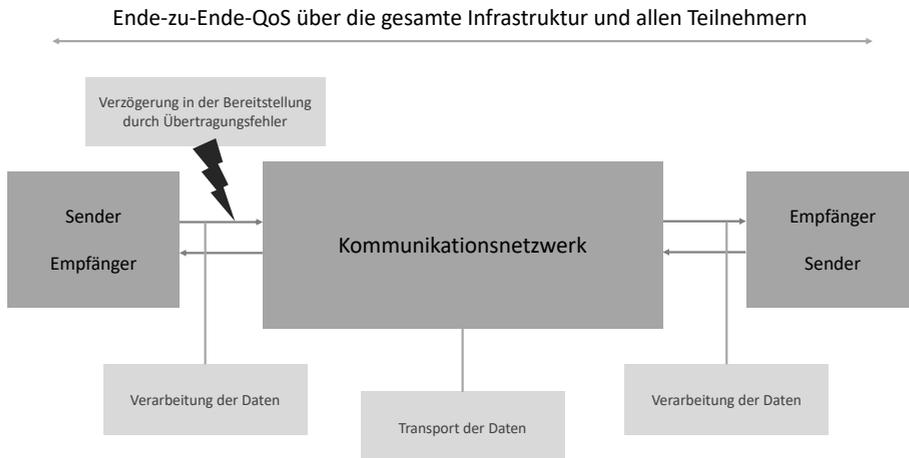


Bild 7: QoS betrifft immer die gesamte Infrastruktur mit allen ihren Teilnehmern im Netzwerk i.A.a. [23]

Da kein einheitlicher Konsens bei der Beschreibung der QoS vorliegt [21], erfolgt zum Verständnis eine Unterscheidung und Definition der jeweiligen Parameter für industrielle Kommunikationsnetzwerke. Neben den nachfolgend genannten existieren noch weitere domänenspezifische QoS-Parameter zum Beispiel in der Vermittlungs- und Übertragungstechnik von Telekommunikationsnetzen. So kann es vorkommen, dass in weiteren Literaturquellen modifizierte Definitionen vorhanden sind.

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit gibt Aufschluss über den Status des Kommunikationsnetzwerks. Solange das Kommunikationsnetzwerk verfügbar ist, können Kommunikationsteilnehmer ihre Daten über das Netzwerk senden. [24]

Zuverlässigkeit

Bei der Zuverlässigkeit eines Kommunikationsnetzwerks wird die Zeitdauer bestimmt, wie lange Informationen ohne Ausfälle übertragen werden können [24]. Die Einheit wird hierbei, analog zum MTBF (Mean time between failure) als Durchschnittswert angegeben und ist ein entscheidender Parameter bei der Verwendung des Kommunikationsnetzwerks [25].

Datenrate

Die Datenrate beschreibt die Anzahl der übertragenen Datenmengen pro Zeiteinheit. Er kann sowohl auf den Teilnehmer bezogen werden als auch auf das gesamte Netzwerk [21]. Die Einheit wird dabei in übertragenen Bits bzw. Bytes pro Sekunde angegeben. Mit Hilfe der notwendigen Datenrate einer Applikation lässt sich der minimale Wert festlegen, der vom Kommunikationsnetzwerk bereitgestellt werden muss, damit die Applikation korrekt ausgeführt wird [25].

Nachrichtengröße

Die Nachrichtengröße definiert die gesamte Menge an übertragenen Daten. Sie gibt Aufschluss über die nötige Datenmenge, die eine Applikation zur Kommunikation benötigt. Es kann jedoch vorkommen, dass die Minimalgröße der Nachricht (z.B. 64 Bytes) aufgrund der verwendeten Übertragungstechnologie bzw. des -protokolls vordefiniert ist. [25]

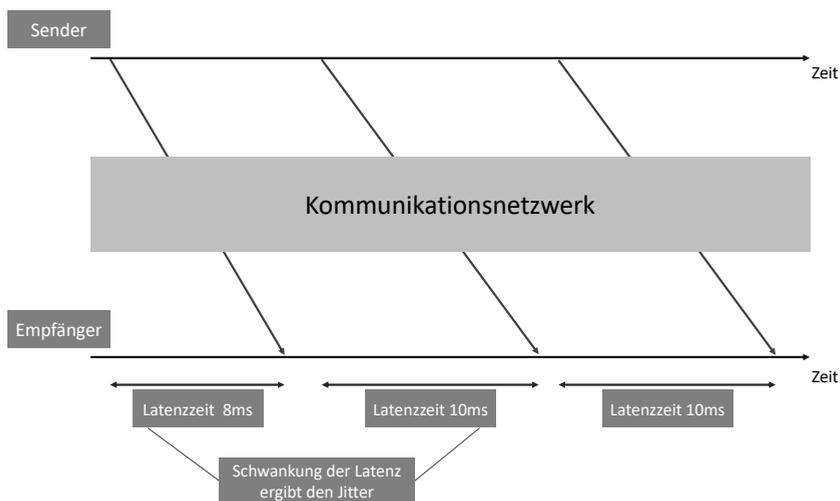


Bild 8: Die Latenz ist die benötigte Zeitdauer eines Datenpakets vom Sender bis zum Empfänger. Der Jitter beschreibt die Schwankung dieser Zeit i.A.a. [25]

Latenz

Die Latenz beschreibt allgemein den Zeitraum zwischen dem Ereignis und dem Eintreten einer sichtbaren Reaktion. In der Kommunikationstechnik wird sie als Zeit definiert wie lange ein Datenpaket vom Sender (Quelle) bis zum Empfänger (Senke) benötigt und wird auch als Ende-zu-Ende-Latenz

bezeichnet [24]. In Bild 8 ist die Latenz von Sender zu Empfänger über das Kommunikationsnetzwerk abgebildet.

Jitter

Der Jitter beschreibt allgemein die Schwankung der Laufzeit von konsekutiven Signalen. Dabei drückt der Latenz-Jitter die zeitliche Schwankung der Zeitdauer bei der Übertragung von Datenpaketen von Sender bis zum Empfänger einer Applikation aus [23]. In Bild 8 ist der Latenz-Jitter bei der Laufzeit zwischen erstem und zweitem Datenpaket aufgezeigt.

Burst

Der Burst einer Applikation definiert das aperiodische Auftreten eines Nachrichtenschwells im Kommunikationsnetzwerk [24]. Es kann starke Schwankungen in der Gesamtdatenrate des Kommunikationsnetzwerks aufgrund seines unregelmäßigen Auftretts erzeugen [23]. Eine korrekte und rechtzeitige Allokation der notwendigen Ressourcen im Kommunikationsnetzwerk ist deshalb besonders anspruchsvoll [23].

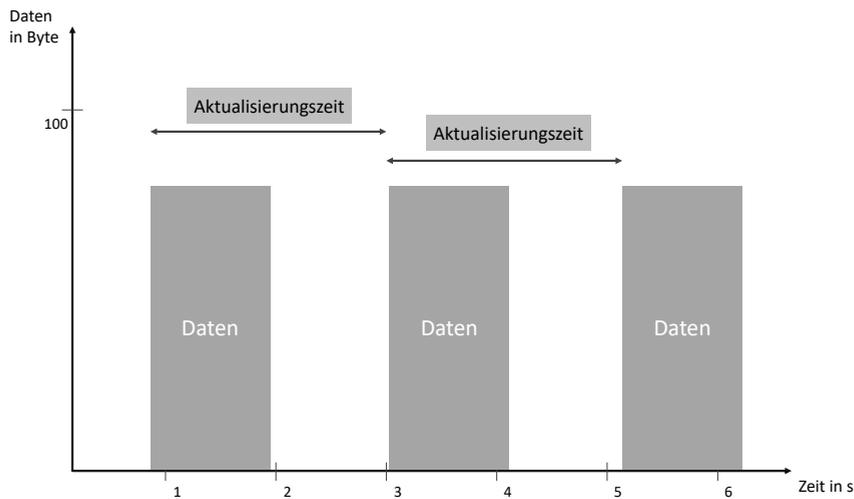


Bild 9: Die Aktualisierungszeit ist der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichten i.A.a. [25]

Aktualisierungszeit

Die Aktualisierungszeit wird als Zeitspanne zwischen dem jeweiligen Empfang von aufeinanderfolgenden, für die Applikation relevanten und erwarteten Nachrichten definiert [25]. Sie gibt Aufschluss über die zeitlichen Abstand

der Informationsaktualisierung einer Applikation [24]. Diese muss vom Kommunikationsnetzwerk bei der Planung der Reihenfolge von Paketübermittlungen berücksichtigt werden, damit eine Applikation zu jedem Zeitpunkt die ihr notwendigen und aktuellen Daten erhält. In Bild 9 ist zu erkennen, dass die Aktualisierungszeit jeweils vom Start der konsekutiven Nachrichten gemessen wird.

Überlebenszeit

Die Überlebenszeit gibt die Zeitspanne an, wie lange die Applikation ohne eine Aktualisierung der Informationen bzw. Erfüllung der notwendigen Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk auskommt [24]. Er ist somit direkt abhängig von der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Kommunikationsnetzwerks.

2.2.2 Echtzeit

Die zuvor spezifizierten Dienstgüteparameter sind essentiell für die Beschreibung der Qualität eines Übertragungsdienstes. Doch nicht alle Anwendungen haben identische Ansprüche bezüglich der Einhaltung zuvor vereinbarter Dienstgüteparameter zwischen der Anwendung und des Kommunikationsnetzwerks [21]. Aus diesem Grund existieren drei verschiedene Methoden, damit die Wichtigkeit für die Einhaltung der Garantien klassifiziert werden kann - die harte, feste und weiche Echtzeit [26].

Dienstgüteparameter müssen im Gesamtkontext des Kommunikationsnetzwerks betrachtet werden. Ohne eine zeitliche Vorhersagbarkeit des gesamten Informationsflusses ist die Betrachtung einzelner Parameter nicht zielführend [26]. Die Festlegung des jeweils gewünschten bzw. erwarteten Echtzeitverhaltens ist deshalb umso wichtiger, da die Anzahl solcher Systeme immer häufiger auftreten [27]. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der zu erfüllenden Aufgabe und die Bewertung ihres Echtzeitverhaltens entscheidend. Ihre Einhaltung beansprucht je nach Methode unterschiedlich viele Ressourcen, welche nur begrenzt zur Verfügung stehen [28]. Gleichzeitig ist auch eine generelle Zunahme an kommunikationsfähigen Systemen zu beobachten [29], weshalb die Einhaltung der Echtzeitanforderungen aufgrund vieler Teilnehmer innerhalb eines Netzwerks immer komplexer wird [30].

Nachfolgend werden die drei unterschiedlichen Methoden zur Klassifizierung des Echtzeitverhaltens vorgestellt und anhand eines selbst gewählten Beispiels erläutert. Diese sollen symbolisch die Konzepte des Echtzeitverhaltens anhand eines realen Beispiels aufzeigen.

Weiche Echtzeit

Bei der weichen Echtzeit ist die Einhaltung der Zeitbedingung als Leitlinie zu verstehen. Wie in Bild 10 auf der linken Seite zu erkennen ist, kann es durchaus vorkommen, dass eine Information nicht in der erwarteten Zeit ankommt und somit die festgelegte Deadline nicht einhalten kann. Aus diesem Grund ist bei der weichen Echtzeit eine gewisse Toleranz der Zeitbedingung von der Zustellung der Informationen vorhanden. Die Verspätung der Informationen innerhalb dieses tolerierbaren Zeitfensters führt somit nicht zu einem Ausfall des Systems. Gleichzeitig sollte die durchschnittliche Zeit der Informationszustellung unterhalb der festgelegten Deadline und im besten Fall sogar deutlich schneller sein. [21, 26]

Weiche Echtzeitverhalten sind typischerweise bei der Bedienung von HMIs beobachten. Die Eingabe des Bedieners soll in diesem Fall zügig verarbeitet und die resultierenden Ergebnisse angezeigt werden. Eine verspätete Reaktion (Überschreitung der durchschnittlichen Reaktionszeit) der Eingabe wird vom Nutzer häufig toleriert, da keine gefährlichen Konsequenzen zu erwarten sind.

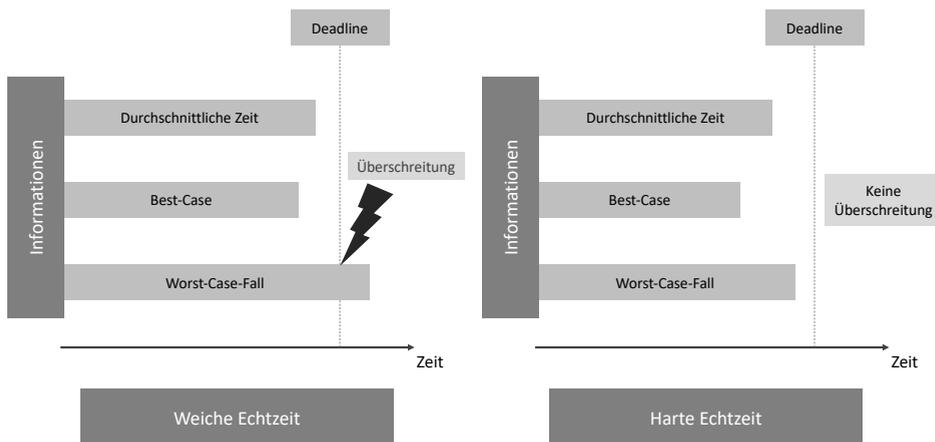


Bild 10: Unterscheidung zwischen weicher Echtzeit (links) und harter Echtzeit (rechts) bei der Einhaltung der vorgegebenen Deadline i.A.a. [26]

Harte Echtzeit

Die harte Echtzeit erwartet die strikte Einhaltung der vorgegebenen Zeitbedingung, da bei einer Überschreitung gefährliche Zustände eintreten können. In

Bild 10 ist die Einhaltung dieser zeitkritischen Informationsübertragung verdeutlicht. Anders als bei der weichen Echtzeit, muss sogar im Worst-Case Fall die Deadline zeitlich unterschritten werden. Deshalb ist das Gesamtsystem so auszulegen, dass eine Überschreitung der Deadline zu jedem Zeitpunkt verhindert wird. Aus diesem Grund benötigt die Einhaltung der harten Echtzeit gegenüber der weichen Echtzeit mehr Ressourcen. [21, 26]

Harte Echtzeitanforderungen werden zum Beispiel bei der Synchronisierung von Achsen einer Maschine im Druckprozess gestellt. Die Synchronisierung muss zwingend innerhalb der vorgegebenen Zeitbedingung geschehen, da eine zeitliche Differenz zu unterschiedlichem Vorschub des Papiers führt und dadurch die zu erzielende Druckqualität nicht eingehalten wird. Das Ergebnis des Prozesses ist schlussendlich nicht akzeptabel.

Feste Echtzeit

Unter der festen Echtzeit wird eine Kombination aus weicher und harter Echtzeit verstanden. So ist die Einhaltung einer definierten Zeitgrenze für die Informationsverarbeitung zwar entscheidend, jedoch führt eine Überschreitung der Zeitbedingung nicht zu einem gefährlichen Zustand. Informationen, die nach der Deadline auftreten sind anschließend wertlos und können verworfen werden. [26]

Als feste Echtzeit kann der Kommunikationsaufbau einer Maschinenzelle zur übergeordneten Cloudinfrastruktur beschrieben werden. Dabei sollen die aktuellen und auswertungsrelevanten Produktionszahlen übermittelt werden. Je nach aktuellem Kommunikationsaufkommen bzw. Mobilfunkempfang kann es vorkommen, dass nach einer gewissen Zeitanforderungen die Anfrage abgebrochen wird und anschließend neu gestartet werden muss. Die Daten können somit verworfen werden, da zum späteren Zeitpunkt aktuellere Daten vorliegen.

2.2.3 Deterministischer und nichtdeterministischer Kommunikationsverkehr

Bereits der Philosoph Laplace prägte 1814 den Begriff Determinismus in seinem Buch *A philosophical essay on probabilities*. So schrieb er, dass eine Intelligenz mit Kenntnis sämtlicher Informationen innerhalb eines deterministischen Universums, alles bisherige und zukünftige vorhersagen kann [31]. Determinismus definiert in der Philosophie den Zustand der Vorhersagbarkeit von Ereignissen auf Basis vollkommener Informationen [32]. In der Kommunikationstechnik wird Determinismus in einem ähnlichen Zusammenhang

verwendet. Dabei wird zwischen deterministischer und nichtdeterministischer Kommunikation unterschieden.

Deterministische Kommunikation

Deterministische Kommunikation ist die Übertragung der Informationen in einem definierten Zeitraum. Dabei kann die Übertragungsdauer in einem deterministischen Kommunikationsnetzwerk genau vorausgesagt werden [33]. Für die Verwendung von Echtzeitsystemen garantiert ein deterministisches Kommunikationsnetzwerk die rechtzeitige Ankunft der Informationen [34]. Des Weiteren wird bei deterministischer Kommunikation zwischen periodischem und aperiodischem Auftreten unterschieden. Bei deterministisch periodischer Kommunikation ist, wie in Bild 11 zu sehen, sowohl die Nachrichtengröße als auch die Aktualisierungszeit bekannt. Somit ist die auftretende Netzwerklast sehr exakt anhand dieser beiden Parameter bestimmbar. Die notwendigen Ressourcen des Kommunikationsnetzes können deshalb rechtzeitig bereitgestellt werden. Bild 11 zeigt zudem die Eigenschaften der deterministisch aperiodischen Kommunikation. Sie lässt sich ebenso mithilfe der Nachrichtengröße und der Aktualisierungszeit beschreiben, wobei die Aktualisierungszeit als durchschnittlicher Wert betrachtet wird, da das Auftreten aperiodisch ist. [25]

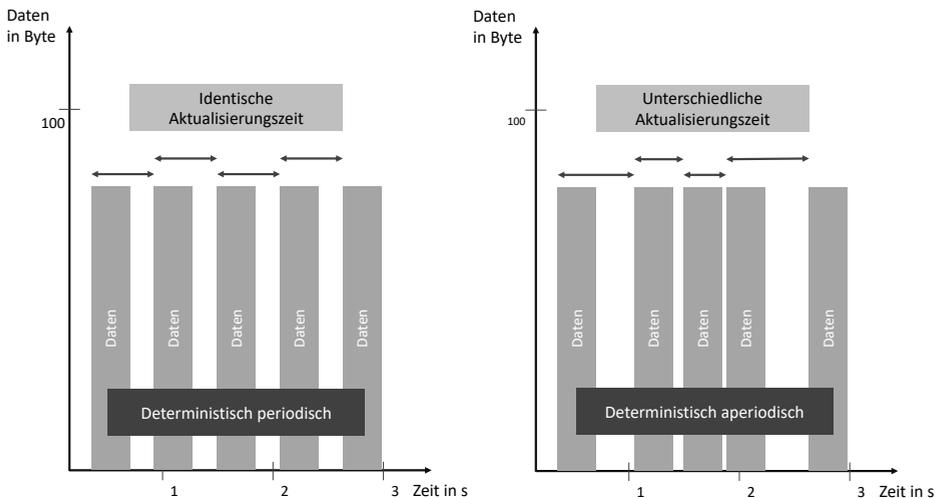


Bild 11: Deterministisch periodische Kommunikation mit gleichbleibender Aktualisierungszeit (links) und aperiodischer Kommunikation mit variierender Aktualisierungszeit (rechts) i.A.a. [25]

Nichtdeterministische Kommunikation

Bei der Verwendung nichtdeterministischer Kommunikationswege, ist die Ankunftszeit nicht vorhersagbar. Sie wird verwendet, falls Informationen übertragen werden müssen, jedoch keine zusätzlichen Anforderungen an die Echtzeit gestellt werden. Ein Spezialfall der nichtdeterministischen Kommunikation ist die burstartige Kommunikation. Hier werden Nachrichten gesammelt in sogenannten Bursts (Schwall) geschickt. Diese treten zum Beispiel bei der Übertragung von Bildern oder Videos auf, da in kurzer Zeit große Datenmengen verschickt werden. [25]

Auch nichtdeterministische Kommunikation kann periodisch oder aperiodisch auftreten. Damit die daraus resultierende Netzwerklast abgeleitet werden kann, wird nichtdeterministische Kommunikation mithilfe der durchschnittlichen und maximalen Datenrate spezifiziert. [25]

2.2.4 Spezielle Anforderungen an industrielle Kommunikation

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, werden an die Kommunikation je nach Anwendung besondere Anforderungen gestellt. Im Bereich der industriellen Kommunikation existieren ebenfalls spezielle Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung gewisser Dienstgüteparameter [35]. Industrielle Kommunikation ist ein übergeordneter Begriff für sämtliche Datenübertragungen im industriellen Kontext, sowohl in der Fertigungs- als auch Prozessautomatisierung [36]. Besonders die Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und niedriger Latenz sind entscheidend, damit sowohl die Regelung dieser Systeme als auch die Maschinensicherheit gewährleistet werden kann [37]. Die Prozess- und Fertigungsautomatisierung stellt ebenso hohe Anforderungen an weitere Dienstgüteparameter wie der sicheren Kommunikationsübertragung [38]. Auch die Echtzeitfähigkeit des Kommunikationsnetzwerks ist dabei sehr entscheidend. Applikationen innerhalb der Prozessautomatisierung haben häufig Anforderungen mit weichem Echtzeitverhalten, wohingegen Applikationen im Bereich der Fertigungsautomatisierung hartes Echtzeitverhalten erfordern [35]. Dies gilt es bei der Auswahl der notwendigen Netzwerkkomponenten zu beachten.

Innerhalb der Fertigungsautomatisierung sind ebenfalls unterschiedliche Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk vorhanden. Es existieren innerhalb einer Produktion verschiedene Ebenen und Bereiche welche häufig mit separaten Kommunikationsnetzwerken abgedeckt werden. Die wichtigsten Dienstgüteparameter zur Garantie des Echtzeitverhalten sind eine niedrige Latenz mit einer geringen Streuung des Jitters, die zu übertragende Nachrichtengröße und die jeweilige Aktualisierungszeit [39]. Wie in Tabelle 2

zu sehen ist, werden je nach Bereich der Fertigung für die Datenübertragung andere Anforderungen gestellt. Die Kommunikation innerhalb der Maschinenzelle beispielsweise erfordert eine niedrigere Latenz, kleinere Nachrichtengrößen und einen geringer streuenden Jitter der Datenübertragung als die Kommunikation auf Produktionsanlagenebene. Eine Maschinenzelle ist dabei die kleinste Einheit und gehört in diesem Kontext zu einer Produktionsanlage. Auch die Aktualisierungszeit ist auf Maschinenzellenebene geringer. Aufgrund der erhöhten Nachrichtengröße in der Produktionsanlagenebene ergibt sich wiederum eine höhere Datenrate im Netzwerk. [38]

Tabelle 2: Unterschiedliche Dienstgüteanforderungen in Abhängigkeit zu den Ebenen und Bereichen einer Produktion. [35, 38]

Beispiel	Nachrichtengröße	Latenz	Jitter	Aktualisierungszeit
Maschinenzelle	< 16 Byte	< 5 ms	0.5 ms	50 ms
Produktionsanlage	200 - 500 Byte	20 ms	2 ms	200 ms

2.2.5 Klassifizierung von Kommunikationsanforderungen nach 3GPP

Mithilfe von Dienstgüteparametern lassen sich die Anforderungen von Applikationen an das Kommunikationsnetzwerk beschreiben. Doch welche Parameter hierfür relevant sind, ist nicht einheitlich geregelt [21]. Je nach Applikation und Verwendungsszenario können unterschiedliche Dienstgüteparameter von Bedeutung sein. Die 3GPP, eine weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien im Bereich des Mobilfunks, hat in ihrer technischen Spezifikation TS 22.104 [40] vertikale Domänen in der Automatisierungstechnik untersucht und eine Spezifizierung relevanter Parameter durchgeführt. Dies soll bei der Entwicklung von zukünftigen Mobilfunkstandards wie zum Beispiel 5G bzw. 6G dabei unterstützen, dass nicht nur der private Sektor bei der Entwicklung neuer Mobilfunkstandards, sondern auch der industrielle Sektor berücksichtigt wird. Durch diese weltweite Kooperation während der Klassifizierung ist eine umfassende Beschreibung verschiedener industrieller Applikationen entstanden. Diese Klassifizierung soll in dieser Arbeit als Grundlage für die fortführenden Kapitel dienen. [40]

Bei der Verwendung industrieller Applikationen, werden Daten über ein Kommunikationsnetzwerk übertragen. Damit die hierfür erforderlichen Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk garantiert werden, unterteilt die 3GPP die Anforderungsbeschreibung in zwei unterschiedliche Kategorien.

Viele der verwendeten Parameter zur Beschreibung sind entweder bereits im vorherigen Kapitel 2.2.1 beschrieben oder leicht von dieser Standarddefinition abweichend. [40]

Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk

Industrielle Applikationen stellen gewisse Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk, über welches sie ihre Daten übertragen wollen. Damit die Applikationen während des Betriebs einwandfrei funktionieren, müssen diese Anforderungen vom Kommunikationsnetzwerk zu jeder Zeit garantiert werden. Wie in Tabelle 3 beschrieben, existieren hierzu die Parameter *Verfügbarkeit*, *Latenz*, *Zuverlässigkeit*, *Service-Bitrate* und *Aktualisierungszeit*. Mithilfe dieser Parameter lassen sich die Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk hinreichend beschreiben. [40]

Tabelle 3: Parameter für die Charakterisierung des benötigten Kommunikationsnetzwerks [40]

Parameter	Einheit	Beschreibung
Verfügbarkeit	Prozent [%]	Anteil der Zeit, in welcher das Kommunikationsnetzwerk wie garantiert funktioniert
Ende-zu-Ende-Latenz	Millisekunden [ms]	Zeit zur Übertragung von Daten vom Sender bis zum Empfänger über das Kommunikationsnetzwerk
Zuverlässigkeit	Tage [d]	Durchschnittlicher Wert an Tagen, wie lange das Kommunikationsnetzwerk fehlerfrei funktioniert
Service-Bitrate	Bit/s	Datenrate, welche das Kommunikationsnetzwerk der Applikation zur Verfügung stellt
Aktualisierungszeit	Millisekunden [ms]	Aktualisierungszeit von zwei aufeinanderfolgenden Paketen aus dem Kommunikationsnetzwerk zur Applikation

Applikationsabhängige Anforderungen an die Schnittstelle

Jede industrielle Applikation besitzt nicht nur Anforderungen an das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk, sondern auch Anforderungen an die Schnittstelle, welche die Applikation mit dem Kommunikationsnetzwerk verbindet. Hier muss die Schnittstelle gewisse Anforderung der Anbindung

an das Kommunikationsnetzwerk garantieren, damit die industrielle Applikation ausgeführt wird. Dazu sind die fünf Parameter *Burst*, *Nachrichtengröße*, *Überlebenszeit* und *Transferintervall* in Tabelle 4 definiert. [40]

Tabelle 4: Parameter für die Charakterisierung der applikationsabhängigen Anforderungen, welche an die Schnittstelle gestellt werden [40]

Parameter	Einheit	Beschreibung
Burst	Byte [B] bzw. Bit/s	Maximal möglicher Burst, den die Schnittstelle an das Kommunikationsnetzwerk vollständig übertragen muss
Nachrichtengröße	Byte [B]	Maximale Größe der Nachrichtenpakete an die Schnittstelle
Überlebenszeit	Sekunden [s]	Maximale Zeitdauer, wie lange die Schnittstelle nicht am Kommunikationsnetzwerk teilnehmen darf, bis die Applikation anschließend nicht mehr korrekt funktioniert
Transferintervall	Millisekunden [ms]	Zeitintervall zwischen zwei konsekutiven Nachrichten, die an die Schnittstelle übertragen werden

2.3 Industrielle Kommunikationstechnologien und -protokolle in der Produktion

In einer APA bauen Teilnehmer Kommunikationsbeziehungen auf, um produktionsrelevante Informationen zu erhalten oder weiterzugeben. Damit die zuvor vorgestellten Anforderungen im industriellen Umfeld entsprechend gewährleistet werden können, bedarf es spezieller Kommunikationstechnologien und Protokolle in der Produktion. Für eine korrekte Beschreibung der verschiedenen Ebenen der Kommunikation, wird in diesem Kapitel zunächst das Open Systems Interconnection (OSI) Referenzmodell vorgestellt. Anschließend werden typisch verwendete Kommunikationsmedien in der Industrie erläutert und 5G und WiFi 6 als neue Funkstandards vorgestellt. Abschließend werden industrielle Feldbusse und Protokolle vorgestellt, welche für die Kommunikation im industriellen Umfeld zur Einhaltung ihrer Anforderungen notwendig sind.

2.3.1 OSI-Referenzmodell

Damit die verschiedenen Ebenen innerhalb eines Kommunikationsnetzwerks exakt auseinandergehalten werden können, wurde 1978 das bis heute gültige OSI-Referenzmodell der ISO Standardisierungsorganisation entworfen [41]. Wie in Bild 12 zu sehen, ist dieses Referenzmodell in sieben unterschiedliche, aufeinander aufbauende Schichten unterteilt [42]. Dabei definiert das OSI-Referenzmodell nicht einzelne Protokolle oder Technologien, sondern nur die jeweilige Funktion, die von der Schicht übernommen bzw. implementiert wird [41].

Schicht	Bezeichnung (englisch)	Beispiel aus der industriellen Kommunikationstechnik
Schicht 7	Anwendung (Application)	OPC UA, HTTP, FTP, HMI
Schicht 6	Darstellung (Presentation)	Formatierung und Kodierung der Informationen
Schicht 5	Sitzung (Session)	Synchronisation und Verwaltung der Kommunikationssitzung
Schicht 4	Transport (Transport)	TCP bzw. UDP Übertragungsprotokoll
Schicht 3	Vermittlung (Network)	IP-Adressen, Router
Schicht 2	Sicherung (Data Link)	MAC-Adressen, Switch
Schicht 1	Bitübertragung (Physical)	RJ45-Stecker, LAN-Kabel, Lichtwellenleiter

Software

Hardware

Bild 12: OSI-Referenzmodell mit den jeweiligen Bezeichnungen und Beispielen aus der industriellen Kommunikationstechnik i.A.a. [42]

Schicht 1 - Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht, häufig auch physikalische Schicht genannt, ist die unterste und somit erste Schicht im OSI-Referenzmodell. Sie beschreibt, mit welchem physikalischen Medium die Daten über das Kommunikationsnetzwerk transportiert werden. Des Weiteren definiert sie bei der Datenübertragung mittels Kupferkabel oder Funk die Modulation der elektromagnetischen Wellen über das Medium bzw. die Wellenlängen bei der Übertragung via Lichtwellenleiter. Typische Hardwarevertreter der Bitübertragungsschicht sind das LAN-Kabel, Lichtwellenleiter, Repeater (zur Signalverstärkung) oder auch Stecker zur Verbindung der Kommunikationsleitung. [41, 42]

Schicht 2 - Sicherungsschicht

Auch die Sicherungsschicht ist hardwareunterstützt und wandelt die übertragenen Bits der ersten Schicht in einen Datenfluss um. Zudem wird der gleichzeitige Zugriff von mehreren Teilnehmern auf das gleiche Kommunikationsmedium geregelt. Zum Beispiel mithilfe von Buszugriffsverfahren oder unterschiedlicher Kanalzuweisung. Mit verschiedenen Methoden wird dabei eine Priorisierung von Datenpaketen durchgeführt und unterstützt bei der Einhaltung von Dienstgüteparametern. Des Weiteren wird in der Sicherungsschicht auch die Aufrechterhaltung von Verbindungen zwischen den Geräten gewährleistet. Die Verwendung von MAC-Adressen innerhalb eines Kommunikationsnetzwerks garantiert dabei die Eindeutigkeit der Teilnehmer und verbindet diese beispielsweise mit Hilfe einer Bridge oder Switch. [41, 42]

Schicht 3 - Vermittlungsschicht

Bei der Übertragung von Datentelegrammen in unterschiedliche bzw. inkompatible Netzwerke wird die dritte Schicht benötigt. Die Vermittlungsschicht ist ebenfalls hardwareunterstützt und ermöglicht zum Beispiel mit einem Router die Weiterleitung von Datenpaketen. Dabei ist es dem Router möglich, zwei Netzwerke mit unterschiedlichem IP-Adressraum zu verbinden und als Vermittler zu fungieren. Ohne Router wären Teilnehmer aus unterschiedlichen IP-Adressräume nicht ohne Weiteres in der Lage miteinander zu kommunizieren. [41, 42]

Schicht 4 - Transportschicht

Ab der vierten Schicht wird in der Regel keine Hardware mehr verwendet, um die Einhaltung der Aufgaben zu erfüllen. Die Transportschicht stellt die fehlerfreie Übertragung mittels geeigneten Transportprotokollen sicher. Hier wird zwischen dem verbindungsorientierten Protokoll TCP (Transmission Control Protocol) und dem verbindungslosen Protokoll UDP (User Datagram Protocol) unterschieden. Der wesentliche Unterschied bei der Verwendung dieser Protokolle ist, dass TCP eine Empfangsbestätigung der gesendeten Daten erwartet, wohingegen bei UDP diese Empfangsquittierung nicht vorgesehen ist. TCP kann somit bei nicht erfolgreicher Zustellung reagieren und die Daten erneut senden. [41, 42]

Schicht 5 - Sitzungsschicht

Falls Anwendungen auf verschiedenen Geräten miteinander kommunizieren müssen, bedarf es der Aufrechterhaltung einer Sitzung. Hierfür bietet die fünfte Schicht, die Sitzungsschicht, die notwendigen Methoden und Pro-

tokolle, um die Sitzung zu organisieren und zu sichern. Dabei wird auch geregelt, wie die Sitzung bei einem Verbindungsabbruch gesichert wird und anschließend erneut aufgenommen werden soll. [41, 42]

Schicht 6 - Darstellungsschicht

Damit Daten effizient übertragen werden, müssen sie entsprechend kodiert werden. Die Darstellungsschicht ist der Übersetzer kodierter Zeichenketten. Auch die Transformation in geeignete Datenformate wird von der sechsten Schicht übernommen. Eine weitere Aufgabe ist auch die Ver- und Entschlüsselung der übertragenen Daten vor dem Versenden oder nach dem Empfangen, ansonsten könnten die Informationen nicht korrekt angezeigt werden. [41, 42]

Schicht 7 - Anwendungsschicht

Die Benutzeroberfläche, welche die Interaktion mit dem Benutzer regelt, benötigt zur Darstellung der Informationen verschiedene Hintergrunddienste. Diese Kommunikation zwischen der Benutzeroberfläche und der notwendigen Dienste wird in der siebten Schicht, auch Anwendungsschicht genannt, geregelt. Des Weiteren ist sie auch für die Weiterleitung von Ein- und Ausgaben und dem daraus resultierenden Datenhandling zuständig. Die Anwendung selbst gehört nicht mehr zum OSI-Referenzmodell und bildet den Endpunkt des Referenzmodells. [41, 42]

Wie bereits vorher beschrieben, kann das OSI-Referenzmodell grob in hardware- (1-3) und softwaregestützte (4-7) Schichten eingeteilt werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird deshalb zunächst auf Kommunikationstechnologien eingegangen, welche im OSI-Referenzmodell weiter unten angesiedelt sind. Anschließend werden industrielle Kommunikationsprotokolle vorgestellt, welche sich in den oberen Schichten des Referenzmodells ein-gruppieren.

2.3.2 Industrielle Kommunikationsmedien

Beim Aufbau eines industriellen Kommunikationsnetzwerks ist die Wahl des Übertragungsmediums ein entscheidender Aspekt. Je nach Anwendung gilt es, das für die Art der Informationsübertragung passende Medium auszuwählen, denn dadurch werden verschiedene Dienstgüteparameter bereits im Vorfeld beeinflusst. Ein industrielles Kommunikationsnetzwerk besteht heutzutage häufig aus einer heterogenen Anzahl an Übertragungsmedien. Die

verbreitetsten Übertragungsmedien im industriellen Umfeld sind Twisted-Pair-Kabel, Lichtwellenleiter und Funk. [2, 43]

Twisted-Pair-Kabel

Twisted-Pair-Kabel bestehen aus isolierten und verdrehten Adernpaaren aus Kupfer. Das weit verbreitete Ethernetkabel hat je nach Ausführung mehrere Adernpaare kombiniert, um eine hohe Bandbreite zu erzielen. Durch die hohe Verbreitung ist ebenso eine hohe Kompatibilität und Ersatzteilverfügbarkeit gewährleistet. Zudem ist es kostengünstig in der Anschaffung und einfach in der Handhabung und Konfektionierung. Ein Nachteil besteht bei der maximalen Reichweite des Kabels, denn je nach Übertragungstechnologie ist die typische Reichweite auf 100 Meter begrenzt. Mithilfe von Signalverstärkern (z.B. Switch) wird das Signal aufgefrischt und die Reichweite verlängert. Sie eignen sich deshalb besonders dort, wo große Datenmengen innerhalb eines Gebäudes transportiert werden sollen. Kabelgebunden verfügen sie zudem über eine hohe Zuverlässigkeit und Stabilität der Übertragung. [44, 45]

Lichtwellenleiter

Typischerweise werden Lichtwellenleiter aus Glas oder Kunststoff hergestellt. Sie eignen sich hervorragend zur Überbrückung langer Übertragungsstrecken von mehreren Kilometern am Stück. Des Weiteren haben sie auch eine sehr hohe Störunempfindlichkeit gegenüber EMV-Strahlungen. Die initiale Installation von Lichtwellenleitern gestaltet sich jedoch komplizierter als bei Twisted-Pair-Kabeln. Lichtwellenleiter sind aufwändiger zu konfektionieren und empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen. Auch die Anschlüsse von Lichtwellenleitern sind kostenintensiver als bei RJ-45 Steckverbindungen von Twisted-Pair-Kabeln. Aufgrund des höheren Aufwands und der Kosten gegenüber Twisted-Pair-Kabeln werden sie nur dann verlegt, wenn es die Applikation erfordert. So zum Beispiel bei der stabilen und zuverlässigen Anbindung mehrerer Teilstationen von Kraftwerken, um eine schnelle Datenübertragung zu gewährleisten. [44, 45]

Funk

Funksysteme werden immer dann verwendet, wenn die Anbindung zwischen Sender und Empfänger flexibel und ortsunabhängig sein muss. Je nach verwendetem Funksystem und Sendeleistung können dabei auch sehr weite Strecken überbrückt werden (vgl. Mobilfunk). Zudem besitzt die Übertragung via Funk keinen physischen Kontakt zwischen Sender und Empfänger, was es besonders robust gegenüber mechanisch stark beanspruchten Umgebungen macht. Ein wesentlicher Nachteil von Funksystemen ist, dass die Bandbreite

durch die Übertragungreichweite limitiert wird. Die Sendeleistung bei einer omnidirektionalen, kugelförmigen Abstrahlung verhält sich indirekt proportional zum Quadrat des Abstands. Somit muss bei einer höheren Reichweite die Sendeleistung regelmäßig verstärkt werden, da sonst das Signal beim Empfänger nicht ausreichend ankommt. Alle Funksysteme gelten generell als anfällig gegenüber externen Einflüssen, was gleichzeitig die Stabilität und Zuverlässigkeit beeinflusst. Schwankungen der Empfangsfeldstärke, das sogenannte Fading, ist einer Hauptursachen für den Kommunikationsausfall in Funksystemen. [43, 45]

Aufgrund der stetigen Zunahme der Flexibilität innerhalb einer Fertigung ist zu erwarten, dass Funksysteme in der Industrie immer weiter an Bedeutung gewinnen. Heutige bereits etablierte Funkstandards, wie zum Beispiel WLAN wurden nicht primär für industrielle Standards entwickelt, was bei der Verwendung im industriellen Umfeld häufig zu Problemen führt. Neue Funkstandards sollen diesen Problemen entgegenwirken und ebenso für industrielle Zwecke entwickelt werden. [2]

Im nächsten Abschnitt werden neuartige Funkstandards vorgestellt und welche Eigenschaften sie speziell für industrielle Anforderungen beinhalten.

2.3.3 5G - Neuer industrieller Funkstandard

5G ist ein von der 3GPP entwickelter Mobilfunkstandard, der mithilfe spezieller Werkzeuge und Technologien den Anforderungen neuartiger Applikationen begegnen soll und ist der direkte Nachfolger des vorherigen Mobilfunkstandards 4G. Dies stellt aufgrund der großen Vielfalt an verschiedenen Applikationen eine besondere Herausforderung dar, da jeweils unterschiedlichste Anforderungen gleichzeitig erfüllt werden müssen. Dabei sollen zukünftig Landwirtschaft, Autos, Gebäude, Energiesektor, Finanzsektor, Gesundheitssektor, Industrie, Medien, Logistik, Transport und viele weitere Bereiche 5G flächendeckend einsetzen und davon profitieren. [46]

Aufgrund der Vielfältigkeit von Applikationen und Anforderungen, bedienen sie sich alle unterschiedlicher Dienste. Dies lässt sich anhand des Dreiecks in Bild 13 visuell beschreiben. Die drei Dienste eMBB, uRLLC und mMTC sind dabei essentiell, damit 5G die wesentlichen Anforderungen der Applikationen begegnen kann. Zudem ist es wichtig zu erwähnen, dass es nicht möglich ist, alle Merkmale zur gleichen Zeit in vollster Ausprägung zu nutzen. Vielmehr visualisiert das Dreieck die Schnittmenge zwischen den Diensten und ihren Eigenschaften. [46]

Damit 5G diese drei Dienste auch zu Verfügung stellen kann, müssen neue Werkzeuge und Technologien verwendet werden. Tabelle 5 zeigt die vier

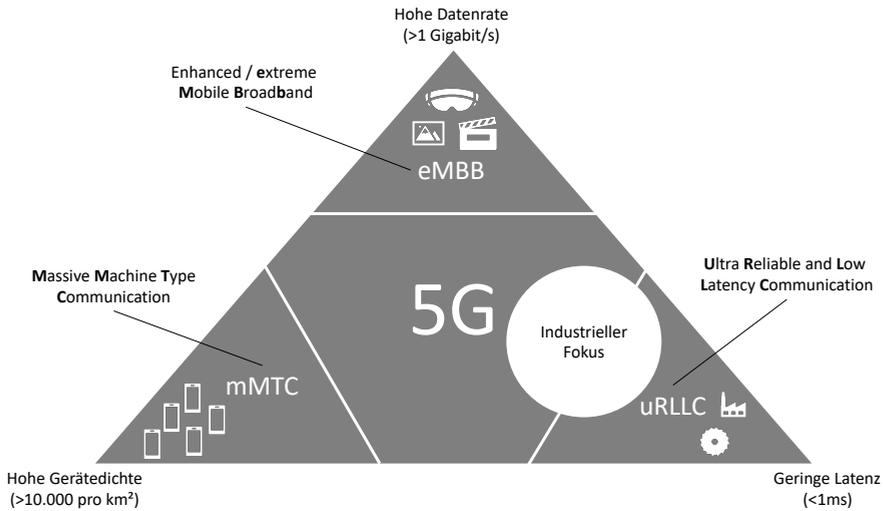


Bild 13: Das 5G-Dreieck mit seinen drei Diensten und dem industriellen Fokus [47]

Hauptwerkzeuge, mit denen die Eigenschaften des neuen 5G-Funkstandards erfüllt werden sollen. [46]

Nachfolgend werden die drei Dienste eMBB, uRLLC und mMTC von 5G näher erläutert.

eMBB - Enhanced / Extreme Mobile Broadband

Ein wesentlicher Unterschied zum bisherigen *Mobile Broadband* ist die signifikante Steigerung der Datenrate. Wo bisher mehrere hunderte Megabit/s möglich waren, soll das eMBB Datenraten von mehreren Gigabit/s ermöglichen. Dies ist vor allem aufgrund neuer Applikationen und Anforderungen notwendig. Virtual Reality, Augmented Reality und das taktile Internet erzeugen konstant hohe Datenraten, um dem Nutzer das gewünschte Bedienererlebnis zu garantieren. Da meist mehrere Applikationen zur gleichen Zeit auf das Kommunikationsnetzwerk zugreifen, muss gleichzeitig die maximal mögliche Datenrate steigen, damit sämtliche Applikationen ausreichende Ressourcen allozieren können. Um diese höheren Anforderungen an die Datenrate zu erfüllen, können zum Beispiel mehrere Antennen simultan zur Übertragung der Daten verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre der Einsatz von höheren Frequenzen während der Kommunikation. Denkbar ist hierbei ein Spektrum im zweistelligen Gigahertzbereich auf kurze Entfernung. Ziel ist es zudem, dass bei vielen Teilnehmern alle äquivalent bedient werden können und eine Ablehnung der Anfrage, wie sie zuvor notwendig war,

Tabelle 5: Vier Hauptwerkzeuge des 5G Standards [46]

Werkzeug	Beschreibung
Dynamic Radio Access Network (DyRAN)	Dynamisches Funknetz, welches sich sowohl an räumliche als auch zeitliche Veränderungen des Nutzers anpassen kann.
Lean System Control Plane (LSCP)	Gewährleistung von Latenz und Zuverlässigkeit durch neue und schlanke Kontrollmechanismen und flexibler Anpassung des Frequenzspektrums.
Localized Contents and Traffic Flows	Erlaubt die Zusammenführung, Verteilung und Auslagerung von Echtzeitdaten. Durch Lokalisierung wird das Kommunikationsnetzwerk entlastet und die Latenz zusätzlich reduziert.
Spectrum Toolbox	Nutzung verschiedener Frequenzbänder auf Basis unterschiedlicher rechtlicher Rahmenbedingungen.

vermieden wird. Die direkte Konsequenz bei gleichzeitigem Zugriff mehrere Teilnehmer ist bei entsprechender Auslastung des Netzwerks eine Reduktion der Datenrate und Steigerung der Latenz. [46]

uRLLC - Ultra Reliable and Low Latency Communication

Ein weiterer Dienst von 5G ist die Zuverlässigkeit und niedrige Latenz der Kommunikation. Damit können Anforderungen von Applikationen aus verschiedenen Bereichen erfüllt werden. In zukünftiger Verkehrsinfrastruktur können so verschiedene Fahrzeuge miteinander auf kurze Distanz kommunizieren und vor drohenden Gefahren warnen oder wichtige Informationen weitergeben. Aber auch in der Industrie können mithilfe der niedrigen Latenz Regelungsaufgaben von Steuerungen übernommen werden, womit Produktionen flexibler aufgebaut werden können. Denn die Zuverlässigkeit bisheriger Funklösungen reicht häufig nicht aus, um zeitkritische Applikationen funkbasiert zu realisieren. Auch fahrerlose Transportsysteme (FTS) können, ähnlich bei der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation der Verkehrsinfrastruktur, mithilfe von uRLLC untereinander kommunizieren und sich gegenseitig koordinieren. Zielgrößen sind hierbei ein schneller Verbindungsaufbau, niedrige Latenzen, hohe Zuverlässigkeit und hohe Verfügbarkeit des Netzwerks sowie hohe Mobilität einzelner Netzwerkteilnehmer. [46]

mMTC - Massive Machine Type Communication

Der dritte und letzte Dienst repräsentiert die hohe Anzahl von vernetzten Geräten, die gleichzeitig am 5G Netzwerk teilnehmen können. Hierbei sind unterschiedliche Szenarien denkbar, die diesen Dienst benötigen. Verteilte Sensoren und Aktoren auf weitläufigen Arealen, welche Informationen sammeln und Aktionen ausführen, können so mit einer großen Anzahl an das Netzwerk angeschlossen werden. Aber auch IoT-Applikationen innerhalb von Gebäuden benötigen dabei eine Vielzahl eigenständig kommunizierender Geräte, die das Netzwerk benutzen. Anders als bei klassischen industriellen Applikationen müssen die Geräte sowohl energie- als auch kostensparend funktionieren. Häufig sind die Komponenten nicht an einem Stromnetz angeschlossen, sondern werden mithilfe von einer autarken Batteriestromversorgung betrieben. Damit der Stromverbrauch nicht zu hoch ausfällt und die Batterie häufig gewechselt werden muss, sollte die Rechenleistung zur Teilnahme am Kommunikationsnetzwerk geräteseitig gering ausfallen, um eine lange Laufleistung zu ermöglichen. Rechenintensive Operationen kann die zentrale Kommunikationsinfrastruktur übernehmen und den Teilnehmer somit entlasten. Bei diesen Applikationen ist eine hohe Datenrate nicht von Relevanz, weshalb mithilfe des NarrowBands (Schmalband) eine hohe Reichweite und somit Netzabdeckung erzielt werden kann. [46]

Sowohl eMBB, uRLLC als auch mMTC bieten viele neue Möglichkeiten und Eigenschaften, um Funkkommunikation für neuartige Applikationen zu etablieren. Doch nicht alle Funktionen sind bereits jetzt im 5G-Standard implementiert. Vielmehr kommt es darauf an, welcher Release des Standards genutzt wird. Diese Releases werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert und deren Inhalt spezifiziert.

Releases

Damit der vorherige Mobilfunkstandard 4G die maximale Funktionalität bieten kann, entwickelte die 3GPP sechs verschiedene Releases, die in regelmäßigen zeitlichen Abständen veröffentlicht wurden. Auch bei 5G ist die Entwicklung und Freigabe in mehrere Releases unterteilt, wie in Bild 14 dargestellt ist. Mit der Zeit werden so immer weitere Funktionen und Spezifikationen freigegeben. Der Fokus bei der nachfolgenden Analyse soll dabei hauptsächlich auf die Entwicklungen und Veränderungen des für den industriellen Sektor wichtigen Services uRLLC liegen.

Der erste Release für die breite Öffentlichkeit begann mit der Nummer 15 im Jahre 2017. Es folgten im Jahre 2018 und 2019 weitere Überarbeitungen des Release 15, bei dem zwei verschiedene Arten des 5G-Netzes unterstützt wer-

den. 5G NSA (non standalone) sieht hauptsächlich die Aufrüstung bestehender 4G Netzwerke vor, um Verbesserungen im bestehenden Mobilfunk zu erreichen. Diese Umstellung ist für die Netzbetreiber kostengünstig, da sie weiterhin das 4G-Backbone benutzen können. Später folgte 5G SA (standalone), welches den Aufbau eines eigenen, komplett auf 5G basierenden Kommunikationsnetzwerks vorsieht und deutliche Verbesserungen zum bestehenden 4G-Netz bietet. Wichtige Neuerungen waren die Unterstützung von mMTC und IoT, Kommunikation von Fahrzeugen mit der Umgebung (V2x), Kommunikationsinfrastruktur für Eisenbahnen und vielen weiteren Neuerungen. Damit wurde der erste Schritt vollzogen auch industrielle Anforderungen mithilfe eines alleinstehenden 5G-Netzwerks zu bedienen. Zudem ist der Service uRLLC zum ersten Mal spezifiziert, um eine niedrige Latenz von 10ms und um den Faktor 1000 zuverlässigere Kommunikation von 99,999%, gegenüber LTE zu gewährleisten. [48]

Parallel zum Release der Version 15, wurde im Jahr 2018 auch die Spezifikation der Version 16 definiert und im Jahre 2019 und 2020 veröffentlicht. Dies war ein wichtiger Meilenstein im Projekt der 3GPP, da mit Release 16 das erste vollständige 5G-System aufgebaut werden kann. Des Weiteren fokussierten sich die Arbeiten auf viele neue und bestehende Themen wie Konvergenz zwischen drahtgebundenen und drahtlosen Netzwerken, lokale Netzwerke, Satellitenzugang, V2X-Kommunikation, Positionierung und Ortung. Ein wichtiger Bestandteil der Version 16 ist zudem die weitere Verbesserung von uRLLC speziell bei Latenz von bis zu 2ms und einer gesteigerten Zuverlässigkeit um den Faktor 10 auf 99.9999% für geringe Datenmengen. Dadurch werden vor allem industrielle IoT-Anwendungen zuverlässig adressiert, da uRLLC den wichtigsten Service für industrielle Applikation repräsentiert. [49]

Zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Arbeit ist die Spezifikation der Version 17 noch nicht final abgeschlossen. Dennoch hat sich die 3GPP auf verschiedene Inhalte geeinigt, welche im Release 17 enthalten sein sollen. Viele bereits in vorherigen Versionen implementierten Funktionen sollen kontinuierlich verbessert werden. Neben Optimierungen bei der Standortbestimmung und Lokalisierung sollen auch diverse Optimierungen bei uRLLC folgen. Für das industrielle Umfeld bedeutet das, dass viele Anwendungen, die mit einem Kabel an das Kommunikationsnetzwerk angebunden sind, zukünftig kabellos operieren werden. Es wird eine nochmals stabilere Latenz von bis zu 1ms bei gleichbleibender bzw. gesteigener Zuverlässigkeit angestrebt. [50]

Im Jahr 2022 wurde bereits vor Vollendung der Version 17 damit angefangen, die wichtigsten Inhalte für Release 18 zu definieren. Wie bereits an den vor-

herigen Releases zu erkennen ist, wird es auch hier abermals Verbesserungen für viele Applikationen geben. [51]

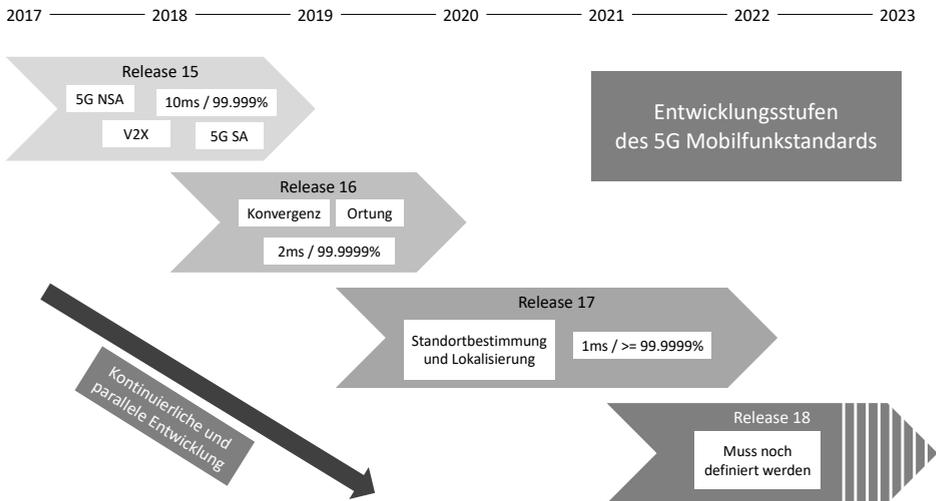


Bild 14: Verschiedenen 5G-Releases mit Ausschnitten aus den jeweiligen Funktionen innerhalb der Spezifikation i.A.a. [47]

Die stetige Entwicklung am 5G-Mobilfunkstandard und regelmäßigen Veröffentlichungen von neuen Versionen zeigt, dass aktuell noch nicht alle versprochenen Funktionen und Eigenschaften von 5G erfüllt werden können. Dennoch lässt sich am Trend erkennen, dass 5G in einigen Jahren eine Vielzahl von Applikationen bedienen kann und bei der Vernetzung von industriellen Komponenten neue, bisher unerreichte Flexibilität bieten wird.

Dediziertes Frequenzband für private Netzwerke

5G sieht auch die Nutzung eines eigenen, privaten 5G-Netzwerks vor. Dabei ist das private Netzwerk vom öffentlichen Netzwerk entkoppelt. Trotzdem gestaltet sich der Übergang zwischen den beiden Netzwerken einfacher, da es auf der gleichen Basis aufsetzt. Zwei wesentliche Vorteile bei der Nutzung eines eigenen, privaten 5G-Netzwerks sind die Datenintegrität und die garantierte Konnektivität. Da die Frequenzzuweisungen für die Funkkommunikation im Regelfall Ländersache sind, kann das Frequenzband für private 5G Netzwerke unterschiedlich ausfallen. [52]

In Deutschland wurde hierfür eine Bandbreite von 100MHz zwischen 3.7GHz und 3.8GHz reserviert. Um diesen speziellen Frequenzbereich nutzen zu dürfen, muss dies bei der Bundesnetzagentur beantragt und genehmigt werden.

Die Kosten werden mit der Gebührenformel 1 berechnet, wobei sowohl die verwendete Bandbreite, Laufzeit und Größe der Fläche in die Kostenberechnung einfließt. Siedlungs- und Verkehrsflächen werden dabei um den Faktor sechs stärker als andere Flächen gewichtet. Dies liegt an der tendenziell dichteren Bebauung im urbanen Umfeld und somit erhöhtem Koordinierungsaufwand bei der Vergabe. Hierbei handelt es sich um einmalige Lizenzkosten bei der Beantragung für die gesamte Dauer der Laufzeit. [53]

$$\text{Lizenzgebühr} = 1000\text{€} + B \cdot t \cdot 5 \cdot (6a_1 + a_2)\text{€} \quad (1)$$

mit: 1000 = Grundbetrag in €

B = Bandbreite in MHz

t = Laufzeit in Jahren

a_1 = Größe der Siedlungs- und Verkehrsfläche in km^2

a_2 = Größe anderer Flächen in km^2

Somit ergibt sich die Lizenzgebühr für ein Unternehmen mit einem Quadratkilometer Betriebsgelände im Siedlungsgebiet mit 100 MHz Bandbreite und einer Laufzeit von zehn Jahren folgende Rechnung:

$$\text{Lizenzgebühr} = 1000\text{€} + 100 \cdot 10 \cdot 5 \cdot (6 \cdot 1 + 0)\text{€} = 31000\text{€} \quad (2)$$

Der Vorteil einer dedizierten Bandbreite zwischen 3,7GHz und 3,8GHz zeigt sich vor allem im direkten Vergleich mit anderen Funkkommunikationsstandards. Das Funknetzwerk WLAN hat einen Frequenzbereich im 2,4GHz- und 5GHz-Band. Dadurch, dass viele Geräte mit WLAN ausgerüstet sind und eine bzw. beide Frequenzbänder benutzen, ist die Dichte der Funkkommunikation hier besonders hoch. Aus diesem Grund existieren verschiedene Kanäle innerhalb der Frequenzbänder, damit sich die Teilnehmer untereinander nicht stören. Kommt es jedoch zu einer großen Anzahl an Teilnehmern innerhalb des Netzwerks, müssen sich Teilnehmer im Zweifelsfall Kanäle und somit die gleiche Ressource teilen. Auch fremde Teilnehmer, die das Kommunikationsnetzwerk nicht benutzen sollen, interferieren aufgrund der regelmäßigen Ausstrahlung von Funkwellen in den gleichen Frequenzbändern. Eine Vielzahl an aktiven WLAN-Geräten kann dazu führen, dass das Kommunikationsnetzwerk für den Betreiber des privaten Netzes nicht nutzbar ist. [54]

Im industriellen Umfeld bereitet dies besondere Probleme, da viele Applikationen Echtzeitanforderungen besitzen. Viele gleichzeitige Besucher innerhalb einer Produktion können allein durch das Tragen von Smartphones zu einer Beeinträchtigung der WLAN-Kommunikation führen. Dieses Problem wird mit der Einführung eines dedizierten Frequenzbands für 5G deutlich vermindert. Dadurch dass die Vergabe der privaten 5G-Frequenzen von der Bundesnetzagentur geregelt wird, verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei 5G-Funknetzwerke in direkter Nachbarschaft gegenseitig stören. Zusätzlich werden Geräte für den privaten Gebrauch dieses spezielle Frequenzband seltener unterstützen. Dadurch werden aktuelle Probleme mit z.B. Smartphones und anderen Geräten in WLAN-Funknetzwerken beseitigt. [55]

2.3.4 **WiFi 6**

Bei der Übertragungstechnologie arbeitet das neue WiFi 6 ähnlich zum neuen Mobilfunkstandard 5G. Somit bietet es ähnliche Übertragungsgeschwindigkeiten und Ende-zu-Ende-Latenzen wie 5G. Da WiFi 6 ebenfalls ein WLAN-Funknetzwerk ist und deshalb im unlizenziierten 2.4GHz- und 5GHz- bzw. neuem 6GHz-Frequenzbereich arbeitet, werden sich die daraus resultierenden Probleme in einer Produktionshalle nicht verändern. Ein großer Vorteil bei der Nutzung von WiFi 6 gegenüber 5G ist, dass auch ältere WiFi-Geräte aufgrund der Abwärtskompatibilität angeschlossen und nahtlos angebunden werden können. Dabei fokussiert sich WiFi 6 auf die einfache Einrichtung und Handhabung des Funknetzwerks, wohingegen 5G auf hohe Flexibilität und Mobilität setzt. [56]

Bei der Frage, welcher Funkstandard in der Produktion verwendet werden soll, gilt es mehrere Parameter zu berücksichtigen. Der Aufbau eines privaten 5G-Netzwerks ist noch mit erheblichem Aufwand verbunden. Einerseits muss zunächst die Lizenz für das dedizierte Frequenzband erworben werden, andererseits liegen die Kosten beim Aufbau einer privaten Funkzelle im fünf- bzw. sechsstelligen Bereich. Auch die Inbetriebnahme und Wartung gestaltet sich aktuell noch schwierig und muss häufig durch den Ausrüster selbst durchgeführt werden. WiFi 6 hingegen ist mit anfänglich geringen Investitionskosten verbunden und erleichtert somit den Einstieg in die Funkkommunikation. Schlussendlich muss die Frage gestellt werden, ob ein 5G-Funknetzwerk flächendeckend in der gesamten Produktion oder sogar unternehmensweit etabliert werden soll. Dadurch können Skalierungseffekte durch die große Anzahl an Teilnehmern genutzt werden, um die hohen Anschaffungskosten der 5G-Infrastruktur zu verteilen und die Gesamtkosten pro Anschlusspunkt zu senken. Auch die Datenintegrität und Störungssicherheit ist dabei ein

wichtiger Parameter, der in diese Betrachtung einfließen muss und somit die Entscheidung zugunsten von 5G fällt. Falls jedoch lediglich wenige Geräte untereinander vernetzt werden sollen und die Einhaltung von hohen und garantierten Echtzeitanforderungen nicht immer entscheidend sind, ist der Aufbau eines WiFi 6 Netzwerks die bessere Alternative.

2.3.5 Industrielle Feldbusse und Kommunikationsprotokolle

Bei der Datenkommunikation zwischen Teilnehmern existieren verschiedene Varianten. Im einfachsten Fall erfolgt dies mithilfe einer direkten Kabelverbindung und Stromsignalen. Typischerweise werden hierfür Stromsignale zwischen 4 und 20 mA verwendet. Sollen mehrere Teilnehmer untereinander kommunizieren, muss zwischen all diesen Teilnehmern jeweils eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut werden. Ein in der Industrie weit verbreitetes Kommunikationsprotokoll, welches diese Art der Datenübertragung nutzt, nennt sich HART (Highway Addressable Remote Transducer). [57]

Die Nutzung des HART-Protokolls hat bei steigender Anzahl von Kommunikationsteilnehmern seine Grenzen. Kommunikationssysteme werden im Regelfall von mehreren Teilnehmern gleichzeitig zum Datenaustausch genutzt. Der Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wird mit steigender Anzahl an Teilnehmern immer komplexer und kostspieliger. Die Verwendung einer einzelnen Leitung zur Datenkommunikation für mehrere Teilnehmer ist daher wünschenswert, da so die Installations- und Instandhaltungskosten gesenkt werden. Damit sich die Teilnehmer bei der Verwendung einer einzelnen Leitung untereinander nicht behindern, wird ein geregelter Zugriff auf das Medium benötigt. Bei der Datenübertragung mittels Kabel wird diese Steuerung des Zugriffs mithilfe eines Bussystems geregelt. Das zuerst entwickelte ist zugleich immer noch das am meisten verwendete Bussystem namens Ethernet. [58]

Netzwerktopologien von Bussystemen

Die Anordnung der physikalischen Verbindung zwischen den einzelnen Teilnehmern wird als Topologie bezeichnet [59]. Im industriellen Kontext werden Topologien dazu genutzt, um eine SPS mit den Aktoren und Sensoren der Anlage zu verbinden. Je nachdem, welche Eigenschaft die Verkabelung der Teilnehmer erfüllen soll, können verschiedene Topologien eingesetzt werden. In Bild 15 sind die am häufigst verwendeten Topologien grafisch dargestellt, wie die Verbindung zwischen dem Master (SPS) und den verschiedenen Teilnehmern (Sensoren und Aktoren) aufgebaut wird. Die Linien- und Bustopologie zeichnet sich vor allem durch den geringen Installationsaufwand aus, da hier im Vergleich zu anderen Topologien die verwendete Kabelstrecke am

effektivsten ausgenutzt wird. Soll eine möglichst hohe Datenrate und kurze Wegstrecken (Latenz) zwischen den Teilnehmern und dem Master erzielt werden, ermöglichen die Topologien Stern und Baum im Durchschnitt die besten Resultate. Im Gegensatz zur Bustopologie, bei der sämtliche Teilnehmer entlang der Hauptleitung angeschlossen werden, verzweigt sich bei der Baumtopologie die Hauptleitung in weitere innere Knoten. Dezentrale und verteilte Steuerungssysteme verwenden dabei häufig die Insellösung. Die Ringtopologie ermöglicht einen hohen Grad an Redundanz, da beim Ausfall eines Teilnehmers, bzw. der Durchtrennung einer Leitung, die restlichen Teilnehmer über die andere Seite erreicht werden können. Gleichzeitig hat der Ring auch einen hohen Installationsaufwand, da mithilfe eines Ringmanagers der Datenverkehr geregelt und nicht zustellbare Telegramme aus dem Ring entfernt werden müssen, da sie sonst den Bus überlasten. [60]

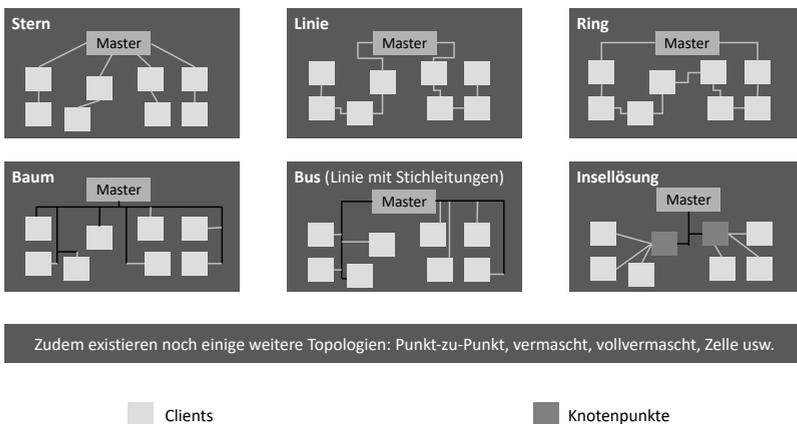


Bild 15: Unterscheidung verschiedener Netzwerktopologien hinsichtlich ihrer physikalischen Verbindung zwischen Master und Teilnehmer i.A.a. [60]

Feldbusse

Die Bustopologie wird oft als Synonym für Bussysteme verwendet, wobei Bussysteme nicht immer strikt nach der Bustopologie aufgebaut werden. Industriell verwendete Bussysteme zur Verbindung zwischen SPS und ihren Sensoren bzw. Aktoren werden als Feldbusse bezeichnet. Aufgrund verschiedener Anforderungen und anfangs fehlenden Standardisierungen hat sich mittlerweile eine heterogene Landschaft an Feldbussystemen entwickelt. Ende der 80er Jahre hat sich vor allem der Feldbusstandard PROFIBUS (Process Field BUS) in Deutschland aufgrund verschiedener Forschungsprojekte

weit verbreitet. Noch immer wird PROFIBUS häufig im Bereich der Prozessindustrie vorgefunden, da es nicht zuletzt aufgrund seiner Robustheit und möglichem Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen oftmals der einzige mögliche Vertreter der Feldbusse ist. PROFIBUS gehört, genauso wie CAN Bus und HART, zu den Vertretern von nicht-ethernetbasierten Feldbussystemen. [58]

Die Veränderung von Kommunikationsanforderungen der Teilnehmer in der Industrie erforderte eine Weiterentwicklung vorhandener Feldbussysteme. 2003 entwickelte die PROFIBUS & PROFINET International (PI) Organisation die erste Spezifikation des Feldbusstandards PROFINET IO, welcher den Nachfolger von PROFIBUS darstellt. Die Feldbusse PROFIBUS und PROFINET besitzen im Jahr 2020 einen Marktanteil von ungefähr 30% weltweit. Die größte Unterscheidung ist, dass es sich bei PROFINET um einen echtzeitfähigen Feldbus auf Basis von Ethernet handelt. Ein großer Vorteil bei der Verwendung von Ethernet als Bussystem ist, dass verschiedene Protokolle gleichzeitig über das selbe Medium übertragen werden können [61]. Weitere Vertreter von ethernetbasierten Feldbussen sind Ethercat, Ethernet IP und Sercos III. Da Ethernet als solches nicht echtzeitfähig ist, müssen Feldbusse in ihrer Architektur modifiziert werden, um Determinismus und Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten. [58]

PROFINET

Mit der Einführung von PROFINET wurde ein echtzeitfähiger und deterministischer Feldbus auf Basis von Ethernet geschaffen. Dabei nutzt PROFINET IO das Prinzip der sogenannten Application-Relation, um eine Verbindung zwischen dem IO-Controller (z.B. einer SPS) und einem IO-Device (dezentrale Peripherie mit Sensoren und Aktoren) aufzubauen. Diese Application-Relation weist das IO-Device immer nur einem einzigen IO-Controller zu. Dadurch wird PROFINET IO zum echtzeitfähigen und zyklischen Austausch von Prozessdaten und azyklischen Übertragung von Parameterdaten und Alarmen befähigt. PROFINET wird mit diesen Eigenschaften auch als PROFINET Real-Time (RT) bezeichnet. Die Einhaltung der Echtzeit wird mithilfe der Priorisierung von Datentelegrammen gewährleistet. Durch VLAN Priority Tagging erhalten PROFINET IO Echtzeitdaten die Prioritätsstufe sechs. Diese ist direkt nach der Prioritätsstufe sieben die höchste Priorität bei der Weiterleitung von Telegrammen im Kommunikationsnetzwerk. Prioritätsstufe sieben ist im Regelfall für Telegramme zur Steuerung und Parametrierung des Netzwerks vorbehalten, weshalb PROFINET IO Telegramme mit der Prioritätsstufe sechs im zyklischen und azyklischen Datenverkehr eine hohe Priorität erfahren. Dennoch kann es vorkommen, dass Hardwarehersteller von Netzwerkkomponenten VLAN Priority Tagging ausnutzen, um mithilfe

der höchsten Prioritätsstufe sieben eine stabile Performance im Netzwerk zu gewährleisten, da ihre Telegramme zu jedem Zeitpunkt bevorzugt werden. Dies zeigt eine mögliche Schwachstelle, weshalb PROFINET IO basierend auf VLAN Priority Tagging nicht zur Übertragung von Daten mit geringer Latenz und harten Echtzeitanforderungen geeignet ist. [58, 62]

Die Einhaltung von harter Echtzeit und Zykluszeit von weniger als einer Millisekunde wird zum Beispiel bei der Regelung von Motion Control (MC) bzw. Robotik-Applikationen benötigt. Hier ermöglicht PROFINET IO (RT) häufig nicht den nötigen Determinismus bei der Einhaltung der Zykluszeiten und Aktualisierungszeiten, weshalb zusätzlich PROFINET IRT (Isochronous Real-Time) entwickelt wurde. Dabei wird eine starke Modifikation des bekannten Ethernet Kollisionsprinzips vorgenommen. Der vorhandene Kommunikationskanal wird in unterschiedliche Zeitschlitze aufgeteilt und den verschiedenen Kommunikationsklassen zur Verfügung gestellt. In Bild 16

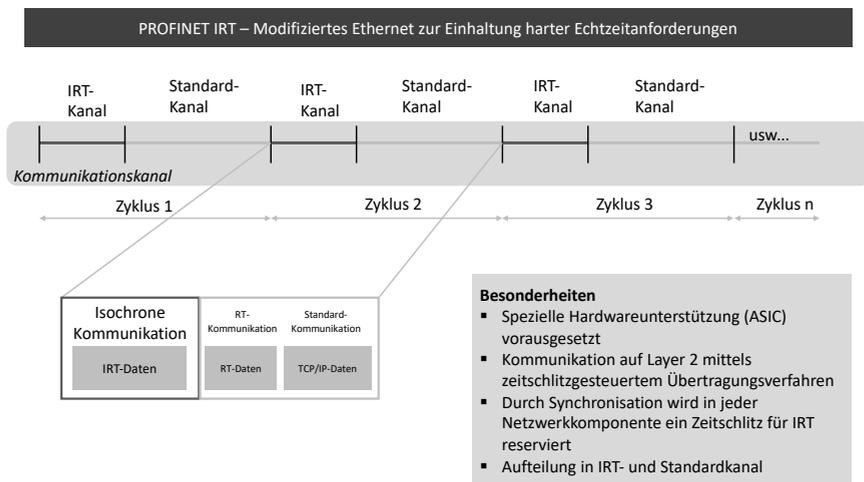


Bild 16: PROFINET IRT als modifiziertes Ethernet mit Zeitschlitzverfahren i.A.a. [62]

ist die Aufteilung des verfügbaren Kanals in den für die harten Echtzeitanforderungen bestimmten IRT-Kanal und für sonstige PROFINET IO Kommunikation sowie Standard-Kommunikation bestimmten Standard-Kanal zu erkennen. Die Wiederholung des jeweiligen Zeitschlitzes wird über die Zykluszeit bestimmt und durch die Einhaltung eines geringen Jitters ein hoher Grad an Determinismus garantiert. Bei Verwendung von PROFINET IRT wird aufgrund der starken Modifikation des Ethernetstandards spezielle Hardware (ASICs) vorausgesetzt, welche das Zeitschlitzverfahren und

weitere Mechanismen zur Einhaltung geringer Latenzen und Jitter unterstützt. Innerhalb eines PROFINET IRT-Kommunikationsnetzwerks müssen somit sämtliche Netzwerkkomponenten (z.B. Switches) des Bussystems diese Anforderungen erfüllen. Dies führt dazu, dass die Kosten der Hardware steigen und die Konfiguration solcher Netzwerke komplizierter wird. [61, 62]

Time Sensitive Networking - TSN

Ein großer Nachteil aktueller Feldbusse ist, dass heutige Kommunikationsnetzwerke zwischen IT und OT nicht konvergent sind. Feldbusse sind, wie bereits zuvor beschrieben, auf die Anforderungen der Automatisierungstechnik ausgelegt. Mit der zunehmenden Veränderung heutiger Produktionen entwickeln sich neue Anforderungen und Applikationen. Unter anderem besteht die Notwendigkeit in der IT gängige Mechanismen auch im OT-Umfeld zu etablieren. Routinemäßige Antivirusprüfungen müssen sich deshalb das gleiche Ethernetnetzwerk wie echtzeitfähige und deterministische Automatisierungssapplikationen teilen. Problematisch wird es jedoch, wenn das Kommunikationsaufkommen diverser IT-Applikationen den für die Produktion notwendigen Netzwerkverkehr von OT-Geräten unterbinden. Die Verwendung gängiger Mechanismen (z.B. VLAN Priority Tagging bei PROFINET IO RT) kann dies bei extrem hohem Datenaufkommen nicht mehr verhindern. Die Verwendung von Feldbussen mit Garantien für harte Echtzeitanforderungen (z.B. PROFINET IRT) wäre hiervon nicht betroffen, jedoch könnten über dieses Netzwerk auch keine IT-Applikationen suffizient kommunizieren. [63]

Damit IT- und OT-Netzwerke konvergent, echtzeitfähig und deterministisch zugleich werden, wurde Time Sensitive Networking (TSN) im Projekt IEEE 802 als eine Reihe verschiedener Ethernetstandards erarbeitet. Der größte Vorteil dabei ist, dass TSN mithilfe verschiedener Mechanismen Standard-Ethernet deterministisch macht. Zum Beispiel werden für eine Applikation mit bestimmten Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk der jeweils passende Kanal mit garantierten Dienstgüteparametern zur Verfügung gestellt. Somit können IT- und OT-Applikationen zeitgleich koexistieren und alle Anforderungen bezüglich Determinismus und Echtzeitfähigkeit erfüllen. [64]

Mit der flächendeckenden Einführung von TSN-Netzen müssen auch vorhandene Feldbusse hinsichtlich ihrer Eignung überprüft werden. Wie in Bild 17 zu erkennen ist, benutzen PROFINET-Dienste zur Einhaltung ihrer jeweiligen Echtzeitanforderungen die Mechanismen von RT bzw. IRT in der Sicherungsschicht (2. Schicht). Da TSN die jeweils vorhandenen Mechanismen von PROFINET RT und IRT ebenfalls unterstützt, ist eine Evolution

möglich. Der Vorteil dabei ist, dass bekannte PROFINET-Attribute hierbei nicht verloren gehen und für den Benutzer solcher Feldbusse ein Wandel attraktiver ist. Gleichzeitig wird PROFINET IRT aufgrund der Funktionalitäten von TSN nicht mehr zwingend benötigt. Auch die Wahl einer höheren Bandbreite von einem Gigabit pro Sekunde ist dadurch möglich. [65]

Ähnlich zu PROFINET verhält sich in diesem Zusammenhang der Feldbus EtherNet/IP der ODVA. Da dieser Feldbus ebenfalls keine gravierenden Modifikationen des Standard-Ethernets zur Übertragung von Prozessdaten vornimmt, kann TSN in der Sicherungsschicht die nötigen Kanäle und Determinismus zur Verfügung stellen. [66]

EtherCAT von Beckhoff bietet bereits heute einen hohen Grad an Determinismus und Echtzeitfähigkeit bei der Übertragung von Prozessdaten. Dies wird mit einer starken Modifikation des Standard-Ethernets erzielt, was zeitgleich auch eine durchgehende Konvergenz der Kommunikationsnetzwerke verhindert. [67]

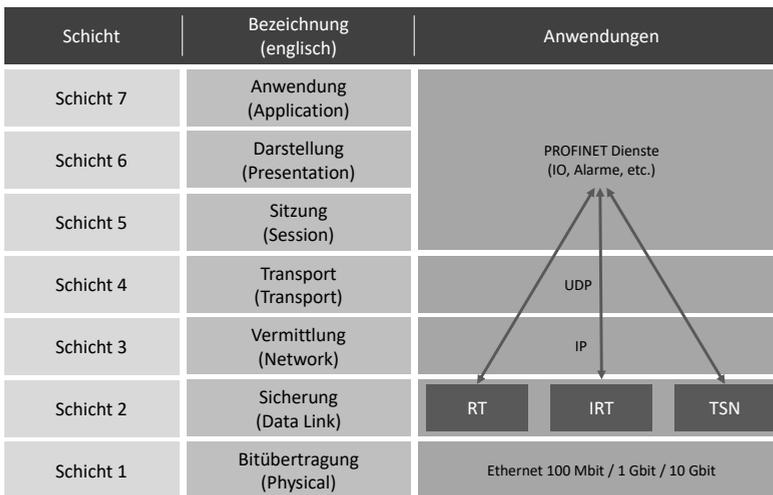


Bild 17: Die Nutzung von PROFINET ist sowohl mit RT, IRT als auch TSN möglich i.A.a. [63]

Es lässt sich festhalten, dass mit der Einführung von TSN viele Feldbusse profitieren können, da sie nicht mehr eigenständig Echtzeitanforderungen anbieten müssen. Zudem werden so auch aktuelle Hindernisse beim Aufbau und den Kosten von PROFINET IRT Netzwerken überwunden, denn TSN soll ohne zusätzliche und kostenintensive Hardware auskommen. Die Konvergenz von IT und OT ermöglicht eine durchgängige Kommunikation in allen

Produktions- und Unternehmensbereichen, ohne dabei Produktionsausfälle aufgrund überlasteter Netzwerke zu riskieren.

OPC UA

OPC UA wurde im Jahre 2006 als neuer Standard für industrielle Kommunikation von der OPC Foundation verabschiedet. Der Fokus von OPC UA liegt auf einheitlicher und herstellerunabhängigen Datenkommunikation zum Austausch von Maschinendaten (Maschine-zu-Maschine) im industriellen Kontext. Anders als vorherige OPC-Standards, ist OPC UA plattformunabhängig und erlaubt den Herstellern industrieller Komponenten diesen Standard auf der gleichen Hardware zu implementieren. Der hierzu notwendige Kommunikationsstack erstreckt sich auf 15 unterschiedliche Spezifikationen, welche unter anderem Mechanismen der Kommunikation, Semantik der Datenbeschreibung als auch verschiedene Security-Aspekte zur sicheren Übertragung der Daten beschreiben. Der Vorteil dabei ist, dass der Anwender bei der Nutzung einer dieser Spezifikationen herstellerunabhängig immer das gleiche Verhalten erwarten kann, ohne dabei für die Implementierung der jeweiligen Spezifikationen verantwortlich zu sein. [68]

Wie zuvor beschrieben, handelt es sich bei OPC UA nicht nur um ein neues industrielles Protokoll zur industriellen Datenkommunikation. Vielmehr ist es ein holistischer Ansatz, welcher diverse Anforderungen in der Datenkommunikation einer Produktion abdeckt. Betreiber einer solchen Anlage können von Maschinenherstellern verlangen, die Kommunikation zu ihren Maschinen auf Basis von OPC UA zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich kann das Interface, worüber die Maschine angesprochen wird mithilfe von OPC UA Companion Specifications einheitlich gestaltet werden. UA Companion Specifications stellen dabei die Beschreibung der Informationsmodellierung und möglichen Funktionen einer Maschine dar. Beispiele hierfür sind domänen- und branchenspezifische Standards wie der Weihenstephan-Standard [69] für Lebensmittel- und Getränkehersteller und PackML [70] für die Verpackungsindustrie. Durch die Nutzung dieser Standards, sind Maschinen- und Anlagenzulieferer dazu verpflichtet, die herstellerunabhängigen einheitlichen Funktionen zu unterstützen. Der Vorteil dabei ist, dass die Integration von Maschinen verschiedener Hersteller dabei wesentlich vereinfacht wird. Zusätzlich bietet OPC UA Funktionen zur Authentifizierung, Signierung und Verschlüsselung der Datenübertragung mit Algorithmen wie RSA (Rivest-Shamir-Adleman), AES (Advanced Encryption Standard) und SHA (Secure Hash Algorithm). Dadurch gewährleistet OPC UA bei konvergenten Netzwerken die Sicherheit der Datenkommunikation. [71]

Der Vorstoß der OPC Foundation, in konvergenten Netzen einen standardisierten Datenaustausch vorzunehmen, zeigt sich auch in der 2018 vorgestellten Initiative der Field Level Communication (FLC). Dadurch lässt sich eine durchgängige Kommunikation auf Basis von OPC UA aus der Cloud bis auf Komponentenebene der Feldgeräte aufbauen. Durch die Nutzung eines Protokolls in der gesamten Produktion werden aufwendige Schnittstellen zur Protokollumsetzung vermieden und die Durchgängigkeit des Datenzugriffs erhöht. Bestehende Feldbusse könnten so in einer Vielzahl an Applikationen abgelöst werden. Um die nötigen Dienstgüteparameter industrieller Applikationen zu gewährleisten, bedient sich OPC UA dem Ethernet TSN Standard. Hierdurch kann auf eine vorhandene, herstellerunabhängige Plattform aufgesetzt und die Echtzeitfähigkeit sowie Determinismus gewährleistet werden. [72]

2.4 Planung und Simulation

Immer komplexer werdende Produktionsabläufe und zukünftige APA erfordern eine durchgängige Planung und Simulation, um der steigenden Komplexität zu begegnen [73]. Aufgrund der steigenden Anzahl an Kommunikationsteilnehmern und dem Wunsch nach konvergenten Netzwerken innerhalb der Produktion, ist auch hier der Bedarf an Simulation groß, damit keine Überlastungen des Netzwerks entstehen. Nachfolgend werden vier verschiedene Modelle der Planung und Simulation im Bereich der Produktionsabläufe vorgestellt und für diskrete Materialflusssimulationen bekannte Werkzeuge namentlich genannt. Anschließend werden ebenso zwei unterschiedliche Modelle zur Bestimmung des Kommunikationsverkehrs gezeigt und die am Markt verfügbaren Simulatoren aufgezählt.

2.4.1 Produktionsplanung und Materialflusssimulation

Die stetige Zunahme an Industrie 4.0-Applikationen in der Produktion steigert sowohl die Komplexität als auch die Anforderungen, welche neuartige Applikationen mit sich bringen [74]. Damit dieser steigenden Komplexität begegnet werden kann, helfen unter anderem Simulationen im industriellen Kontext [73]. Auf Basis der durchgeführten Simulation, kann die Planung angepasst und optimiert werden. Dadurch entstehen weniger Fehler bei der Planung und verhindern spätere Ausfälle und Engpässe während des Betriebs. Zeitgleich werden Ressourcen optimal angesteuert und die Effizienz erhöht.

Im Kontext der Produktionsplanung, Logistik und Betrieb der APA, werden hauptsächlich vier verschiedene Methoden verwendet. Die jeweils geeignete Simulationsmethode muss nach den Anforderungen und erwarteten Ergeb-

nissen ausgewählt werden. Die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen ist hauptsächlich für die Validierung und Optimierung von Softwarecode geeignet [75]. Dabei lässt sich der Ablauf von Maschinen im Vorhinein ohne realen Aufbau testen und Fehlerquellen vermeiden. Prozesssimulationen hingegen werden vor allem zur Planung von Prozessabläufen verwendet. Diese finden häufig auf Anlagenebene statt und simulieren die Abläufe und ihre Auswirkungen zwischen mehreren Maschinen [76]. Das dritte Simulationsmodell beschäftigt sich mit der Ergonomieplanung für Personen am Arbeitsplatz, damit der Arbeitsplatz so effizient als auch schonend wie möglich gestaltet wird [77]. Die letzte Methode befasst sich mit der Planung und Simulationsabläufen auf Produktionsebene, auch Materialflusssimulation genannt. Mithilfe diskreter Simulation können logistische Abläufe simuliert und Produktionsprozesse optimiert werden [78]. Dadurch lassen sich Fehlerquellen, welche im Zusammenspiel verschiedener Maschinen und Anlagen auftreten, bereits frühzeitig minimieren [79]. Die frühzeitige Erkennung von Fehlern reduziert dabei die Kosten und verringert die Time-to-Market-Zeit.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf die Beziehungen zwischen Maschinen und Anlagen und deren jeweilige Zustände, weshalb sich die Methode der diskreten Produktionsplanung und Materialflusssimulation am besten eignet. Hierfür sind bereits verschiedene marktreife Lösungen vorhanden und in diesem Kontext eingesetzt. Neben *Plant Simulation* [80] der Firma Siemens PLM, existieren noch *Arena Simulation* [81] der Firma Rockwell Automation und *Simio* [82] der gleichnamigen Firma Simio. Zusätzlich zu diesen industriellen Werkzeugen bieten noch weitere Firmen fertige Lösungen zum Einsatz im Kontext der Materialflusssimulation an. All diese Softwarelösungen haben ähnliche Ziele, welche sie durch Simulation und Optimierung erreichen wollen. Aus diesem Grund ist die Unterscheidung nur im Detail sichtbar und dadurch von Applikation zu Applikation aufs Neue zu bewerten [83].

2.4.2 Ereignisdiskrete und mathematische Kommunikationssimulation

Wie in vorherigen Kapiteln bereits beschrieben, nimmt die Anzahl an Kommunikationsteilnehmern innerhalb der Produktion stetig zu. Zudem werden Netzwerke aufgrund ihrer Anforderungen immer komplexer. Auch die Zunahme an konvergenten Netzwerken, stellt industrielle Kommunikation vor neuen Herausforderungen. Heutige Kommunikationsnetzwerke werden größtenteils von erfahrenen Planenden erstellt, welche auf Basis ihrer bisherigen Erfahrungen und ihres Wissens Komponenten auswählen und entsprechend dimensionieren. Die Zunahme des Kostendrucks und die dadurch verbundene Steigerung der Effizienz sowie der optimalen Auslastung der

Netzwerkplanende geeignete Simulationssoftware benötigen [84], denn ohne Simulationssoftware ist nur eine grobe Planung des Kommunikationsnetzwerks möglich und mit einer höheren Anzahl an potentiellen Fehlerquellen verbunden [85].

Ähnlich wie bei der Simulation im Kontext der Produktionsplanung existieren auch hier verschiedene Methoden zur Simulation von Kommunikationsnetzwerken. Diese sind jedoch nicht auf den industriellen Kontext beschränkt. Vielmehr werden diese Methoden auf verschiedene Bereiche angewendet. Generell werden Netzwerksimulation in zwei Arten unterschieden [86]. Bei der ersten Methode wird mithilfe mathematischer Modelle der aufkommende Netzwerkverkehr berechnet. Hierzu benötigen die verwendeten mathematischen Gleichungen exakte Informationen über die Netzwerkkomponenten und deren Teilnehmer [87]. Die Abbildung dynamischer und sich ändernder Prozesse ist somit nicht ohne weiteres möglich [88]. Die resultierenden Ergebnisse sind jedoch sehr genau und bei kritischen Echtzeitanwendungen besonders wichtig.

Die zweite Methode basiert auf einer diskreten Ereignissimulation. Durch die Vorgabe von zu versendenden Paketen und des jeweiligen Transportprotokolls in Zusammenhang mit der Kommunikationstechnologie können komplexe und dynamische Netzwerke simuliert werden [86]. Vereinfachungen in bestimmten Schichten des Netzwerks ermöglichen dadurch eine Simulation in Echtzeit. Eine Worst-Case-Betrachtung, wie sie im ersten Modell durchgeführt wird, ist in dieser Art von Simulation jedoch nicht möglich, da nicht alle auftretenden Fälle überprüft werden [85]. Sie eignet sich deshalb besonders dann, wenn das Ergebnis für die Überprüfung der Machbarkeit und Grobplanung dient.

Im Bereich der diskreten Ereignissimulation existieren ebenfalls viele bereits marktfertige Lösungen. Diese werden unter anderem von *OMNeT++* [89] der Firma OpenSim, *OPNET* [90] der Firma OPNET Technologies und *ns-3* [91] welche aus dem ns-3 Projekt entstammt, repräsentiert. All diese Werkzeuge haben gemeinsam, dass sie Netzwerke mithilfe von vorgefertigten Bausteinen für Protokolle und Technologien die dabei entstehende Netzwerklast simulieren. Gleichzeitig ist jedoch keines dieser Simulatoren für den primären Einsatz im industriellen Kontext konzipiert, weshalb sowohl Protokolle, Anforderungen, dynamische Aspekte der Produktion als auch verwendete Technologien nicht vollständig abgebildet werden. *SINETPLAN* [92] der Firma Siemens hingegen berechnet die Netzwerkauslastung und führt eine Worst-Case-Betrachtung anhand mathematischer Modelle durch. Es setzt im Engineeringsschritt des Lebenszyklus einer Maschine bzw. Anlage an und

berechnet auf Basis sämtlicher Topologien und exakter Komponentenbeschreibung die entstehende Netzwerklast [87].

2.5 Bestehende Forschungsansätze

Die Wichtigkeit von Simulationen im Kontext der Produktionsplanung und Materialflusssimulation sowie von Kommunikationsnetzwerken wurde im vorherigen Kapitel bereits beschrieben. Im Bereich der Simulation von Kommunikationsnetzwerken zeigt sich, dass sehr wenige Werkzeuge existieren, die für den industriellen Kontext entwickelt sind. Nachfolgend werden einige Vorarbeiten vorgestellt, welche die industrielle Kommunikationssimulation in den Vordergrund stellen. Dabei werden auch bestehende Co-Simulationsansätze, das heißt die Kombination und Verknüpfung aus zwei verschiedenen Simulatoren zum gewinnbringenden Informationsaustausch, untersucht.

CHEN et al. nutzen zur Simulation des Kommunikationsaufkommens funkbasierter Netzwerke den diskreten Ereignissimulator OMNeT++. Bei der eingeführten Architektur wird eine realistische Abbildung des industriellen Umfelds mithilfe einer Simulation zwischen dem Werkzeug SINEMA E und OMNeT++ erreicht. SINEMA E ist dabei ein Programm, mit welchem WLAN-Komponenten positioniert, die Netzwerke geplant und konfiguriert werden. Die Verbindung dieser Architektur beschreibt einen einseitigen Informationsaustausch zwischen SINEMA E und OMNeT++, welcher zur Initialisierung von OMNeT++ dient. Dadurch ist es möglich, OMNeT++ mit den nötigen Informationen wie Position der Maschinen und Kommunikationsgeräte, Topologie, Wände und weiterer Hindernisse zu versorgen. Zudem werden wichtige Statistiken über gemessene Signalstärken hinterlegt, damit OMNeT++ bei der Simulation diese berücksichtigen kann. Mithilfe dieser Kombination lässt sich ein realistisches Abbild der Produktionsumgebung erstellen, um die Simulation der Funkkommunikation zu optimieren. Der Fokus in dieser Arbeit liegt ausschließlich auf dem funkbasierten Protokoll IEEE 802.15.4 und deckt die kabelgebundene Kommunikation nicht ab. [93]

Auch die Arbeit von DEDE et al. beschäftigt sich mit der Integration von OMNeT++ in einen größeren Kontext, damit die Simulation des Kommunikationsverkehrs realistisch abgebildet wird. Dabei handelt es sich um die Integration von OMNeT++ in das Mosaik Co-Simulations-Framework. Dieses Framework kombiniert verschiedene Simulatoren, wie zum Beispiel für Photovoltaik, Kraftwerke und Haushalte, um ein komplexes und flexibles Smart Grid abzubilden. OMNeT++ deckt in diesem Framework zusätzlich die Komponenten der Netzwerksimulation ab, damit die nötigen Kommunikationsnetzwerke vorab geplant und ausgelegt werden können. Zusätzlich

erreichen sie damit die Sammlung aller notwendigen Simulatoren für die Planung komplexer Smart Grids in einem Framework. Die Hauptaufgabe der Synchronisation und Kontrolle übernimmt dabei das Mosaik-Framework. Damit die vergangene Zeit bzw. Simulationsschritte in beiden Simulatoren gleich abläuft, werden diese durch Erweiterung des OMNeT++-Kernels erzielt. Somit kann gewährleistet werden, dass die Simulatoren jeweils aufeinander warten und korrekt synchronisieren können. Die notwendigen Initialisierungsinformationen erhält OMNeT++ ebenso vom Mosaik-Framework und kann so sein Kommunikationsnetzwerke mit sämtlichen Teilnehmern aufspannen. Es zeigt sich, dass OMNeT++ für eine Co-Simulation in einzelnen Simulationsschritten unter externer Kontrolle geeignet ist, und der Kernel dahingehend angepasst werden kann. [94]

LIU et al. beschreiben in ihrer Arbeit, dass Kommunikationsnetzwerke aufgrund steigender Anforderungen immer komplexer werden. Neuartige Applikationen verstärken diesen Trend und zeigen einen Wandel zur funkbasierten Kommunikation, welche einer gründlichen Planung bedarf. Jedoch sind die Applikationen im Bereich der Prozessautomatisierung sehr unterschiedlich, weshalb sich auch die Anforderungen der Teilnehmer an das Kommunikationsnetzwerk unterscheiden. Damit dies mithilfe einer Simulation überprüft und optimal geplant werden kann, setzen sie ebenfalls auf eine Co-Simulation. Diese besteht aus einem Prozesssimulator mit dem Tennessee Eastman Challenge (TE) Model und dem Netzwerksimulator OMNeT++. Das Ziel ist es, mithilfe einer geeigneten OMNeT++ Simulation die Eigenschaften des Funknetzwerkes in Kombination mit dem WirelessHART-Protokoll in der Prozessindustrie zu untersuchen. Hierbei handelt es sich ebenso um einen bidirektionalen Austausch beider Simulatoren, welche zusätzlich synchronisiert werden. Aus den Ergebnissen der Co-Simulation können wichtige Erkenntnisse über die Konfigurationen der jeweiligen Accesspoints gewonnen und der Kommunikationsverkehr optimiert werden. Die Kopplung von OMNeT++ mit einem weiteren Simulator wird als wichtig erachtet, um industrielle Eigenschaften geeignet abzubilden. [95]

In einer weiteren Arbeit untersuchten SOLLFRANK et al., wie Kommunikationsnetzwerke simuliert werden können und welche Co-Simulationen mit OMNeT++, ns-3 und OPNET bereits existieren. Keiner dieser Co-Simulationen verwendete Informationen aus dem Kontext einer Produktion, sondern beschränkten sich häufig auf die genaue Betrachtung einzelner Protokolle bzw. Übertragungstechnologien oder auf einzelne Prozessschritte innerhalb einer Branche. Der Vorteil einer Informationsanreicherung von OMNeT++ für die Erzielung optimaler Ergebnisse wurde dabei von allen erforschten Co-Simulationen herausgearbeitet. [96]

Insgesamt zeigen alle vier vorgestellten Arbeiten, dass die Simulation von Kommunikationsnetzwerken im industriellen Kontext optimiert werden kann. Dies geschieht hierbei durch eine Kopplung verschiedener Simulationswerkzeuge, die entweder für die korrekte Initialisierung des Netzwerksimulators dienen oder durch einen kontinuierlichen Informationsaustausch diesen mit aktuellsten Informationen für optimale Ergebnisse versorgen.

2.6 Ableitung des Forschungsbedarfs unter Abgrenzung bestehender Forschungsansätze

Die steigende Komplexität bei der Planung von APA stellt Planende vor neuen Herausforderungen. Ein Grund dafür ist die Zunahme an Teilnehmern innerhalb des Kommunikationsnetzwerks. Gleichzeitig sollen konvergente Netzwerke zwischen IT und OT entstehen, um neuartige Applikationen in der Produktion zu etablieren. Eine Planung und Auslegung des Kommunikationsnetzwerks durch die Erfahrung des Planenden wird aufgrund steigender Komplexität zukünftig nicht mehr ausreichend sein. Aus diesem Grund soll zur Planung von Kommunikationsnetzwerken eine Simulation unterstützen und den Planenden entlasten. Dabei ergeben sich folgende Anforderungen um der steigenden Komplexität zu begegnen:

- Technologieunabhängige Simulation von komplexen und konvergenten industriellen Kommunikationsnetzwerken
- Nutzung von Kommunikationsanforderungen aus der Planungsphase einer APA
- Berücksichtigung der Flexibilität bei Zu- und Abschaltung von Applikationen während der Produktion

Bei der Bewertung bestehender Forschungsansätze zur Technologieunabhängigkeit bei der Simulation von komplexen und konvergenten industriellen Kommunikationsnetzwerken zeigt sich, dass CHEN et al. [93] zwar wichtige funkbasierte Technologien wie IEEE 802.15.4 abdeckt, jedoch weitere funkbasierte und kabelgebundene Technologien in der Simulation nicht berücksichtigt. DEDE et al. [94] beschreibt eine holistische Abbildung des Kommunikationsnetzwerks bei der Planung von Smart Grids im Mosaik-Framework, zeigt aber keine Konzepte zur Adaption an industrielle Kommunikationsnetzwerke. Ebenso beschreibt LIU et al. [95] die Simulation eines reinen funkbasierten WirelessHART-Protokolls in der Prozessindustrie, ohne die Möglichkeiten eine heterogenen Kommunikationstechnologie abzubilden. Auch SOLLFRANK et al. [96] bezieht sich nicht auf eine holistische industrielle Kommunikationssimulation, sondern beschränkt sich auf einzelne Kommunikationsprotokolle und Übertragungstechnologien.

CHEN et al. [93] und SOLLFRANK et al. [96] nutzen für die Simulation Informationen aus einer späteren Phase des Lebenszyklus. DEDE et al. [94] und LIU et al. [95] hingegen setzen bereits in der Planungsphase an und nutzen diese Informationen für eine aussagekräftige Simulation über das zu erwartende Kommunikationsverhalten der Teilnehmer. Die exakte Informationsbeschaffung und Modellierung wird dabei nicht beschrieben.

Sowohl CHEN et al. [93], SOLLFRANK et al. [96] als auch LIU et al. [95] nutzen keine Flexibilität zur Laufzeit der Simulation, um dynamische Prozesse von zukünftigen APA widerzuspiegeln. DEDE et al. [94] berücksichtigt im Sinne des Smart Grids eine Abbildung von dynamischen Produzenten und Prosumenten. Dies ermöglicht eine effiziente und ressourcenschonende Auslegung des Kommunikationsnetzwerks und der Komponenten.

Wie zuvor verglichen, existieren einige Lösungen für die Kommunikationssimulation in der Fertigungsautomatisierung. Jedoch können diese die genannten Anforderungen von zukünftigen industriellen Kommunikationsnetzwerken nicht hinreichend abbilden. Aufgrund fehlender Informationen bzgl. Hersteller und konkreter Implementierung der späteren Hardware der Kommunikationsteilnehmer ist eine Simulation auf Basis einer mathematischen Berechnung während der Planungsphase nicht zielführend. Vielmehr sollte hierbei auf eine ereignisdiskrete Kommunikationssimulation gesetzt werden, um die Applikationsanforderungen auf Paketebene zu überprüfen. Da vorhandene Simulationswerkzeuge nicht für die flexible Fertigungsautomatisierung ausgelegt sind, bedarf es hier einer Informationsanreicherung im Sinne einer Co-Simulation. Sinnvoll ist hier eine Kombination mit der Materialflusssimulation und Produktionsplanung, bei der Anforderungen von Maschine-zu-Maschine-Kommunikation entsprechend abgebildet werden. Mit Hilfe der Produktionsplanung lassen sich Informationen bzgl. flexibler Anpassung der Produktion in die Kommunikationssimulation einbinden. Des Weiteren wird für diese Art der Simulation eine strukturierte Analyse der Anforderungen heutiger und zukünftiger Industrie-4.0-Applikationen benötigt. Diese Informationen werden einerseits genutzt, um die passende Kommunikationstechnologie für die jeweilige Applikation auszuwählen und andererseits die Teilnehmer in der ereignisdiskreten Kommunikationssimulation mit den optimalen Werten hinsichtlich ihrer Anforderungen auszustatten. Zusätzlich wird in diesem Kontext auch eine entsprechende Informationsbeschreibung der Anforderungen von Kommunikationsteilnehmern benötigt. Auch ein generischer Datenaustausch sowie -format zwischen verschiedenen Simulationen soll dabei untersucht und erforscht werden, damit die Daten wiederverwendbar sind.

Zusammenfassend lassen sich die zuvor allgemein definierten Anforderungen zur Unterstützung der Planenden von Kommunikationsnetzwerken zukünftiger APA in drei Teilanforderungen definieren. Diese sind in Bild 18 ausgeführt und sollen in dieser Arbeit untersucht werden. A 1 soll dabei die nötigen Informationen zur Planung von Kommunikationsnetzwerken in der frühen Phase der Planung liefern. Wohingegen A 2 die Abbildung dieser Informationen beinhaltet, um diese anschließend in unterschiedlichen Simulationen und Engineering-Werkzeugen zu verwenden. Schlussendlich ist A 3 für die konkrete Kommunikationssimulation verantwortlich und spiegelt die Anforderungen für eine ressourceneffiziente Auslegung konvergenter Netzwerke wider.

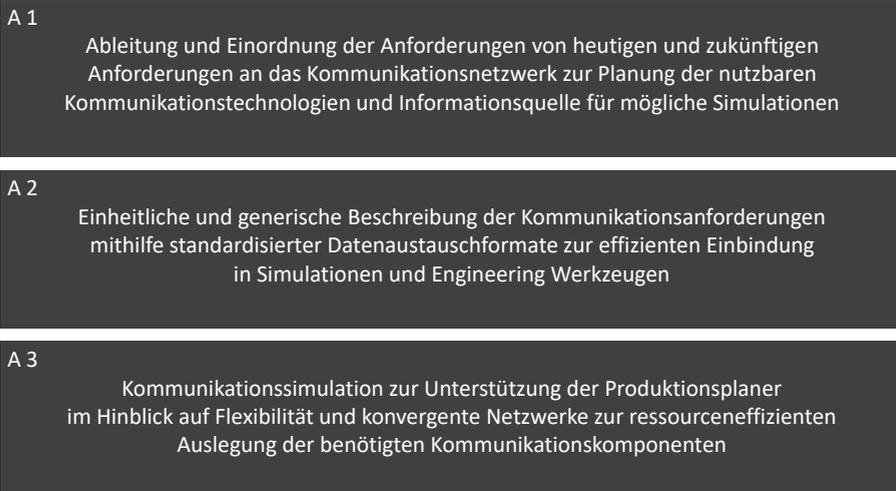


Bild 18: Drei Teilanforderungen zur Simulation von komplexen industriellen Kommunikationsnetzwerken in der Fertigungsautomatisierung

3 Analyse der Komplexität und Herausforderungen bei industriellen Kommunikationsnetzwerken

Durch die Digitalisierung und die Einführung von Industrie 4.0-Konzepten nimmt der Anteil an kommunikationsfähigen Teilnehmern innerhalb eines industriellen Kommunikationsnetzwerks stetig zu. Zugleich werden neue Kommunikationstechnologien und -protokolle entwickelt, um den steigenden Anforderungen zu begegnen. Dieses Kapitel untersucht anhand einer quantitativen Umfrage die Notwendigkeit der Simulation für die Validierung von geplanten industriellen Kommunikationsnetzwerken. Zudem wird die Einschätzung der Komplexität von Kommunikationsnetzwerken abgefragt und inwiefern Simulationssoftware in diesem Kontext bereits eingesetzt wird. Die Ergebnisse dieser Umfrage werden genutzt, um zusammen mit der bestehenden Literatur das resultierende Konzept dieser Arbeit zu motivieren.

Die in diesem Kapitel beschriebene Umfrage wurde von VUKOVIC et al. [P1] erstellt und veröffentlicht.

3.1 Bedarf und Motivation der Umfrage

Sowohl die Planenden als auch die Inbetriebnehmenden industrieller Kommunikationsnetzwerke werden täglich mit den unterschiedlichsten Herausforderungen konfrontiert. Ihre Expertise, Erfahrungen und Meinungen sind deshalb besonders gefragt, wenn es um das Verständnis der Komplexität und den Herausforderungen industrieller Kommunikationsnetzwerke geht. Folgende Umfrage soll diese Informationen abfragen und daraus resultierend Handlungsempfehlungen aussprechen. Die Umfrage adressiert dabei die folgenden Fragestellungen:

- Wie ist die empfundene Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke?
- Sind persönliche Erfahrungen mit industriellen Kommunikationsnetzwerken vorhanden?
- Wie ist die Verbreitung von Simulationssoftware bei der Planung industrieller Kommunikationsnetzwerke?

Anhand der gewonnenen Informationen soll anschließend in Kombination mit bereits vorhanden Simulationsansätzen ein Konzept bzw. eine Methode entwickelt werden, wie die heutigen und zukünftigen Herausforderungen der Planenden und Inbetriebnehmenden bewältigt werden können. Für die

Qualität der Umfrageergebnisse ist die Auswahl der geeigneten Zielgruppe entscheidend. Dazu gehören Experten von industriellen Kommunikationsnetzwerken in APA.

3.2 Umfragedesign, Fragestellung und Verteilung

Die Umfrage wird mithilfe einer quantitativen Befragung durchgeführt, damit aus den Ergebnissen der Umfrage allgemeingültige Aussagen bezüglich industrieller Kommunikationsnetzwerke getroffen werden können. Dazu ist nicht nur die aktuelle Erfahrung der Umfrageteilnehmenden entscheidend, sondern auch ihre Erwartungen bezüglich der Veränderungen in den kommenden Jahren von Bedeutung. Dadurch lässt sich anschließend ein Trend ableiten, um gezielte Maßnahmen einzuleiten. Die Umfrage soll neben den zuvor genannten Hauptfragestellungen auch Informationen zu den Teilnehmenden selbst gewinnen, damit die Ergebnisse in Zusammenhang mit der jeweiligen Unternehmensgröße gesetzt werden können.

Insgesamt enthält die Umfrage 18 Fragen, wovon die letzten drei Fragen das Unternehmen der Teilnehmenden und ihre Person betreffen. Als Hauptantwortmöglichkeit werden neben der fünfstufigen Likert-Skala auch ungerade Antwortmöglichkeiten genutzt, um den Teilnehmenden die Entscheidung zu ermöglichen, sich neutral zu positionieren. Gerade Antwortmöglichkeiten werden in dieser Umfrage immer dann verwendet, wenn sich der Teilnehmenden bewusst für eine Antwortmöglichkeit bzw. -tendenz entscheiden soll.

Zunächst sollen die Teilnehmenden Fragen bezüglich der Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke und ihrer Planung beantworten. Die Komplexität von Kommunikationsnetzwerken lässt sich mithilfe folgender Punkte einordnen:

- Anzahl der vorhandenen kommunikationsfähigen Endgeräte
- Anzahl an Schnittstellen bei Übertragungen
- Anzahl unterschiedlicher Protokolle
- Verwendung verschiedener Kommunikationstechnologien in einem Netzwerk

Anhand dieser Aufzählung kann der Teilnehmende subjektiv entscheiden, ob seine Anlage komplex ist. Die Antwortmöglichkeiten reichen von 1 nicht komplex bis 5 sehr komplex:

1. Wie schätzen Sie die Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke ein?

2. Wie komplex ist aktuell die Planung eines industriellen Kommunikationsnetzwerks?

Zudem ist auch ihre Meinung zur Entwicklung in den nächsten fünf Jahren gefragt. Hierbei erstrecken sich die Antwortmöglichkeiten von *Weniger komplex* zu *Gleichbleibend* bis *Komplexer*:

3. Wie schätzen Sie die Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke in 5 Jahren im Vergleich zu heute ein?
4. Wie komplex wird die Planung eines industriellen Kommunikationsnetzwerks Ihrer Meinung nach in 5 Jahren im Vergleich zu heute sein?

Neben den Fragen bezüglich der persönlichen Meinung und ihren Einschätzungen sollen weitere Fragen Aufschluss über ihre persönliche Erfahrungen mit industriellen Kommunikationsnetzwerken geben. Folgende Fragen können von 1 nie und nicht wichtig (abhängig von der Fragestellung) bis 5 immer und sehr wichtig (abhängig von der Fragestellung) beantwortet werden:

5. Wie oft haben sich bereits persönlich mit der Planung, Auslegung oder Inbetriebnahme von industriellen Kommunikationsnetzwerken beschäftigt?
6. Sind bei Ihnen bereits Komplikationen innerhalb des Kommunikationsnetzwerks (Netzwerküberlastung o. Ä.) bei der Inbetriebnahme oder im laufenden Betrieb von Anlagen aufgetreten?
7. Wie wichtig ist Ihrer Meinung nach der Einsatz von Simulationssoftware zur Planung, Simulation oder Validierung von industriellen Kommunikationsnetzwerken?

Anhand der Erfahrungen der Teilnehmenden im Kontext industrieller Kommunikationsnetzwerke soll zudem der Trend in den nächsten fünf Jahren von *Weniger wichtig* über *Gleichbleibend* bis hin zu *Wichtiger* abgefragt werden:

8. Wie wichtig ist Ihrer Meinung nach der Einsatz von Simulationssoftware zur Planung, Simulation oder Validierung von industriellen Kommunikationsnetzwerken in 5 Jahren im Vergleich zu heute?

Nach Abfrage der persönlichen Erfahrung der Teilnehmenden, sollen die Vorteile von Simulationssoftware anhand einer Mehrfachnennung evaluiert werden. Mögliche Antwortmöglichkeiten sind hierbei *Verkürzung der Inbetriebnahmezeit*, *Kostenersparnis*, *optimale Ressourcennutzung*, *Stabilität / Ausfallsicherheit*, *Performance*, *Planungsunterstützung* und *keine Vorteile*:

9. In welchen Bereichen sehen Sie das größte Potenzial beim Einsatz von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationsnetzwerke?

Die nachfolgenden Fragen sollen klären, ob die Teilnehmenden bereits Erfahrungen mit Simulationssoftware gesammelt haben oder zukünftig planen, diese einzusetzen. Die Antwortmöglichkeiten setzen sich hier aus einem *Ja* und *Nein* zusammen. Je nachdem, ob die erste Frage mit einem *Ja* beantwortet wird, wird die nächste Frage über die zukünftige Nutzung von Simulationssoftware übersprungen:

10. Setzen Sie bereits Simulationssoftware zur Planung, Simulation oder Validierung von Kommunikationsnetzwerken ein?
11. Planen Sie in Zukunft Simulationssoftware zur Planung und Simulation von Kommunikationsnetzwerken einzusetzen?

Ein entscheidender Faktor bei der Umfrage soll zudem die Einordnung in den Lebenszyklus einer APA sein, während welcher Phase die Simulationssoftware bestmöglich unterstützen kann. Dabei stehen die bekannten fünf Lebenszyklusphasen *Planung und Design*, *Engineering*, *Inbetriebnahme*, *Betrieb* und *Service* als Mehrfachnennung zur Verfügung. Da Simulationssoftware in mehreren Lebenszyklusphasen eingesetzt werden kann, sind Überschneidungen möglich:

12. In welcher Phase des Lebenszyklus einer Anlage soll die Simulationssoftware optimalerweise unterstützen?

Die bisher aufgeführten Fragen zielten hauptsächlich auf industrielle Kommunikationsnetzwerke ab. Es zeigt sich der Trend, dass zukünftig APA in ihrer Flexibilität zunehmen werden und dies eventuell Auswirkungen auf die zugehörigen Kommunikationsnetzwerke haben kann. Um diese Erkenntnisse zu gewinnen, sollen die nächsten drei Fragen die bisherigen Erfahrungen mit flexiblen APA und deren Kommunikationsnetzwerke abfragen. Die erste Frage kann mit *Ja* oder *Nein* beantwortet werden. Dabei wird die zweite und dritte Frage übersprungen, wenn der Teilnehmende noch keine Erfahrungen mit flexiblen APA gesammelt hat. Ansonsten stehen Antwortmöglichkeiten von 1 nie bzw. sehr schlecht (abhängig von Fragestellung) bis 5 immer bzw. sehr gut (abhängig von Fragestellung) zur Verfügung:

13. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Kommunikationsnetzwerken einer flexiblen APA gesammelt?
14. Wie häufig haben Sie flexible APA bereits geplant?
15. Wie waren Ihre Erfahrungen bezüglich Planung und Betrieb des Kommunikationsnetzes einer flexiblen APA?

Nach 15 Fragen zu industriellen Kommunikationsnetzwerken, deren Komplexität und Erfahrung beim Einsatz in flexiblen APA sollen noch drei optionale Fragen Auskunft über die Betriebe, in denen die Teilnehmenden arbeiten,

geben. Dabei sind die Betriebe in sechs Kategorien unterteilt von *Weniger als 50 MitarbeiterInnen*, *50 bis 500 MitarbeiterInnen*, *501 bis 1000 MitarbeiterInnen*, *1001 bis 10.000 MitarbeiterInnen*, *10.001 bis 100.000 MitarbeiterInnen* bis zu *Mehr als 100.000 MitarbeiterInnen*. Zusätzlich soll der Teilnehmende beantworten, ob sein Betrieb Teil eines Konzerns (*Ja oder Nein*), damit die Mitarbeitendenanzahl in den entsprechenden Kontext gebracht werden kann. Darüber könnten sich Korrelationen zwischen Betriebsgröße und Affinität zum Einsatz von Simulationssoftware finden lassen. Eine weitere interessante Information ist das Geschlecht (*Männlich, Weiblich, Divers*) des Teilnehmenden, um ein Bild über die Geschlechterverteilung im Arbeitsumfeld von industriellen Kommunikationsnetzwerken und flexiblen APA zu erhalten:

16. Betriebsgröße
17. Ist Ihr Betrieb Teil eines Konzerns?
18. Ihr Geschlecht

Die Umfrage wird mithilfe des Onlineumfragetools *Google Formulare* erstellt und die zugehörigen Fragen, Pflicht- und Optionalantwortmöglichkeiten sowie Einleitungstext eingepflegt. Der zugehörige Link, über dem die Umfrage zugänglich ist, wird über verschiedene Distributionskanäle verteilt. Entsprechend werden Kontakte auf *LinkedIn* angeschrieben und die Umfrage in Expertengruppen verteilt. Die ausgewählten Kontakte sind dabei Personen, welche im Bereich der Fertigungsautomatisierung und industrielle Kommunikationstechnik tätig sind. Ebenso wird auch der direkte E-Mail- bzw. Telefonkontakt zu den Experten hergestellt, um auf die Umfrage aufmerksam zu machen. Dies ermöglicht eine hohe Rückmeldequote für eine darauffolgende Auswertung der Ergebnisse. Der Beantwortungszeitraum wird auf 20. September 2019 bis 25. Oktober 2019 festgelegt und anschließend die Umfrage geschlossen.

3.3 Datenauswertung der Umfrage

An der Umfrage haben vom 20. September bis zum 25. Oktober 2019 insgesamt 48 Teilnehmende partizipiert. In Bild 19 ist ersichtlich, dass die Zunahme der Teilnehmenden einem nahezu linearen Verlauf entlang des Befragungszeitraums entspricht. Unter den Teilnehmenden befinden sich 44 männliche Teilnehmer und drei weibliche Teilnehmerinnen, wobei eine Person das Geschlecht nicht angegeben hat. Insgesamt haben somit 47 Teilnehmende die Frage bzgl. ihres Geschlechts beantwortet.

Zunächst sind die Teilnehmenden gefragt worden, wie sie die Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke einschätzen und wie sich die Entwicklung in fünf Jahren, im Vergleich zu heute verhält. Im Bild 20 ist das

3 Analyse der Komplexität und Herausforderungen bei industriellen Kommunikationsnetzwerken

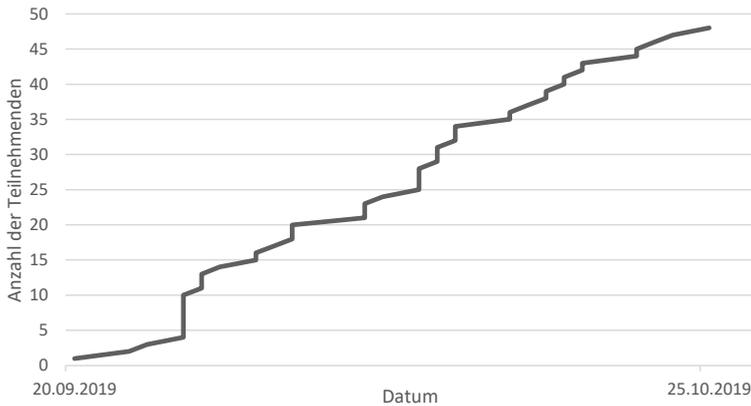


Bild 19: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Teilnehmenden an der Umfrage seit Start am 20.09.2019 bis zum Ende am 25.10.2019

Ergebnis von den 48 Teilnehmenden in der Gegenüberstellung zu sehen. Auf der linken Hälfte des Bildes ist zu erkennen, dass die meisten Teilnehmenden heutige industrielle Kommunikationsnetzwerke als relativ komplex, wobei keiner der Teilnehmenden heutige industrielle Kommunikationsnetzwerke als nicht komplex einschätzt.

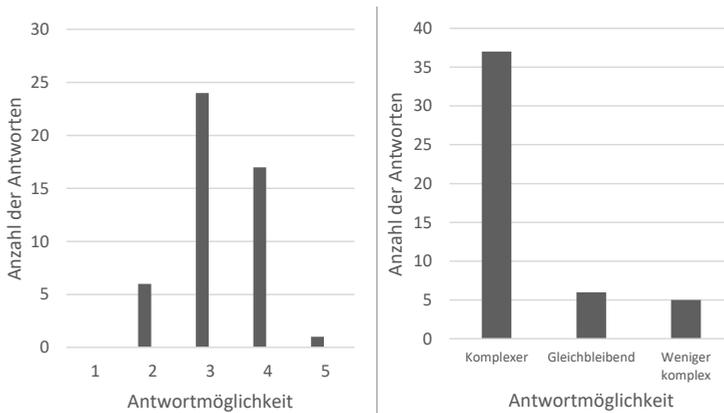


Bild 20: Links Heutige (1 nicht komplex - 5 sehr komplex) und rechts zukünftige Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke

Bei der rechten Seite des Bildes schätzen eine Mehrheit der Teilnehmenden ein, dass die Entwicklung der Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke in fünf Jahren stark zunehmen wird und nur eine geringe Anzahl den Trend als gleichbleibend bzw. weniger komplex einschätzt. Zusammenfassend lässt sich anhand der Umfrage erkennen, dass die Mehrheit der Teilnehmenden industrielle Kommunikationsnetzwerke als relative komplex

einschätzen und sich dieser Trend in der Zukunft in Richtung zunehmender Komplexität entwickeln wird.

Zudem wurde gefragt, inwiefern die Teilnehmenden bereits persönlich mit der Planung, Auslegung oder Inbetriebnahme von industriellen Kommunikationsnetzwerken beschäftigt waren. Wie in Bild 21 zu sehen ist, hatte keiner der Teilnehmenden noch nie Berührungspunkte mit industriellen Kommunikationsnetzwerken.

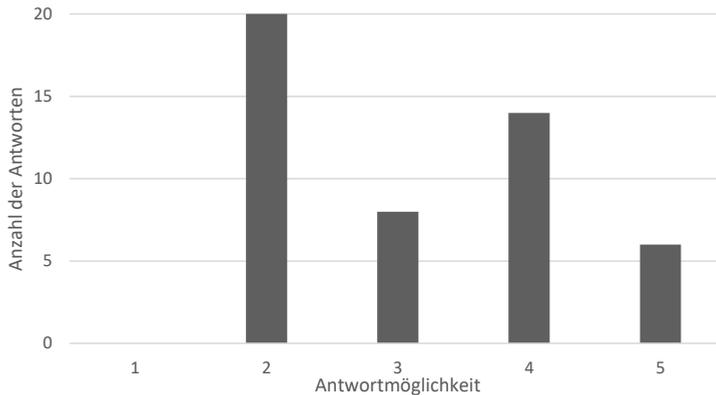


Bild 21: Häufigkeit der persönlichen Auseinandersetzung mit der Planung, Auslegung oder Inbetriebnahme von industriellen Kommunikationsnetzwerken (1 nie - 5 ständig)

Die nächste Frage bezieht sich auf die Einschätzung der aktuellen Komplexität bei der Planung industrieller Kommunikationsnetzwerke und der zugehörigen Entwicklung in den nächsten fünf Jahren. Wie in Bild 22 auf der linken Seite zu sehen ist, schätzen die meisten Teilnehmenden die Komplexität bei der Planung von industriellen Kommunikationsnetzwerken als hoch ein, wobei keiner die Planung als nicht komplex ansieht. Gleichzeitig zeigt sich erneut der Trend, wie auf der rechten Seite von Bild 22 zu sehen ist, dass für die meisten Umfrageteilnehmenden die Komplexität bei der Planung zunehmen wird.

Des Weiteren haben die meisten Teilnehmenden regelmäßig Komplikationen bereits bei der Inbetriebnahme oder im laufenden Betrieb von Kommunikationsnetzwerken. 16 Teilnehmende haben als Antwortmöglichkeit 2 gewählt und jeweils 15 Teilnehmende 3 und 4. Das spiegelt die Einschätzung der Komplexität von Kommunikationsnetzwerken bei der Teilnehmenden wieder. So ist nur bei einer sehr geringen Anzahl (zwei) der Teilnehmenden noch nie eine Komplikation innerhalb des Kommunikationsnetzwerks eingetreten.

Da die Umfrage auch den Einsatz von Simulationssoftware und ihren potentiellen Nutzen zur Komplexitätsreduktion innerhalb industrieller Kommu-

3 Analyse der Komplexität und Herausforderungen bei industriellen Kommunikationsnetzwerken

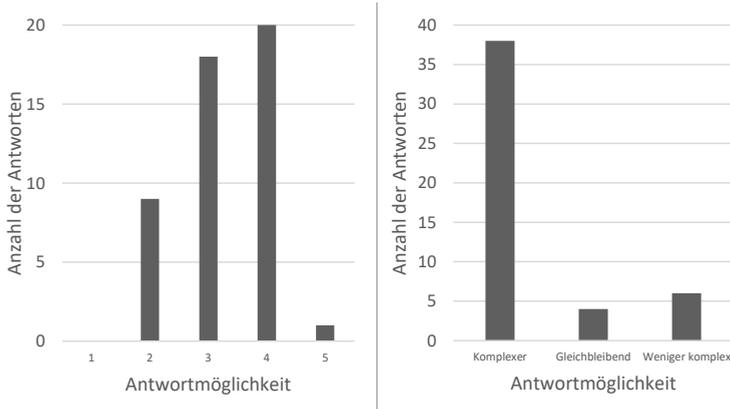


Bild 22: Links heutige (1 nicht komplex - 5 sehr komplex) und rechts zukünftige Komplexität der Planung industrieller Kommunikationsnetzwerke

nikationsnetzwerken untersuchen soll, sind die Teilnehmenden nach ihrer Meinung bzgl. des Einsatzes von Simulationssoftware zur Planung, Simulation oder Validierung von industriellen Kommunikationsnetzwerken gefragt worden. Wie in Bild 23 auf der linken Seite ersichtlich ist, sieht jeder der Teilnehmenden den Einsatz von Simulationssoftware als wichtig an, keiner sieht es als unwichtig an. Gleichzeitig beantworteten die Teilnehmenden auch die Frage, wie sie die Entwicklung in den nächsten fünf Jahren einschätzen. Auf der rechten Seite in Bild 23 ist eine Mehrheit der Meinung, dass Simulationssoftware immer wichtiger werden wird. Eine geringe Anzahl empfindet Simulationssoftware in den nächsten fünf Jahren als weniger wichtig.

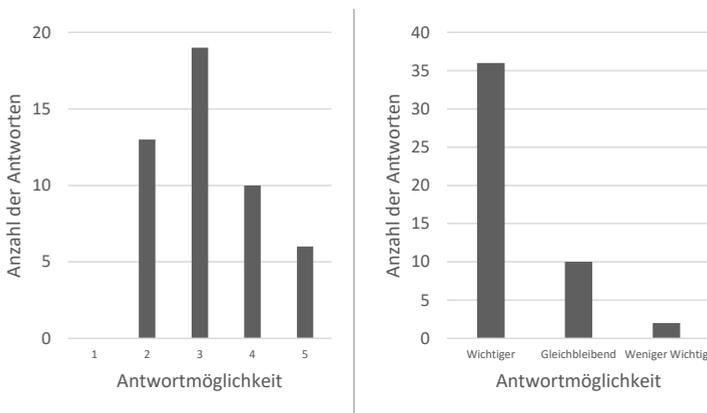


Bild 23: Links heutige (1 nicht wichtig - 5 sehr wichtig) und rechts zukünftige Wichtigkeit von Simulationssoftware für die Planung industrieller Kommunikationsnetzwerke

Zusätzlich sollten die Teilnehmenden das größtmögliche Potenzial beim Einsatz von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationsnetzwerken einschätzen. Dabei sehen bei der Mehrfachnennung in Tabelle 6 die meisten das Potenzial bei der Verkürzung der Inbetriebnahmezeit, Kostenersparnis und bei der optimalen Ressourcenausnutzung. Keiner beantwortet die Frage, dass er keinen Mehrwert durch den Einsatz von Simulationssoftware sieht, mit ja. Eine Nennung weiterer Vorteile war dabei nicht möglich.

Tabelle 6: In welchen Bereichen sehen Sie das größte Potenzial beim Einsatz von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationsnetzwerke? (Mehrfachnennung möglich)

Auswahl	Anzahl Ja	Verteilung Ja
Verkürzung der Inbetriebnahmezeit	35	72.92%
Kostenersparnis	35	72.92%
Optimalen Ressourcenausnutzung	35	72.92%
Stabilität / Ausfallsicherheit	26	54.17%
Performance	19	39.58%
Planungsunterstützung	17	35.42%
Keinen Vorteil	0	0.00%

Anschließend ist von den Teilnehmenden abgefragt worden, ob sie Simulationssoftware für die Planung oder Validierung von Kommunikationsnetzwerken einsetzen bzw. planen es in der Zukunft einzusetzen. Wie in Bild 24 auf der linken Seite zu sehen ist, setzt aktuell eine Minderheit der Personen Simulationssoftware für Kommunikationsnetzwerke unterstützend in ihren Prozessen ein. Die rechte Seite des Bildes zeigt die Personen, die aktuell noch keine Simulationssoftware einsetzen, dass eine Mehrheit diese in Zukunft plant einzusetzen.

Während der Betrachtung des Lebenszyklus einer APA kann eine Simulationssoftware in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus unterstützen. Die Tabelle 7 zeigt, in welcher Phase des Lebenszyklus einer APA sich die Teilnehmenden optimalerweise die Simulationssoftware unterstützend einsetzen wollen.

Die Mehrheit sieht die bestmögliche Unterstützung einer Simulationssoftware in einer sehr frühen Phase (Planung und Design bzw. Engineering) des Lebenszyklus. Gleichzeitig ist jedoch auch der Einsatz während der Inbetriebnahme und des Betriebs wünschenswert. Im Service dagegen sieht die Minderheit der Teilnehmenden eine optimale Unterstützung der Simulationssoftware.

3 Analyse der Komplexität und Herausforderungen bei industriellen Kommunikationsnetzwerken

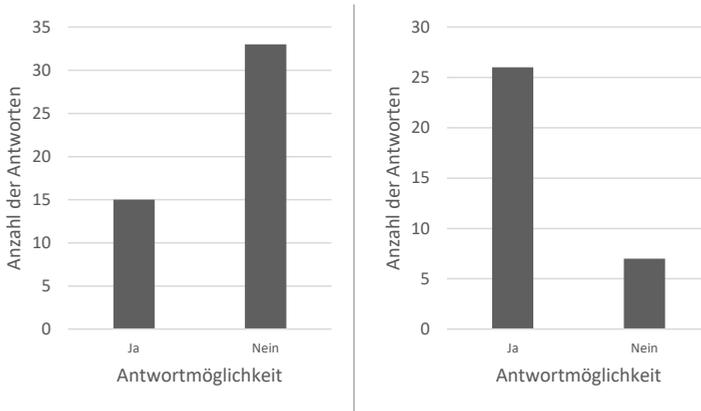


Bild 24: Links heutiger und rechts zukünftiger persönlicher Einsatz von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationssysteme

Tabelle 7: In welcher Phase des Lebenszyklus einer Anlage soll die Simulationssoftware optimalerweise unterstützen? (Mehrfachnennung möglich)

Lebenszyklusphase	Anzahl Ja	Verteilung Ja
Engineering	38	92.68%
Planung & Design	38	92.68%
Inbetriebnahme	24	58.54%
Betrieb	8	19.51%
Service	5	12.20%

Bei der Frage wie viele Teilnehmenden bereits Erfahrungen mit Kommunikationsnetzwerken flexibler APA gesammelt haben zeigt sich, dass 16 von 48 Teilnehmenden Erfahrungen mit flexiblen APA gesammelt haben.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse aus der Umfrage ableiten:

- Der Großteil der Teilnehmenden ist männlich und arbeitet in einem Betrieb mit mehr als 500 Mitarbeitenden.
- Die Komplexität von industriellen Kommunikationsnetzwerken wird im Durchschnitt als hoch empfunden und wird in den nächsten fünf Jahren komplexer.
- Die Planung eines industriellen Kommunikationsnetzwerkes ist ebenfalls komplex und wird in den nächsten Jahren komplexer.
- Es treten fast immer Komplikationen innerhalb industrieller Kommunikationsnetzwerke auf.

- Die Wichtigkeit beim Einsatz von Simulationssoftware wird für industrielle Kommunikationsnetzwerke als hoch angesehen und in den nächsten fünf Jahren noch wichtiger.
- Das größtmögliche Potenzial ist bei der Verkürzung der Inbetriebnahmezeit, Kostenersparnis und optimale Ressourcenausnutzung vorhanden.
- Simulationssoftware im Umfeld von Kommunikationsnetzwerken wird noch nicht so häufig eingesetzt, wobei der Trend dies voraussichtlich verändern wird.
- Optimalerweise sollte die Simulationssoftware in den frühen Phasen der Planung und des Designs bzw. des Engineerings unterstützen.
- Flexible APA werden noch nicht flächendeckend eingesetzt bzw. geplant.

3.4 Bewertung der Umfrageergebnisse und Ableitung der Handlungsbedarfe

Anhand der Umfrageergebnisse soll in diesem Kapitel eine Bewertung dieser Daten durchgeführt und mögliche Erläuterungen festgestellt werden. Dazu wird zunächst eine Erklärung für die steigende Komplexität in industriellen Kommunikationsnetzwerken bemüht, um anschließend den Einsatz von Simulationssoftware in Zusammenhang mit Kommunikationsnetzwerken zu erläutern.

3.4.1 Erklärungen der hohen und steigenden Komplexität von industriellen Kommunikationsnetzwerken

Wie bereits im vorherigen Abschnitt festgestellt wurde, empfindet die Mehrheit der Umfrageteilnehmenden, dass die Komplexität von industriellen Kommunikationsnetzwerken insgesamt hoch ist und in Zukunft zudem steigen wird. Es ist zu beobachten, dass in modernen Produktionen, die dem Industrie 4.0-Paradigma folgen und die Anzahl der kommunikationsfähigen Geräte stetig steigt [55]. Einer der Hauptgründe hierfür ist die zunehmende Informationssammlung von Maschinenzuständen zur optimalen Aussteuerung der Produktionsabläufe. Gleichzeitig bedeutet dies steigende Anforderungen bezüglich des zugrundeliegenden Kommunikationsnetzwerks. So wird für jeden zusätzlichen Teilnehmer innerhalb der Kommunikationsnetzwerke eine höhere Bandbreite benötigt. Bei Ethernetnetzwerken führt eine zunehmende Teilnehmeranzahl zur steigenden Auslastung der Netzwerkkomponenten und spätere Ankunftszeit der Datenpakete [97]. Neben der steigenden Anzahl an Kommunikationsteilnehmern ist auch eine Veränderung der eingesetzten industriellen Applikationen zu erkennen. Der Einsatz von z.B. Remote Maintenance, Augmented oder Virtual Reality haben erhöh-

te Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk [2]. Zudem weisen sie dynamische Netzwerkauslastungen auf, da ihr Einsatz sporadisch oder nicht planbar stattfindet. Ein weiterer Grund für die steigende Komplexität industrieller Kommunikationsnetzwerke ergibt sich durch die zunehmende Flexibilisierung von APA. Zwar ist Flexibilisierung einer der wichtigsten Merkmale, um auf ändernde Marktanforderungen und Kundenbedürfnisse zu reagieren, jedoch steigt durch die Ungewissheit zukünftiger Teilnehmer die Komplexität der Kommunikationsnetzwerke [98]. Dynamische Abläufe durch die Zu- und Abschaltung einzelner Maschinen in einer flexiblen Produktion erschweren es zudem, das Kommunikationsnetzwerke in seiner Gesamtheit zu planen. Doch auch die Kommunikationsnetzwerke als solche werden zunehmend komplexer. Die gleichzeitige Nutzung verschiedener Kommunikationsprotokolle und die Koexistenz verschiedener Kommunikationstechnologien [99] bewirken eine steigende Komplexität im gesamten Netzwerk. Zudem treten aufgrund der Existenz von unerwarteten Kommunikationsteilnehmern, zum Beispiel durch Smartphones von Besuchenden oder Mitarbeitenden der Produktion, häufig Interferenzen und Störungen insbesondere in funkbasierten Kommunikationstechnologien auf. Diesen Problemen zu begegnen erweist sich aufgrund des Technolgiegedesigns bei WLAN oftmals als schwierig bzw. nicht möglich [100]. Dies führt im schlimmsten Fall zu Produktionsausfällen oder zum Stillstand, falls essentielle Produktionsdaten deshalb nicht rechtzeitig verarbeitet werden.

3.4.2 Erklärungen des Einsatzes von Simulationssoftware bei industriellen Kommunikationsnetzwerken

Bei den Fragen bezüglich des Einsatzes von Simulationssoftware für industrielle Kommunikationsnetzwerke empfanden die Teilnehmenden diese als nützlich und befürworteten diesen. So bringt der Einsatz von Simulationssoftware verschiedene wichtige Vorteile während der Produktionsplanung. Ähnlich wie beim Einsatz von virtueller Inbetriebnahme von Maschinen, erhoffen sich die Teilnehmenden eine Kostenreduktion, kürzere Inbetriebnahmezeit und optimale Ressourcenausnutzung. Diese Vorteile ermöglichen es, am Markt wettbewerbsfähig zu bleiben und gleichzeitig die Markteinführungszeit zu verkürzen [101]. Der Einsatz von Simulationssoftware wird zudem in einer frühen Phase des Lebenszyklus der APA von den Teilnehmenden erwartet. Hierzu lassen sich unter anderem die Kosten von Fehlern während des Lebenszyklus anführen.

Die Zehnerregel, dass die Kosten für die Behebung des Fehlers um den Faktor zehn pro verstrichenen Lebenszyklus steigt [13]. Daher ist die frühzeitige Fehlerdetektion und -behebung von großer Bedeutung. Zudem führt die

Fehlerentdeckung und -behebung zu einer Reduktion der Markteinführungszeit [13]. Änderungen in fertig geplante Kommunikationsnetzwerke sind zudem einfacher in der Planungsphase durchzuführen. Eine Änderung in späteren Phasen des Lebenszyklus kann Auswirkungen auf weitere Teile der APA haben. So hängt die Planung von Kommunikationskomponenten auch von der Stromversorgung und Erreichbarkeit durch Netzwerkleitungen bzw. Signalstärken der Funkeinheiten ab. Die Änderungen würden somit nicht nur das Kommunikationsnetzwerk betreffen sondern auch überordnete Planungen zur Energieversorgung und des Hardwareaufbaus. Aus diesen genannten Gründen verwendet eine Mehrheit der Umfrageteilnehmenden bereits Simulationssoftware in ihren APA oder planen, dies zukünftig umzusetzen.

4 Konzept

In diesem Kapitel werden die Anforderungen, welche sich aus der Literatur in Bild 18 ergeben, mithilfe der Umfrageergebnisse geschärft und in ein Konzept überführt. Anschließend wird das daraus resultierende Co-Simulationsframework PLANET vorgestellt und die Anforderungen daran gespiegelt.

4.1 Zusammenführung der Anforderungen aus Literatur und der Umfrageergebnisse

Zusammenfassend lassen sich einige Handlungsbedarfe aufgrund der Umfrageergebnisse ableiten. So existiert bei den Teilnehmenden die Erwartung, Simulationssoftware möglichst früh im Lebenszyklus der APA einzusetzen, um eine optimale Unterstützung ihrer Planung zu erzielen. Zusätzlich kann Simulationssoftware ihren Beitrag zur Komplexitätsreduktion in industriellen Kommunikationsnetzwerken leisten.

Wie bereits bei der Analyse bestehender Forschungsansätze (2.5) und Ableitung der Handlungsbedarfe aus der Literatur (2.6) beschrieben, werden vorhandene Kommunikationssimulatoren mithilfe einer Co-Simulation erweitert. Dies führt dazu, dass ereignisdiskrete Simulatoren mit spezifischen Informationen angereichert werden und dadurch industriell nutzbar sind. Eine mathematische Betrachtung des Kommunikationsaufkommens ist nach der Umfrage mit den Teilnehmenden für diese Arbeit nicht zielführend, da in der frühen Phase des Lebenszyklus einer APA notwendige Informationen für eine mathematische Worst-Case-Betrachtung nicht vorhanden sind.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass ein neues Simulationsframework notwendig ist, um die Anforderungen aus Literatur und der Umfrageteilnehmenden zu erfüllen, da bisherige Lösungen dies nicht hinreichend beherrschen. Dieses Simulationsframework soll Informationen aus der Planungs- und Designphase im Lebenszyklus von APA verarbeiten können und zudem technologieunabhängig funktionieren. Außerdem soll das Simulationsframework flexible und dynamische Prozesse während der Produktion abbilden, damit eine Über- bzw. Unterdimensionierung des Kommunikationsnetzwerks verhindert wird und dadurch eine optimale Ressourcenausnutzung stattfindet. Es soll den Planenden von Kommunikationsnetzwerken eine Hilfestellung bei der Validierung und Unterstützung während ihrer Planung sein, um rechtzeitig notwendige Korrekturen ausführen zu können. Daraus ergibt sich

eine Kosteneinsparung und Reduktion von Spätfolgen durch Vermeidung frühzeitiger Fehler.

Mithilfe der Umfrageergebnisse können abgeleitete Anforderungen aus Literatur und bestehenden Forschungsvorhaben weiter geschärft werden. Diese ergeben die kombinierten Anforderungen in Bild 25.

A 1 Ableitung und Einordnung der Anforderungen von heutigen und zukünftigen Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk zur Planung der nutzbaren Kommunikationstechnologien und Informationsquelle für mögliche Simulationen	A 1.1	Applikationsübersicht
	A 1.2	Kommunikationstechnologie-Portfolio
A 2 Einheitliche und generische Beschreibung der Kommunikationsanforderungen mithilfe standardisierter Datenaustauschformate zur effizienten Einbindung in Simulationen und Engineering Werkzeugen	A 2.1	Erweiterung der Verwaltungsschale
	A 2.2	Austauschformat für Kommunikationsanforderungen
A 3 Kommunikationssimulation zur Unterstützung der Produktionsplaner im Hinblick auf Flexibilität und konvergente Netzwerke zur ressourceneffizienten Auslegung der benötigten Kommunikationskomponenten	A 3.1	Technologieunabhängige Co-Simulation
	A 3.2	Visuelle Darstellung der Kommunikationsanforderungen

Bild 25: Kombinierte Anforderungen aus Literatur und Umfrageergebnisse

Anforderung A1.1 soll dabei eine Übersicht bereits vorhandener und zukünftiger Applikationen im Bereich der Fertigungsautomatisierung beinhalten. A1.2 stellt ein Portfolio zur Auswahl der Kommunikationstechnologie auf Basis von relevanten Dienstgüteparameter von Applikationen. In Anforderung A2.1 soll die Spezifizierung und Erweiterung der Verwaltungsschale hinsichtlich Kommunikationsanforderungen in der Simulation als Teilmodell beinhalten, wohingegen A2.2 eine Definition eines einheitlichen Austauschformats zur Informationsübertragung dieser Kommunikationsanforderungen zwischen verschiedenen Werkzeugen repräsentiert. Anforderung A3.1 soll eine technologieunabhängige Co-Simulation des Kommunikationsverkehrs in der Fertigungsautomatisierung abbilden und A3.2 die Planenden bei der Validierung des Kommunikationsnetzwerks mittels visueller Darstellung der Kommunikationsanforderungen unterstützen.

4.2 Co-Simulationsframework PLANET

Anhand der zuvor abgeleiteten Anforderungen werden nun die zur Erfüllung notwendigen Forschungsschritte abgeleitet. In Bild 26 ist das Gesamt-

bild des Frameworks PLANET (Produktions**PLAN**ungs- und Kommunikati-
ons**NET**zwerksimulation) zu sehen. Ziel ist es, eine Simulation von komplexen Kommunikationsnetzwerken in der Fertigungsautomatisierung zu erforschen. Hierzu sind verschiedene Zwischenschritte nötig. Zunächst soll eine strukturierte Analyse heutiger und zukünftiger IT- und OT-Applikationen durchgeführt werden, auf Basis derer ein neues Portfolio zur Auswahl der Kommunikationstechnologie erstellt werden kann. Mithilfe dieses Portfolios lassen sich qualitative Aussagen über Dienstgüteparameter einzelner Applikationen treffen und mit welcher Technologie diese umgesetzt werden können. Diese Analyse soll anschließend als Grundlage für eine systematische Erweiterung der Verwaltungsschale von RAMI 4.0 dienen. Durch die Konzeption eines neuen Teilmodells wird hier ein zusätzlicher Beitrag für eine mögliche Standardisierung geschaffen und dadurch zukünftige Simulationen im Bereich der Kommunikation auf Basis dieser neu geschaffenen Datengrundlage ermöglicht. Auch die Weitergabe der Informationen in der Verwaltungsschale wird in diesem Kontext untersucht.

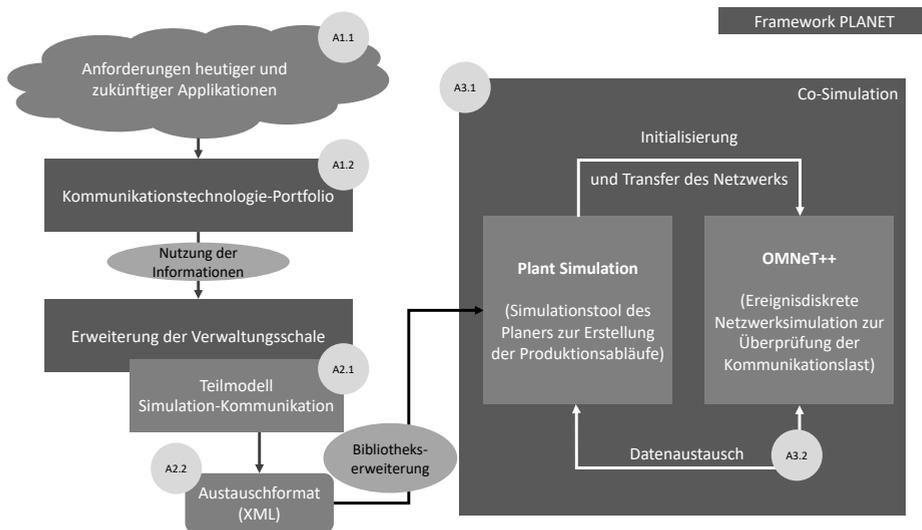


Bild 26: Framework PLANET zur Erfüllung der kombinierten Anforderungen

Dabei soll das Austauschformat Extensible Markup Language (XML) dazu genutzt werden, um die Daten als Eingabe für die Co-Simulation zu nutzen und die Kommunikationsteilnehmer zu initialisieren. Die Co-Simulation soll dabei auch Umfrageergebnisse aus Kapitel 3 berücksichtigen und die Validierung bereits in der Planungsphase ermöglichen. In diesem Zusammenhang dient Plant Simulation als Simulationstool zur Erstellung der Produktionsabläufe und nutzt eine neue Bibliothek zur Platzierung der Kommunikations-

teilnehmer in der Produktion. Daten wie Position, Applikation und Typ des Kommunikationsteilnehmers werden anschließend genutzt, um eine Initialisierung des Simulationsnetzwerks in OMNeT++ durchzuführen. OMNeT++ wird dabei die Kommunikationssimulation der Teilnehmer durchführen und einen Datenaustausch in definierten Zeitabständen mit Plant Simulation gewährleisten. Dadurch können sowohl Status- und Positionsänderungen der Maschinen in der Simulation berücksichtigt, als auch eine visuelle Darstellung der Auslastung von Kommunikationskomponenten in Plant Simulation durchgeführt werden.



Bild 27: Aufbau und Strukturierung der Kapitel anhand der jeweiligen Anforderungen

Das Co-Simulationsframework PLANET soll eine Validierung einer vorhandenen Planung darstellen. Somit ist die reine Planung des Kommunikationsnetzwerks nicht Gegenstand dieser Arbeit. Vielmehr bietet es dem Planer eine Hilfestellung um zu erkennen, ob Kommunikationskomponenten im Netzwerk den Anforderungen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Produktionsablauf nicht mehr genügen. Des Weiteren betrachtet diese Arbeit die Maschine-zu-Maschine und Maschine-zu-Cloud Kommunikation auf Basis von heutigen und zukünftigen Applikationen. Aufgrund der Trennung des Netzwerks in die drei Ebenen industrieller Kommunikation wird die echtzeitfähige Ebene der maschineninternen Kommunikation in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Auf der einen Seite existieren hierzu bereits Lösungen wie SINETPLAN und auf der anderen Seite ist dies in der frühen Lebenszyklusphase aufgrund fehlender Informationen zum Hersteller und konkreten Implementierung der Netzwerkkomponenten nicht zielführend. Daraus

ergibt sich im Folgenden die in Bild 27 beschriebene Struktur der Arbeit und die zugehörige Aufteilung in Kapiteln.

5 Strukturierung industrieller IT-/OT-Applikationen hinsichtlich Kommunikationsanforderungen mithilfe eines Kommunikationstechnologie-Portfolios

APA sind aufgrund sich stetig ändernder Anforderungen im Wandel. Dies hat zur Folge, dass sowohl die Anzahl als auch die Kommunikationsanforderungen von IT-/OT-Applikationen in APA steigen. Neue Kommunikationstechnologien wie zum Beispiel 5G und WiFi 6 bringen gleichzeitig neue Möglichkeiten, um den steigenden Anforderungen zu begegnen. Damit Planende in zukünftigen APA anhand spezifischen industriellen Applikationen erkennen können, welche Kommunikationstechnologie die jeweiligen Anforderungen erfüllt, soll in diesem Kapitel ein unterstützendes Kommunikationstechnologie-Portfolio entwickelt werden.

Zunächst wird eine Definition von heutigen und zukünftigen industriellen Applikationen in der Fertigungsautomatisierung durchgeführt. Anschließend wird der Begriff applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen in der APA eingeführt, mit welchen sowohl Kommunikationsbeziehungen als auch dynamische Aspekte der Anforderungen abgebildet werden. Eine beispielhafte APA soll applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen aufzeigen und den Vorteil in der vernetzten APA illustrieren. Zur Unterstützung bei der Planung von vernetzten APA wird abschließend ein Portfolio erstellt, welches Grenzen funkbasierter und kabelgebundener Kommunikationstechnologien aufzeigt. Heutige und zukünftige Applikationen werden anschließend in dieses Portfolio einsortiert, um bei der Planung von Kommunikationsnetzwerken hinsichtlich der Kommunikationstechnologie zu unterstützen. Dabei liegt der Fokus auf die Unterscheidung zwischen funkbasierten und kabelgebundenen Kommunikationstechnologien und ob sie die spezifischen Kommunikationsanforderungen der Applikationen erfüllen können.

In diesem Kapitel werden die Anforderungen A_{1.1} (Applikationsübersicht) und A_{1.2} (Kommunikationstechnologie-Portfolio) der Anforderungsanalyse aus Kapitel 4.1 adressiert.

Es werden Inhalte für die Beschreibung applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen von VUKOVIC et al. [P₂] verwendet. Zusätzlich sind

Ideen für die Strukturierung dieser Anforderungen in der Projektarbeit mit Grödel [Si] entstanden.

5.1 Definition heutiger und zukünftiger industrieller Applikationen in der Fertigungsautomatisierung

Grundlage für die Definition industrieller Applikationen in dieser Arbeit ist ihr Einfluss auf das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk. Dabei sollen industrielle Applikationen im Kontext der Maschine-zu-Maschine- und Maschine-zu-Cloud-Kommunikation betrachtet werden. Außerdem sollen auch Applikationen analysiert werden, welche zwar keine Maschine-zu-Maschine- bzw. -Cloud-Kommunikation ausführen, jedoch das gleiche Kommunikationsnetzwerk benutzen. Deshalb müssen alle Kommunikationen betrachtet werden, welche sich dasselbe Kommunikationsnetzwerk teilen. Eine Maschine kann dabei mehrere Applikationen gleichzeitig ausführen. Die Betrachtung des Kommunikationsaufkommens erfolgt deshalb auf Applikationsebene und nicht auf Maschinenebene. Nicht analysiert werden in diesem Zusammenhang Applikationen, welche lediglich auf maschineninterne Kommunikation setzen.

Dabei stellen bereits heutige Applikationen hohe Anforderungen an das zugrundeliegende Kommunikationsnetzwerk. Hohe Datenraten, Echtzeitanforderungen und niedrige Latenz sind dabei typische Dienstgüteparameter, welche industrielle Kommunikationsnetzwerke erfüllen müssen. Aufgrund sich stetig ändernder Anforderungen an moderne APA, kommen nicht nur aufgrund Industrie 4.0 immer neue Applikationen hinzu. Zukünftige Applikationen belasten bereits heutige, stark ausgelastet Netzwerke immer weiter. Viele zukünftige Applikationen können auf Basis bereits implementierter Technologien noch nicht umgesetzt werden. Ihre besonderen Anforderungen an Mobilität, höheren Datenraten und niedrigere Latenz sind für heutige Kommunikationsnetzwerke nicht zu bewältigen.

Prominente Vertreter von heutigen und zukünftigen Applikationen lassen sich in diverser Literatur finden. Dabei gilt es eine große Vielfalt mit unterschiedlichsten Anforderungen im Bereich der Fertigungsautomatisierung zu beschreiben. Dadurch können neue Kommunikationstechnologien und -protokolle entsprechend den beschriebenen Anforderungen ausgelegt, standardisiert und entwickelt werden. [40]

In diesem Zusammenhang werden folgende Applikationen in Tabelle 8 aus der Fertigungsautomatisierung betrachtet, welche sich potenziell das gleiche Kommunikationsnetzwerk in einer APA teilen. [25, 40, 102]

Die Einordnung der industriellen Applikationen soll dabei mithilfe einer Struktur erfolgen. Verschiedene Taxonomien orientieren sich an unterschiedlichen Merkmalen, wie die Einordnung durchzuführen ist. Nach SCHARFE [103] und MILJANOVIC [104] kann anhand der auszuführenden Arbeit bzw. der Tätigkeitsbereich eine sinnvolle Einordnung durchgeführt werden. Im Kontext der Fertigungsautomatisierung soll deshalb eine Struktur für Applikationen dienen, welche in fünf wesentliche Hauptkategorien untergliedert wird. Diese werden in Tabelle 9 näher erläutert und nachfolgend eine Ein-sortierung der Applikationen von Tabelle 8 in diese Hauptkategorien durchgeführt. In diese Hauptkategorien können alle industriellen Applikationen einer APA abgebildet werden.

Tabelle 8: Industrielle Applikationen zur Nutzung desselben Kommunikationsnetzwerks

Applikation	Beschreibung
MC	Regelung von Antrieben zur Bewegungsausführung
FTS	Automatisch gesteuertes Flurförderfahrzeug
Flugroboter	Automatisch gesteuerte Luftfahrzeuge
Mobile Roboter	Autonome Roboter, die sich selbstständig bewegen und mit der Umwelt interagieren können
MES-Anbindung	Datenaustausch mit dem MES
Maschinenkommunikation	Datenaustausch zwischen Maschinen zur Synchronisation von Arbeitsaufträgen
HMI	Interaktion zwischen Mensch und Maschine
Augmented Reality	Anreicherung des natürlichen Blickfelds um zusätzliche Informationen der APA
Virtual Reality	Computergenerierte Realität zur Visualisierung der APA
Fernzugang und -wartung	Zugriff auf und Wartung der APA außerhalb des Kommunikationsnetzwerks
Programmierung	Hinzufügen und Änderung von Programmcode und Projektierungen in einer SPS, HMI, Umrichter, usw.
Sensorik und Aktorik	Lesen von Messwerten und steuern von physikalischen Kenngrößen

Bei der Definition der fünf Hauptkategorien wird dabei nicht auf die Mobilität, das heißt ob die Applikationen stationär oder mobil genutzt werden, eingegangen. Der Hintergrund ist, dass Applikationen zukünftig mit sich

Tabelle 9: Definition der fünf Hauptkategorien für die Einordnung von industriellen Applikationen einer APA

Kategorie	Beschreibung
Regelung und Steuerung	Applikationen, bei denen die Steuerung und Regelung der Tätigkeit extern durchgeführt wird
Logistik und Transport	Sämtliche Applikationen, die Tätigkeiten im Bereich des Transports oder der Logistik von Gegenständen übernehmen
Prozessanbindung	Informationsaustausch zwischen Applikationen, damit der Prozess als solches funktionsfähig ist
Bedienung und Beobachtung	Applikationen, welche der visuellen Aufbereitung von Informationen bzw. der Bedienung von Werkenden dienen
Instandhaltung	Alle parallel zur Produktion laufenden Applikationen, welche der Wartung und Instandhaltung dienen

ändernden Kommunikationstechnologien und konvergenten Netzwerken nicht mehr strikt an ihre vorherige Mobilität gebunden sind und sich dadurch wandeln können.

Die Einordnung der Applikationen in die fünf Hauptgruppen kann dazu führen, dass einige Applikationen Schnittmengen mit mehreren Hauptgruppen besitzen. Bild 28 zeigt dabei die Aufteilung der zuvor genannten Applikationen in die jeweiligen Hauptgruppen. Die Applikation *Mobile Roboter* wird in dieser Einordnung sowohl in die Hauptgruppe *Regelung und Steuerung* als auch *Logistik und Transport* einsortiert. Dies liegt daran, dass mobile Roboter häufig auch als kooperierende Roboter fungieren und ihre Aussteuerung einer exakten und externen Regelung bedarf. Zeitgleich erfüllen diese Roboter aber auch Tätigkeiten, welche der Logistik bzw. dem Transport entsprechen.

5.2 Applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen in der automatisierten Produktionsanlage

Alle zuvor genannten Applikationen stellen unterschiedliche Kommunikationsanforderungen an das Kommunikationsnetzwerk der APA. Ihre Klassifikation und Quantifizierung ist dabei wichtig, damit sie im späteren Verlauf der

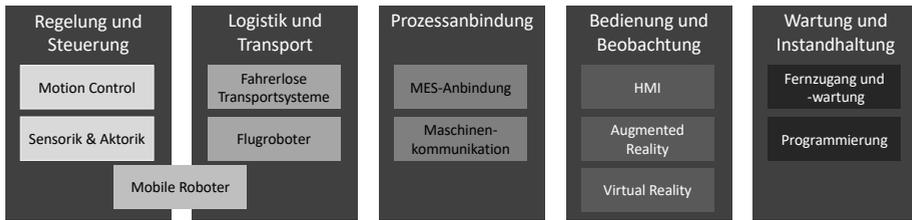


Bild 28: Aufteilung von heutigen und zukünftigen Applikationen nach fünf definierten Hauptkategorien

Planung und Simulation entsprechend berücksichtigt werden. Ohne diese Informationen, ist eine korrekte Dimensionierung der Kommunikationsnetzwerke nicht möglich.

Die bereits vorhandene Klassifizierung der 3GPP (2.2.5) ist für den ersten Schritt zur Definition der Anforderungen gut geeignet. Dennoch fehlen auch hier wichtige Informationen, welche im Kontext der flexiblen und laufenden APA relevant sind. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf dynamische Kommunikationsanforderungen und den jeweiligen Kommunikationspartnern eingegangen. Anschließend werden die relevanten Parameter, welche daraus resultieren, festgelegt.

5.2.1 Dynamische Kommunikationsanforderungen

Die statische Beschreibung von Kommunikationsanforderungen führt im Hinblick auf sich ständig ändernde APA zu einem Kommunikationsnetzwerk, welches nicht ressourceneffizient ausgelegt werden kann. Fortlaufend ändernde Zustände von Applikationen führen auch zu einer dynamischen Auslastung des Netzwerks. Eine Applikation, welche nicht durchgängig arbeitet, da sie auf Material wartet oder aktuell nicht verwendet wird, besitzt dementsprechend andere Kommunikationsanforderungen als eine Applikation welche aktiv produziert. Aus diesem Grund müssen für eine konkrete Simulation diese Anforderungen dynamisch abgebildet werden, damit eine Planung im Kontext der flexiblen APA korrekt durchgeführt wird. Je nach Zustand der Applikation können so die entsprechenden Anforderungen festgelegt werden. In diesem Zusammenhang ist jedoch auch der Zeitpunkt der Zustandsänderungen essentiell. In einer diskreten Produktionssimulation können die jeweiligen Zustände der Applikation entsprechend abgebildet werden. Durch die Kombination aus Zeitpunkt und konkretem Produktionszustand werden dynamische Kommunikationsanforderungen ausreichend beschrieben, um eine spätere Kommunikationssimulation durchzuführen.

5.2.2 Kommunikationsbeziehung in der automatisierten Produktionsanlage

Bei der Betrachtung dynamischer Kommunikationsanforderungen sind nicht nur die jeweiligen Betriebszustände der Applikationen wichtig. Auch der jeweilige Kommunikationspartner der Applikation ist dabei entscheidend. Da eine Kommunikationsübertragung immer aus Quelle und Senke besteht, ist es für das Netzwerk relevant, welche Route eine Nachricht dabei zurücklegt. Entsprechend der Information des Kommunikationspartners können die notwendigen Routen im Kommunikationsnetzwerk angelegt werden. Daraus resultierend entstehen bezüglich der Ressourceneffizienz Vorgaben bei der optimalen Planung und Positionierung von Kommunikationskomponenten. Für die Kommunikationsplanung ergeben sich die in Tabelle 10 beschriebenen, vier möglichen Kommunikationsbeziehungen.

Tabelle 10: Möglichkeiten der Kommunikationsbeziehungen in einer flexiblen APA

Kommunikationsbeziehung	Beschreibung
stationär - stationär	Eine ortsfeste Applikation kommuniziert mit einer weiteren ortsfesten Einheit
stationär - mobil	Eine ortsfeste Applikation kommuniziert mit einer mobilen, sich bewegenden Einheit
mobil - stationär	Eine mobile, sich bewegende Applikation kommuniziert mit einer ortsfesten Einheit
mobil - mobil	Eine mobile, sich bewegende Applikation kommuniziert mit einer weiteren mobilen Einheit

Für das Kommunikationsnetzwerk ist die *stationär - stationär* Kommunikationsbeziehung eine feste, sich nicht ändernde Route. Somit stellt es für die Planung den einfachsten Fall dar. Bei den drei weiteren Kommunikationsbeziehungen können sich die Netzwerkrouuten aufgrund sich ändernder Positionen jedoch wandeln. Sowohl die Anzahl an Kommunikationskomponenten, die eine Nachricht durchquert, als auch die Strecke kann dabei variieren. Dies zeigt, dass besonders bei mobilen Applikationen eine Planung des Kommunikationsnetzwerks mithilfe eines diskreten Produktionsablaufs hilfreich ist.

5.2.3 Parameter applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen

Zusätzlich zu den bekannten Parametern der Klassifizierung der 3GPP (2.2.5) ergeben sich aus den dynamischen Kommunikationsanforderungen und der jeweiligen Kommunikationspartner weitere Parameter. Diese werden in diesem Abschnitt definiert und mit den bestehenden Anforderungen kombiniert, um applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen ganzheitlich im flexiblen Produktionskontext zu beschreiben. Einige dieser Parameter entstehen erst zur Laufzeit bzw. Instanziierung der Applikation. Diese Werte sind deshalb erst zu diesem Zeitpunkt bekannt.

Erweiterung der Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk

Anhand der zuvor beschriebenen dynamischen Kommunikationsanforderungen und Kommunikationsbeziehungen ergeben sich zwei weitere Parameter, welche für die Beschreibung der Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk relevant sind. Diese sind in Tabelle 11 beschrieben.

Tabelle 11: Erweiterung der Parameter für die Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk

Parameter	Einheit	Beschreibung
Beziehungsart	String	Auswahl einer der möglichen Kommunikationsbeziehungen in flexiblen APA aus Tabelle 10
Kommunikationspartner	String	Gibt das Ziel an, mit welcher Einheit die Applikation kommuniziert

Erweiterung der Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle

Ähnlich wie bei der vorherigen Erweiterung, ergeben sich auch bei der Kommunikationsschnittstelle der Applikationen neue Anforderungen basierend auf der vorherigen Analyse. Diese werden von der Applikation an die Kommunikationsschnittstelle als Mindestanforderungen gestellt, um im Produktionskontext implementiert zu werden. Die Kommunikationsschnittstelle muss dabei nicht zwangsläufig von der Applikation selbst unterhalten werden, sondern kann auch von einer übergeordneten Maschine zur Verfügung gestellt werden. In Tabelle 12 sind die Erweiterung der Parameter erläutert.

Tabelle 12: Erweiterung der Parameter für die Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle

Parameter	Einheit	Beschreibung
Protokoll	String	Kommunikationsprotokoll, welches die Applikation für die Übertragung der Daten nutzt
Übertragungsmedium	String	Beschreibt, ob die Übertragung kabelgebunden oder per Funk stattfindet

Resultierende Beschreibung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen

Aus den zuvor erläuterten Erweiterungen der Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk und an die Kommunikationsschnittstelle ergibt sich eine resultierende Beschreibung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen. Dabei wird auf Basis der von der 3GPP (2.2.5) definierten Anforderungen entsprechend eine Erweiterung durchgeführt. Die Tabelle 13 beschreibt ganzheitliche applikationsbezogene Anforderungen im Kontext flexibler APA. Dies dient als Grundlage für eine ressourceneffiziente und optimierte Planung und Simulation des Kommunikationsnetzwerks auf Basis einer diskreten Produktionsplanung.

Tabelle 13: Resultierende Parameter für applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen

Kommunikationsnetzwerk	Kommunikationsschnittstelle
Verfügbarkeit	Burst
Ende-zu-Ende-Latenz	Nachrichtengröße
Zuverlässigkeit	Überlebenszeit
Service-Bitrate	Transferintervall
Aktualisierungszeit	Protokoll
Beziehungsart	Übertragungsmedium
Kommunikationspartner	

5.3 Applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen anhand einer beispielhaften automatisierten Produktionsanlage

In diesem Abschnitt werden Kommunikationsanforderungen mehrerer Applikationen mithilfe der zuvor eingeführten Parametern beschrieben. Hierzu wird zunächst eine beispielhafte APA eingeführt, die auch in späteren Kapiteln dieser Arbeit als Grundlage einer realistischen APA dienen soll.

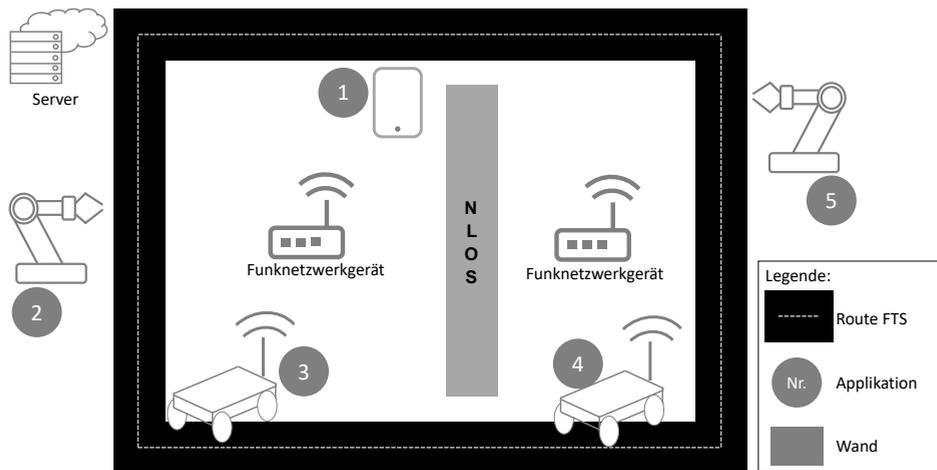


Bild 29: Beispielhafte APA mit einer Auswahl an verschiedenen Applikationen

In Bild 29 ist eine APA mit fünf verschiedenen Teilnehmern aufgebaut. Zusätzlich ist eine rechteckige Bahn eingezeichnet, welche dem FTS (3,4) den Fahrweg vorgibt. In der Mitte befinden sich auf der linken und der rechten Seite der Wand jeweils ein Funknetzwerkgerät, mit welchem sich mobile Applikationen verbinden können. Die Wand ist ein starres Element, welches die direkte Sichtverbindung per Funk unterbindet. Diese Nicht-Sichtverbindung wird in der Nachrichtentechnik als *non-line-of-sight* (NLOS) bezeichnet [105]. Der Server dient hierbei als Senke der Kommunikationsanfragen und stellt somit keine eigenständige Applikation dar.

Wenngleich eine Maschine bzw. ein Netzwerkteilnehmer mehrere Applikationen gleichzeitig beinhalten kann, soll in diesem Beispiel jeder Teilnehmer nur eine Applikation repräsentieren. Tabelle 14 listet die Applikationen hinsichtlich ihrer Beschreibung auf und referenziert die zugrundeliegenden applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen.

Tabelle 14: Beschreibung der Applikationen in der beispielhaften APA

Nr.	Applikation	Applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen (Referenz)
1	HMI mit Not-Halt	Das HMI ist mit der Bearbeitungsstation 1 verbunden und steuert die Not-Halt-Funktion (Bild 56)
2	Bearbeitungsstation 1	MES-Anbindung zum Austausch der Prozess- und Produktionsdaten (Bild 55)
3	FTS 1	Dezentrale Auswertung der Bilddaten für sicherheitsrelevante Funktionen (Bild 30)
4	FTS 2	Dezentrale Auswertung der Bilddaten für sicherheitsrelevante Funktionen (Bild 30)
5	Bearbeitungsstation 2	MES-Anbindung zum Austausch der Prozess- und Produktionsdaten (Bild 55)

Für die Definition der Werte von Kommunikationsanforderungen in der beschriebenen beispielhaften APA werden dabei verschiedene Quellen verwendet. In diesem Beispiel sind die Daten aus bereits evaluierten und gemessenen Applikationen [24, 25, 40] entnommen und um entsprechende applikationsbezogene Anforderungen erweitert. Falls in der Literatur keine entsprechenden Werte für Applikationen vorhanden sind, ist zudem eine Messung und Charakterisierung der Kommunikationsanforderungen unerlässlich. Eine vollständige Abbildung relevanter Applikationen und ihrer Anforderungen bilden eine solide Basis für die Simulation des Kommunikationsnetzwerks.

5.4 Kommunikationstechnologie-Portfolio von industriellen Applikationen

Die zuvor beschriebenen applikationsbezogenen Anforderungen industrieller Applikationen dienen dazu, das Kommunikationsnetzwerk optimal und ressourceneffizient zu planen. Welche Technologie hierfür genutzt werden kann, wird bei den Anforderungen nicht aufgezeigt. Ein Portfolio bietet hierbei den entscheidenden Mehrwert. Da bisher so ein Portfolio zur Auswahl der geeigneten Kommunikationstechnologie nicht existiert, wird in diesem Kapitel das Kommunikationstechnologie-Portfolio eingeführt. Durch die Auswahl von kommunikationstechnischen Eigenschaften, werden Technologiegrenzen visuell aufbereitet. Dadurch lassen sich mögliche Kommunikationstechnologien einer Applikation mithilfe von Technologiegrenzen auswählen.

Kommunikationsnetzwerk		Kommunikationsschnittstelle	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verfügbarkeit	99.999 9%	Burst	---
Ende-zu-Ende-Latenz	< 50ms	Nachrichtengröße	150 kByte
Zuverlässigkeit	~ 365 Tage	Überlebenszeit	60ms
Service-Bitrate	---	Transferintervall	40-60ms
Aktualisierungszeit	---	Protokoll	MQTT
Beziehungsart	mobil - stationär	Übertragungsart	Funk
Kommunikationspartner	Server		

Bild 30: Anforderungen einer FTS-Applikation hinsichtlich Kommunikationsnetzwerk und Kommunikationsschnittstelle

In diesem Kapitel werden zunächst die Definitionen relevanter Eigenschaften eines Portfolios von industriellen Applikationen zur Auswahl der Kommunikationstechnologie erläutert. Anschließend wird das Portfolio mit seinen jeweiligen Technologiegrenzen eingeführt, um abschließend eine Einordnung zuvor genannter Applikationen durchzuführen. Daraus ergibt sich ein Portfolio, mit dem Planende von Kommunikationsnetzwerken die Kommunikationstechnologie, basierend auf industriellen Applikationen, auf Tauglichkeit überprüfen können.

5.4.1 Definition und Erläuterung der Eigenschaften des Portfolios

Die Anforderungen von industriellen Applikationen hinsichtlich des benötigten Kommunikationsnetzwerks sind vielfältig. Doch nicht alle Anforderungen werden zur Evaluierung einer geeigneten Übertragungstechnologie benötigt. Bereits bestehende Portfolios aus anderen Bereichen im Bezug auf Kommunikationstechnik zeigen, dass vor allem die Betrachtung der Ende-zu-Ende-Latenz und der Datenrate relevant sind [106]. Weitere Parameter wie zum Beispiel die Mobilität der Applikation sind ebenso wichtige Anforderungen. Bei einer vorausgesetzten Mobilität fällt die Wahl fast immer auf eine funkbasierte Lösung, weshalb dieser Parameter nicht separat in dem Portfolio betrachtet wird.

Dieses Portfolio bildet auf der X-Achse die Ende-zu-Ende-Latenz und auf der Y-Achse die Datenrate ab. Wie in Bild 31 zu erkennen ist, werden die Achsbeschriftungen in logarithmischer Darstellung aufgeführt. Dadurch lassen sich sowohl niedrigste als auch höchstmögliche Werte der Anforderungen kompakt abbilden. Je nach Technologie bedingt eine höhere Datenrate eine zunehmende Latenz. Des Weiteren wirken sich auch weitere Einflüsse wie Anzahl der Teilnehmer im Kommunikationsnetzwerk und Abstand zur nächsten Basestation auf die Datenrate und Latenz aus. Da es sich dabei um dynamische Parameter handelt benötigt es eine nachfolgende Kommunikationssimulation, um diese Einflüsse zu betrachten. Dieses Portfolio ermöglicht die Bestimmung der Kommunikationstechnologie auf Basis von applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen ohne dabei weitere Teilnehmer im Kommunikationsnetzwerk zu berücksichtigen.

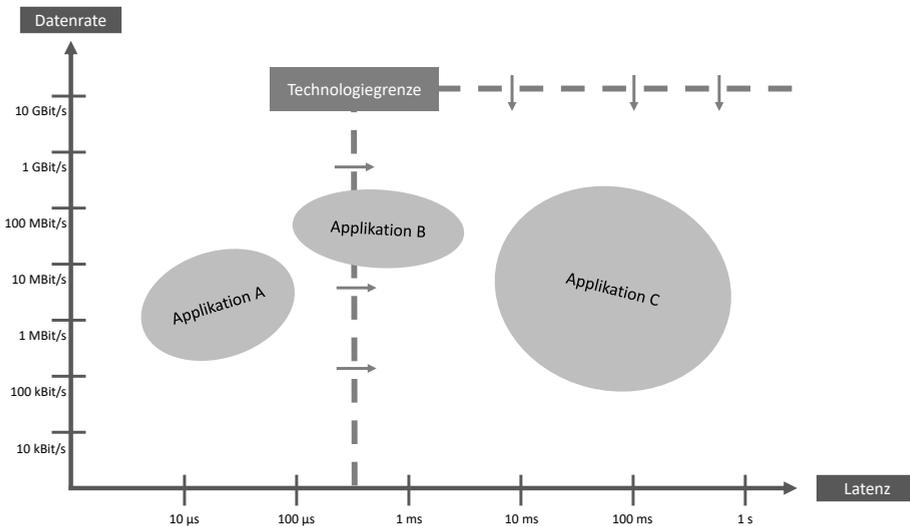


Bild 31: Aufbau des Kommunikationstechnologie-Portfolios anhand der Eigenschaften Datenrate und Latenz mit zugehörigen Technologiegrenzen und Applikationen

In dem Bild 31 ist zusätzlich auch eine beispielhafte Einordnung von Applikationen sichtbar. Diese werden entsprechend ihrer Anforderungsgrenzen eingezeichnet. Die Technologiegrenze zeigt indes, innerhalb welchen Bereichs die jeweilige Technologie eingesetzt werden kann.

5.4.2 Erstellung der Technologiegrenzen innerhalb des Portfolios

Die Erstellung der Technologiegrenzen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Grundsätzlich soll in diesem Portfolio eine Unterscheidung zwischen funkba-

sierten und kabelgebundenen Kommunikationstechnologien durchgeführt werden. Dies wird hierbei exemplarisch an einer ausgewählten Technologie bzw. vorhandenen industriellen Protokollen erarbeitet. Das Portfolio soll dabei die maximale Grenze der jeweiligen Technologie aufzeigen, denn je nach Anzahl der Teilnehmer, welche die Kommunikationstechnologie nutzen, sind diese Grenzen auch variabel. Speziell bei funkbasierten Technologien ist auch der Abstand zu den Teilnehmern wichtig, da dieser ebenfalls auf Datenrate und Latenz Einfluss nimmt. Das Portfolio soll deshalb als Hilfestellung dienen, um die maximale Machbarkeit einer Technologie aufzuzeigen.

Für die Erstellung der Technologiegrenzen funkbasierter Kommunikationstechnologien wird der neue Funkstandard 5G verwendet. Dieser ist im Hinblick auf industrielle Nutzungsweise besonders zukunftsweisend und flexibel in den Möglichkeiten des Einsatzes. Doch auch WiFi-basierte Kommunikationstechnologien decken im industriellen Umfeld im Hinblick auf Latenz und Datenrate ähnliche Werte ab und können somit substituiert werden. Prinzipiell ermöglicht die Verwendung von 5G sehr hohe Datenraten von über 10 GBit/s bei gleichzeitig sehr niedriger Latenz [107]. Diese Werte sind jedoch nur im Laborumfeld messbar und für industrielle Umgebungen nicht geeignet. Speziell für die Industrie in Deutschland wurde das Frequenzband von 3,7-3,8 GHz reserviert (siehe Kapitel 2.3.3). Aus diesem Grund werden die zugehörigen Werte der Technologiegrenze in diesem Frequenzband betrachtet. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die maximale Datenrate proportional zur Latenz verhält [108]. Je höher die anvisierte Datenrate innerhalb eines 5G-Netzwerks, desto höher fällt auch die Latenz aus. Die Grenzwerte für dieses dedizierte Frequenzband werden dabei in verschiedenen Performentests evaluiert. In dieser Arbeit dient die Performancemessung von ANSARI et al. [109] als Grundlage für die Bestimmung der Technologiegrenzen funkbasierter industrieller Kommunikation.

Kabelgebundene Kommunikationstechnologien sind ebenfalls abhängig von Einsatzort und Einsatzzweck. Aufgrund des Einsatzes im industriellen Umfeld reicht es dabei nicht aus, die Technologie eigenständig zu betrachten. Bei der Evaluierung des Grenzbereichs muss daher der Fokus auf speziell für industrielle Zwecke entwickelte Kommunikationsprotokolle liegen. Diese definieren aufgrund ihrer Implementierung die maximal möglichen Werte hinsichtlich der Latenz. Deshalb soll für kabelgebundene Technologien stellvertretend das Kommunikationsprotokoll PROFINET IRT [62] und Ethercat [110] dienen. Diese Protokolle sind speziell für den Einsatz in echtzeitkritischen Umgebungen mit sehr niedrigen Latenzanforderungen entwickelt worden. Bei der Bestimmung der maximal möglichen Bandbreite wird auf gängige Protokolle wie TCP gesetzt. Ähnlich wie bei funkbasierten Technologien soll für kabelgebundene Technologien die maximal möglichen Grenzwerte

aufgezeigt werden. Diese variieren je nach Implementierung und Anzahl der Teilnehmer. Dabei dient die Performancemessung der Latenz von PRYZ [111] und der Datenrate von YOSHINO et al. [112] als Grundlage für die Bestimmung der Technologiegrenzen kabelgebundener industrieller Kommunikation.

Die Zusammenführung der Performancemessungen ergibt die Technologiegrenzen für funkbasierte und kabelgebundene Kommunikationstechnologien im industriellen Umfeld in Bild 32.

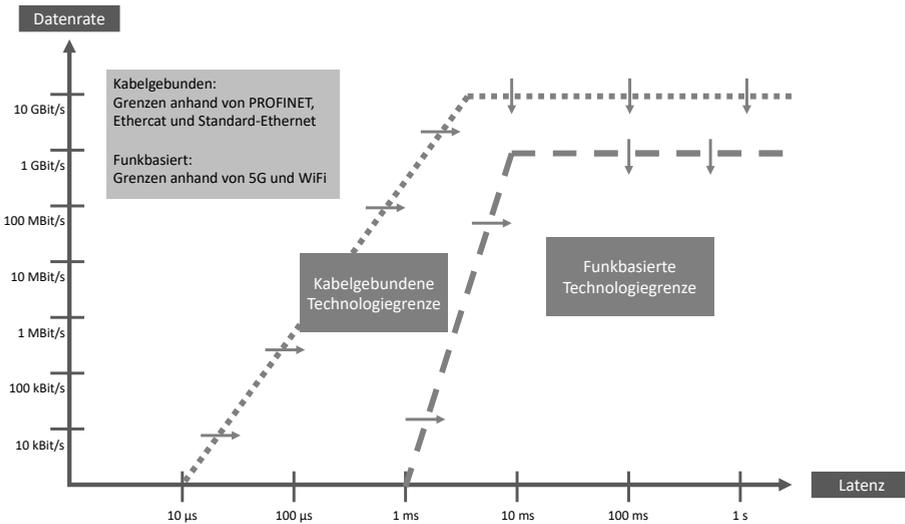


Bild 32: Technologiegrenzen von funkbasierter und kabelgebundener Kommunikationstechnologien im industriellen Umfeld

5.4.3 Einordnung der Applikationen in das Portfolio

Die Einsortierung in das Portfolio erfolgt mit den heutigen und zukünftigen Applikationen in der Fertigungsautomatisierung aus Kapitel 5.1. Diese werden entsprechend ihren Beschreibungen und den zugehörigen Anforderungen aus [25, 40, 102] in das erstellte Portfolio mit seinen kommunikationstechnologischen Grenzen einsortiert. Dabei repräsentieren diese Applikationen nicht nur eine Anforderung, sondern gelten als Überbegriff für alle Applikationen aus diesem Bereich. Die Applikation *HMI* kann hier einerseits die Applikation der Eingangs- und Ausgangsdatenübertragung und andererseits die Videoübertragung zu Anzeigezwecken für den Benutzer repräsentieren. Somit steht fest, dass die qualitative Repräsentation im Portfolio immer eine Menge an verschiedenen Anforderungen darstellt. In Bild 33 ist das Portfolio mit den jeweiligen Applikationsklassen anhand ihrer Anforderungen angereichert.

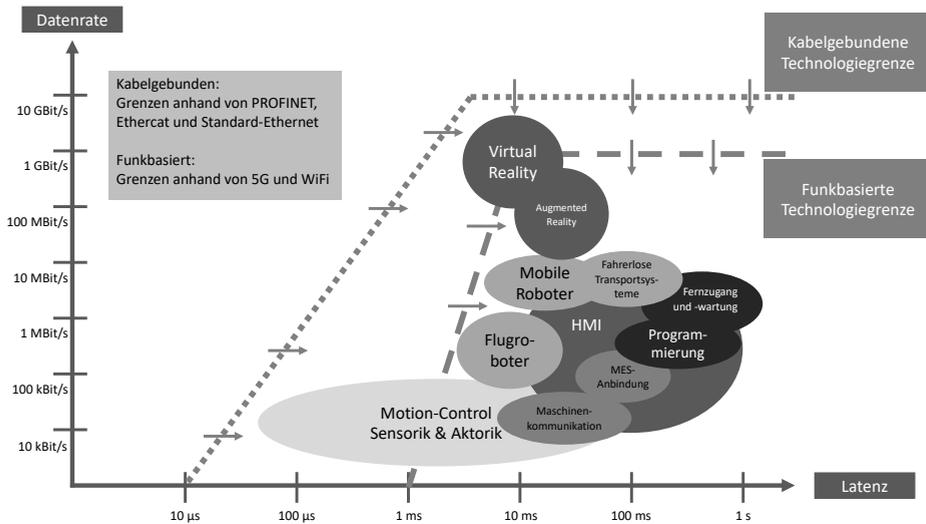


Bild 33: Portfolio mit seinen Technologiegrenzen und um industrielle Applikationen erweitert. Die Farben entsprechend den fünf definierten Hauptkategorien in Bild 28

In Bild 33 ist durch die Kombination aus Applikationsanforderungen und Technologiegrenzen zu erkennen, mit welcher Technologie welche Applikationen realisiert werden können. So ergibt sich aus der Einordnung, dass nahezu alle heutigen und zukünftigen industriellen Applikationen mithilfe funkbasierter Kommunikationstechnologie auf Basis von 5G bzw. WiFi 6 realisierbar sind. Lediglich bei der Betrachtung von zwei industriellen Applikationen fällt auf, dass ihre Anforderungen teilweise nicht mit heutigen funkbasierten Technologien betreibbar sind. Die Applikation *MC* stellt bei hochdynamischen Anwendungen zu hohe Anforderungen an die Synchronisation der Achsen und benötigt deshalb geringe Latenzzeiten mit annähernd konstantem Jitter. Ähnlich verhält sich dies bei der Applikation *Virtual Reality*, welche aufgrund sehr hoher Datenraten und zugleich hoher Anforderungen an niedrige Latenzen nicht immer mithilfe funkbasierter Kommunikationstechnologie betreibbar sind. Bei beiden Applikationsklassen muss daher eine nähere Betrachtung des Einsatzszenarios und der tatsächlichen Anforderungen durchgeführt werden, um eine abschließende Beurteilung zu treffen. Alle anderen Applikationsklassen sind mithilfe funkbasierter Kommunikation realisierbar.

5.5 Fazit

In diesem Kapitel ist zunächst eine strukturierte Analyse heutiger und zukünftiger Applikationen durchgeführt worden. Diese wurden in fünf verschiedene

Hauptgruppen unterteilt und die beispielhaften industriellen Applikationen einer APA eingruppiert. Applikationsbezogene Anforderungen zeigen zudem, welche dynamischen Anforderungen die Applikationen an das Kommunikationsnetzwerk stellen und welche Kommunikationsbeziehungen diese benötigen. Dazu wurden vorhandene Beschreibungen von Kommunikationsanforderungen um die Parameter Beziehungsart, Kommunikationspartner und Übertragungsart erweitert. Anhand einer beispielhaften APA konnten die applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen illustriert und die Anforderungen der Applikationen klassifiziert werden. Zur Planung des Kommunikationsnetzwerks in einer solchen APA wurde außerdem ein neues Portfolio von industriellen Applikationen entwickelt. Mithilfe von Technologiegrenzen funkbasierter und kabelgebundener Kommunikationstechnologien wird den Planenden visuell aufgezeigt, welche Anforderungen die jeweilige Applikationsklassen haben. Daraus resultierend ist die mögliche Technologie ableitbar, ob die Applikation mithilfe einer kabelgebundenen oder funkbasierten Lösung auskommt.

Sowohl die Anforderung A1.1 (Applikationsübersicht) als auch A1.2 (Kommunikationstechnologie-Portfolio) aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 4.1 sind in diesem Zusammenhang adressiert und erfüllt. Wie einheitliche und generische Abbildungen applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen und ein standardisiertes Datenaustauschformat für Simulationen aussehen, wird im folgenden Kapitel adressiert.

6 Modellierung von holistischen Kommunikationsanforderungen automatisierter Produktionsanlagen

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass jede Applikation in der Fertigungsautomatisierung ihre eigenen Kommunikationsanforderungen besitzt. Damit diese entsprechend beschrieben werden können, bedarf es einer exakten Definition im Sinne einer Modellierung. Das Ziel dieses Kapitel ist es, eine standardisierte Modellierung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen zu definieren, um diese bereits in der Planungsphase verwenden zu können. Dadurch wird es möglich, mit verschiedenen Werkzeugen und Simulationen auf eine gemeinsame und standardisierte Datenbasis zurückzugreifen und diese gewinnbringend einzusetzen. Neben der Modellierung von applikativen Kommunikationsanforderungen gilt es auch die Schnittstellen zu betrachten, über welche die Daten mit anderen Werkzeugen ausgetauscht werden.

Zunächst wird betrachtet, inwieweit Kommunikationsanforderungen in der Planungsphase bereits bekannt sind und abgebildet werden. Anschließend wird untersucht, wie Kommunikationsanforderungen in der Verwaltungsschale beschrieben werden, um daraufhin ein Konzept zu definieren, wie applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen im Kontext der Teilmodelle integriert werden können. Dies wird mit einer prototypischen Implementierung des Teilmodells Simulation verdeutlicht. Zuletzt soll ein Konzept entworfen werden, mit welchem sich die Informationen aus der Verwaltungsschale entnehmen lassen und über eine Schnittstelle publiziert werden können.

In diesem Kapitel werden die Anforderungen A2.1 (Erweiterung der Verwaltungsschale) und A2.2 (Austauschformat für Kommunikationsanforderungen) der Anforderungsanalyse aus Kapitel 4.1 adressiert.

6.1 Kommunikationsanforderungen von Applikationen in der Planungsphase

Die Beschreibung von Kommunikationsanforderungen ist für eine genau Analyse der Last im Kommunikationsnetzwerk essentiell. Damit diese in einer frühzeitigen Simulation oder Planung genutzt werden können, benötigt es eine einheitliche Datenbasis. Im Rahmen der Produktions-Planungsphase existieren bereits verschiedene Dokumente und Informationsquellen, welche

sich für diesen Zweck grundsätzlich eignen. Viele Informationen über den Aufbau der APA sind bereits zur Planungsphase in diversen Planungsdokumenten beschrieben. Auch Lasten- und Pflichtenhefte sind zentrale Dokumente, die bereits sehr früh im Lebenszyklus einer APA vorliegen. Obwohl sich diese Dokumente aufgrund ihres Entstehungszeitpunkts und ihrer Verfügbarkeit eignen, sind sie in ihrer Ausführung sehr unterschiedlich. Der Aufbau dieser Dokumente ist nicht einheitlich standardisiert und somit auch als potenzielle Informationsquelle nicht eindeutig. Somit ist die Verarbeitung mittels *Natural Language Processing* (NLP) grundsätzlich für diese Art von Dokumenten geeignet, jedoch aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus der Dokumente und unterschiedlicher Inhalte nicht zielführend.

Aus diesen Gründen wird eine neue Methode benötigt, um Kommunikationsanforderungen einer gesamten APA einheitlich abzubilden. Wie bereits im Stand der Technik eingeführt, wird eine Informationsquelle benötigt, welche standardisiert und bereits in der frühen Planungsphase vorhanden ist. Aus diesen Gründen eignet sich die Verwaltungsschale (VWS) aus RAMI 4.0 für dieses Vorhaben. Die Abbildung von Informationen in der VWS ist dabei persistent und kann im Verlauf des Lebenszyklus dynamisch angepasst werden. Aufgrund der Standardisierung der Informationsablage kann anschließend mit maschinellen Mitteln ein automatisierter Informationstransfer in weitere Werkzeuge, wie zum Beispiel Simulationen, stattfinden. In Bild 34 ist die konzeptionelle Abbildung von Kommunikationsanforderungen in der VWS zu sehen. Zudem ist auch die für den Transfer in weitere Simulationswerkzeuge notwendige Schnittstelle abgebildet.

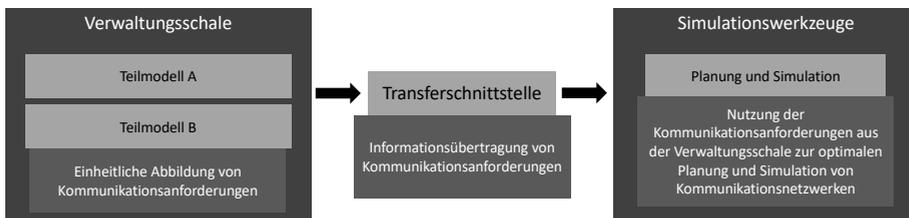


Bild 34: Konzept zur Nutzung der Verwaltungsschale zur Informationsabbildung und einer Transferschnittstelle für weitere Werkzeuge

Dabei ergeben sich zwei verschiedene Handlungsfelder, die in folgenden Kapitel eingeführt werden. Zunächst muss die Verwaltungsschale analysiert werden, wie die Abbildung von Anforderungen durchgeführt wird und ob applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen integriert werden können. Des Weiteren muss die Transferschnittstelle analysiert und defi-

niert werden, damit die Informationsweitergabe in weitere Werkzeuge bzw. Simulationen stattfinden kann.

6.2 Kommunikationseigenschaften in der Verwaltungsschale

Bei der VWS handelt es sich um die technische Umsetzung des digitalen Zwillings. Sie existiert bereits während der Planungs- und Designphase [18]. Die VWS definiert dabei Eigenschaften, welche das jeweilige Asset bzw. die Applikation beinhaltet. Diese werden spezifisch zu den jeweiligen Attributen in Teilmodelle oder auch Informationsmodelle aufgeteilt. Für verschiedene Aspekte existieren auch dementsprechend unterschiedliche, standardisierte Teilmodelle. Der Aspekt der Kommunikation wird ebenfalls in diesen Informationsmodellen abgebildet. Bei der Kommunikationsbeschreibung innerhalb der VWS muss zwischen zwei verschiedenen Aspekten unterschieden werden. Zum einen existiert die Kommunikation zwischen verschiedenen VWS von Assets bzw. Applikation auf Metaebene und zum anderen die Anforderungsbeschreibung anhand eines Teilmodells in der VWS. Diese werden im Folgenden näher erläutert. [19]

6.2.1 Kommunikation auf Metaebene zwischen aktiven Verwaltungsschalen

Bei der Verwendung von Verwaltungsschalen kann prinzipiell zwischen zwei verschiedenen Formen unterschieden werden. Eine passive VWS repräsentiert den Datenaustausch im XML- oder JSON-Format zwischen verschiedenen Teilnehmern. Die Abbildung der Eigenschaften findet in den zugehörigen aspektbezogenen Teilmodellen statt. Die VWS besitzt jedoch keine eigene Kommunikationsschnittstelle und kann deshalb nur als Datei verarbeitet werden. Eine aktive VWS bildet dieselben Eigenschaften ebenso in Teilmodellen ab, bietet jedoch zusätzlich die Möglichkeit, die Informationen über eine I4.0-konforme Sprache auszutauschen. Sie besitzt daher eine Kommunikationsschnittstelle, welche den Informationsaustausch mit anderen Teilnehmern ermöglicht. Zusätzlich besitzen aktive VWS die Fähigkeiten eigene Optimierungs- und Entscheidungsalgorithmen anzustoßen und zu verarbeiten. Diese Kommunikationsart wird im Folgenden als Kommunikation auf Metaebene bezeichnet. Mithilfe der I4.0-Sprache wird eine Orchestrierung verschiedener I4.0-Komponenten auf Anwendungsebene durchgeführt. Die dabei genutzte Kommunikationstechnologie und das zugehörige Netzwerk wird dadurch nicht beschrieben. [113, 114]

Wie in Bild 35 zu sehen ist, erfolgt die Kommunikation zwischen zwei aktiven VWS über den sogenannten Interaktionsmanager. Dieser ist zuständig für die Aufbereitung der Informationen in das zugehörige Interaktionsprotokoll und entscheidet zudem darüber, welche Algorithmen für die Umsetzung der Anfrage ausgeführt werden müssen. Der Messenger in einer aktiven VWS übernimmt die Aufgabe der Schnittstelle und des Transports der Nachrichten.

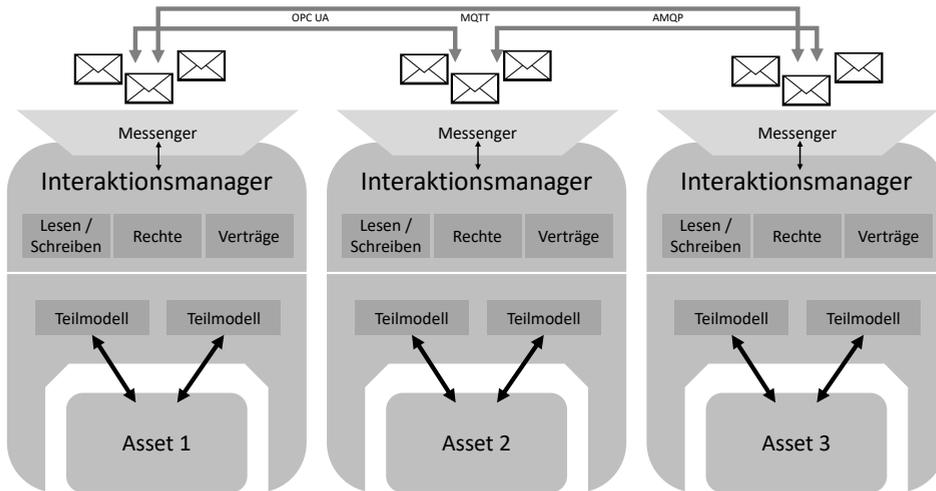


Bild 35: Interaktionsmanager zur Kommunikation zwischen Verwaltungsschalen auf semantischer Ebene

Bei der Kommunikation zwischen aktiven VWS auf Metaebene ist lediglich die Anwendungsschicht definiert. Dabei wird der notwendige Datenaustausch für eine Industrie-4.0 konforme Orchestrierung verschiedener Skills zwischen den Assets beschrieben. Dadurch können bereitgestellte und notwendige Informationen auf Anwendungsebene definiert werden, damit ein standardisierter Datenaustausch zur Auftragsverhandlung stattfindet. Die aktive VWS gibt kein Aufschluss über Transport bzw. Technologie des zugrundeliegenden Kommunikationsnetzwerks.

6.2.2 Kommunikation mit einer reaktiven Verwaltungsschale

Bei der Unterscheidung zwischen passiver und aktiver Verwaltungsschale, wird zusätzlich noch eine dritte Form der VWS betrachtet. Dabei wird die passive VWS um eine API erweitert, damit Daten für andere Teilnehmer im Produktionskontext zugänglich sind. Hierbei handelt es sich nicht um die Kommunikation zwischen VWS, sondern zwischen anderen Werkzeugen (z.B. Simulationen) mit der VWS. Die Nutzung der Informationen einer

passiven VWS und Bereitstellung einer eine Schnittstelle wird anschließend als reaktive VWS bezeichnet. [115]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Nutzung einer reaktiven VWS. Die passiven Eigenschaften der jeweiligen Assets und Applikationen in der VWS können somit weiterverwendet werden. Durch die Bibliothekserweiterung einer Simulationsumgebung wird die passive VWS instanziiert. Die Simulation fungiert anschließend als reaktive VWS, indem sie die Informationen und Inhalte aus der bisher passiven VWS in den geeigneten Kontext bringt und für weitere Programme bzw. Werkzeuge zur Verfügung stellt. In Bild 36 sind die zugehörigen Beziehungen zwischen reaktiver und passiver VWS abgebildet. Zusätzlich bietet die reaktive VWS eine entsprechende API, damit die instanziierten und in Kontext gebrachten Daten weiterverarbeitet werden können.

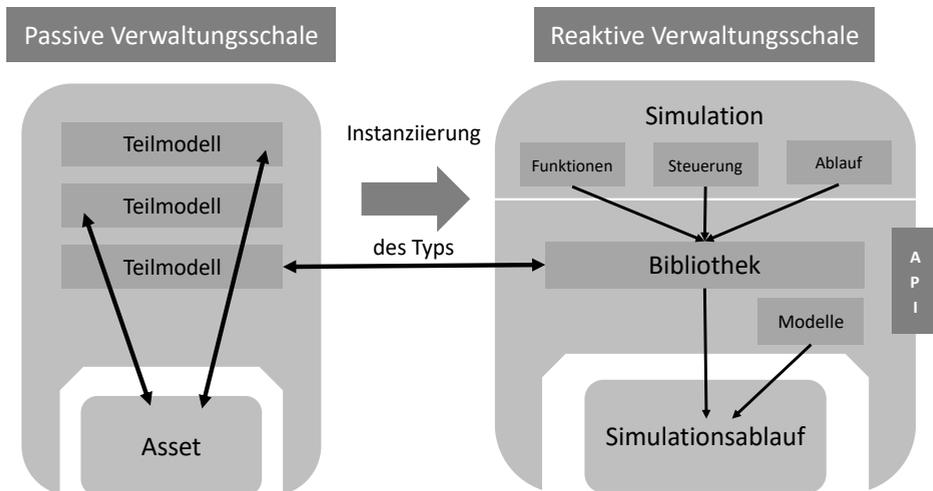


Bild 36: Reaktive Verwaltungsschale durch Instanziierung der passiven VWS durch eine Simulationsumgebung

Der Vorteil einer reaktiven VWS ist dabei, dass die Daten innerhalb der VWS bereits heute gewinnbringend weiterverarbeitet werden können, ohne dabei eine vollständige Industrie-4.0 konforme Produktion aufbauen zu müssen. Die Nutzung der standardisierten Teilmodelle bietet dabei Gewissheit, dass der Aufbau dieser Daten immer gleich ist. Dies erleichtert die spätere Interaktion mit anderen Werkzeugen bzw. Simulationen, welche die Daten instanziierten.

6.3 Abbildung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen in der Verwaltungsschale

Damit eine Simulationsumgebung als reaktive VWS fungieren kann, müssen die entsprechenden Teilmodelle standardisiert und implementiert werden. Im Bereich der Simulationsmodelle und Anforderungsbeschreibungen für Applikationen existiert ein solches Teilmodell nicht. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein neues Teilmodell vorgestellt, welches für diverse Simulationsszenarien unterschiedliche Domänen abdecken soll. Diese Arbeit konzentriert sich dabei verstärkt auf den Entwurf des Teilbereichs der Kommunikation. Andere Domänen können zu einem späteren Zeitpunkt analog hinzugefügt werden. Die dabei resultierende Standardisierung der Modellierung wird in den folgenden Kapiteln detailliert und kann als Basis für Functional Mock-up Interfaces im Bereich von Kommunikationsanforderungen dienen.

6.3.1 Teilmodell Simulation

Wie zuvor beschrieben werden Teilmodelle einer VWS genutzt, um Informationen eines Assets in standardisierter Form abzubilden. In diesem Zusammenhang soll ein Teilmodell entworfen werden, welches simulationsrelevante Informationen eines Assets darstellt. Da Simulationen für unterschiedliche Domänen existieren, soll dies vom Entwurf ebenfalls berücksichtigt werden. Hierzu wird in diesem Kapitel das Teilmodell Simulation eingeführt. Wie in Bild 37 zu sehen ist, stellt jede Domäne eine Unterkategorie des übergeordneten Teilmodells Simulation dar. Jede Domäne besitzt wiederum verschiedene Applikationen, welche durch das Asset repräsentiert werden. Ein Asset kann in diesem Kontext verschiedene Applikationen erfüllen. Dies bedeutet, dass für das Teilmodell Simulation jede Applikation eigene Eigenschaften pro Domäne hinsichtlich der Simulation besitzt. Daraus ergibt sich eine hohe Modularität bei der Verwendung dieses Teilmodells in späteren Simulationen, da je nach Simulationsszenario die entsprechende Domäne ausgewählt und implementiert werden kann.

Dabei soll das Teilmodell Simulation alle notwendigen Informationen abbilden, welche in der jeweiligen domänenspezifischen Simulation entstehen oder hierzu benötigt werden. Bei einer mechanischen Belastungssimulation würde dementsprechend das Teilmodell Simulation um die Domäne *Mechanik* erweitert werden und die Informationen für entsprechende Simulationen enthalten. Hieraus ergibt sich sowohl die Möglichkeit des Einsatzes als passive Verwaltungsschale, um Informationen mittels Datei weiterzugeben,

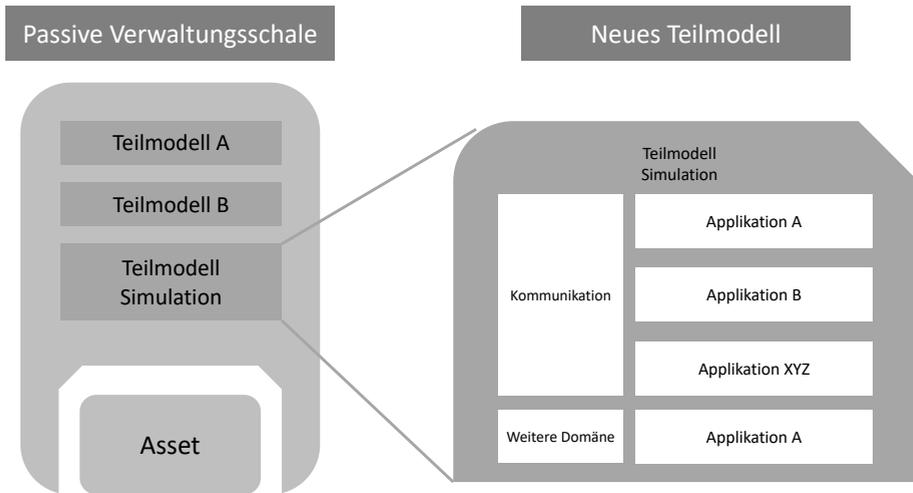


Bild 37: Erweiterung der Verwaltungsschale um ein neues Teilmodell - Simulation

aber auch die Implementierung als reaktive VWS. Dadurch werden domänenspezifische Simulationswerkzeuge angereichert und die Daten in der VWS standardisiert genutzt. Die Standardisierung dieses Aufbaus hat zudem den Vorteil, dass eine spätere maschinelle Auswertung der Informationen stattfinden kann.

6.3.2 Teilmodell Simulation-Kommunikation

Das domänenspezifische Teilmodell Simulation-Kommunikation füllt die Lücke in bestehenden Beschreibungen von Kommunikationseigenschaften. Durch die standardisierte Ablage der Anforderungen in einem dafür vorgesehenen Teilmodell, können Simulationswerkzeuge auf notwendige Informationen zurückgreifen. Jede einzelne Applikation eines Assets besitzt unterschiedliche Anforderungen. Deshalb wird, wie in Bild 37 gezeigt, jede Applikation mit ihren Anforderungen innerhalb der Domäne Kommunikation separat aufgeführt. Dadurch wird ein optimales und ressourceneffizientes Simulationsergebnis ermöglicht.

Im Teilmodell Simulation-Kommunikation sollen alle Anforderungen der Applikation berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden zuvor beschriebene applikationsbezogene Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk und die Kommunikationsschnittstelle integriert. Die dadurch integrierten Applikationsanforderungen im Bereich der Kommunikation decken alle Anforderungen ab, die diese Applikation mindestens vom Kommunikations-

netzwerk fordert. Zudem beschreibt die Applikation über die Kommunikationsschnittstelle auch, welche Mindestanforderungen sie stellt, damit ihre genutzten Dienste über die Schnittstelle an das Kommunikationsnetzwerk weitergegeben werden können.

Mithilfe dieser Erweiterung des Teilmodells Simulation lassen sich zum Beispiel Anforderungsbeschreibungen der Applikationen an die Verwaltungsschale anschließen und von Simulationswerkzeugen nutzen. Bei einer Simulation des Kommunikationsnetzwerks kann dadurch die applikationsbezogene Kommunikationslast simuliert und Überlastung des Netzwerks entdeckt werden. In Tabelle 15 sind die hinterlegten Anforderungen im Teilmodell beschrieben. Durch die Verwendung des Teilmodells Simulation wird die VWS zudem mit weiteren Informationen angereichert, welche in der Tabelle hervorgehoben sind. Die Instanziierung des Teilmodells Simulation im Kontext der Kommunikationssimulation fügt den applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen neue Parameter wie IP-Adresse, OPC UA-Server, OPC UA-Client und Companion Specification hinzu. Diese sind für die Erfüllung der Kommunikationsfähigkeit nicht erforderlich, können jedoch von anderen Werkzeugen bzw. Instanzen wiederum verwendet werden. Der bidirektionale Austausch und Synchronisation mit der VWS zeigt, wie sinnvoll ein standardisiertes Vorgehen ist und Informationen aus einer spezifischen Simulationsdomäne in anderen Teilen verwendet werden können.

Tabelle 15: Anforderungen an das Kommunikationsnetzwerk und die Kommunikationsschnittstelle im Teilmodell Simulation-Kommunikation der VWS

Kommunikationsnetzwerk	Kommunikationsschnittstelle
Verfügbarkeit	Burst
Ende-zu-Ende-Latenz	Nachrichtengröße
Zuverlässigkeit	Überlebenszeit
Service-Bitrate	Transferintervall
Aktualisierungszeit	Protokoll
Beziehungsart	Übertragungsmedium
Kommunikationspartner	OPC UA-Client
IP-Adresse	Companion Spec.
OPC UA-Server	

In diesem Unterkapitel wurde der grundsätzliche Aufbau des Teilmodells Simulation-Kommunikation aufgezeigt. Eine solche Strukturierung, die den Fokus auf die domänenspezifische Simulation von Applikation legt, ist bis-

her in der VWS nicht berücksichtigt gewesen. Die Einbettung in die klare Struktur der VWS hat zudem den Vorteil, dass ein Standard hiermit geschaffen wird und Simulationswerkzeuge die Anforderungen der Applikationen nutzen können. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die in Kapitel 5.2.3 erarbeiteten Parameter applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen im Teilmodell Simulation-Kommunikation abgebildet und durch weitere dynamische Parameter ergänzt werden können.

6.4 Prototypische Implementierung eines Teilmodells in der Verwaltungsschale

Zur Verdeutlichung der Instanziierung des Teilmodells Simulation soll in diesem Kapitel das Beispiel eines FTS dienen. Das FTS entspricht dem Asset im Kontext der Verwaltungsschale. Dieses FTS erledigt mehrere Applikationen innerhalb der Produktion. Dazu gehört der Transport von Gegenständen, Abstimmung der Routenplanung mit dem Server oder Synchronisation der Bewegung mit einer Bearbeitungsstation. Jede dieser Applikation besitzt ihre eigenen Anforderungen hinsichtlich der Kommunikationsschnittstelle und des Kommunikationsnetzwerks. Deshalb wird in der Verwaltungsschale im Teilmodell Simulation unter der Kommunikationsdomäne drei verschiedene Applikationen instanziiert. In Bild 38 wird anhand der Applikation Routenplanung eines FTS gezeigt, welche Anforderungen die Applikation besitzt. Wie zuvor beschrieben kommen zusätzlich zu den applikationsbezogenen Anforderungen in einer passiven VWS nun auch Parameter hinzu, die sich durch die Instanziierung des Teilmodells Simulation ergeben. Diese sind in Bild 38 entsprechend visuell kenntlich gemacht.

Durch eine zentrale Routenplanung empfängt das FTS als OPC UA-Client in regelmäßigen Zeitabständen die aktuellsten Auftragsdaten wie Fahrroute und Ziel. Als Teilnehmer des Netzwerks wird ihm zudem eine IP-Adresse zugewiesen, über welche es innerhalb des Kommunikationsnetzwerks adressierbar ist. Der Server, mit dem das FTS kommuniziert, stellt den OPC UA-Server dar und bekommt somit ebenfalls einen Namen zugewiesen. Damit der Server und der Client die gleiche semantische Sprache sprechen, wird zusätzlich die übertragene Companion Specification von OPC UA mitgeteilt. Dieses Beispiel zeigt, dass durch die aktive Nutzung einer passiven VWS in Form einer reaktiven VWS vorhandene Informationen genutzt werden können und zusätzlich neue Parameter in die VWS integriert werden. Dadurch ist die VWS ein dynamisches Objekt, welches sich je nach Anwendung entsprechend verändert und anpasst.

Kommunikationsnetzwerk		Kommunikationsschnittstelle	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verfügbarkeit	99.999 99%	Burst	---
Ende-zu-Ende-Latenz	< 50 ms	Nachrichtengröße	1024 Byte
Zuverlässigkeit	~ 365 Tage	Überlebenszeit	100 ms
Service-Bitrate	---	Transferintervall	50ms
Aktualisierungszeit	100ms	Protokoll	OPC UA Pub/Sub
Beziehungsart	mobil - stationär	Übertragungsart	Funk - WLAN
Kommunikationspartner	Server	OPC UA Client	opc.tcp://FTS:4845
IP-Adresse	10.10.69.15	Companion Spec.	PackML
OPC UA Server	opc.tcp://Server:4845		

Bild 38: Instanziierung des Teilmodells Simulation-Kommunikation am Beispiel eines FTS mit der Applikation der Routenplanung

Mit der Definition eines neuen Teilmodells Simulation, welches domänenspezifisch die Anforderungen der Applikation abbildet und der prototypischen Instanziierung anhand eines FTS wurde die Anforderung 2.1 (Erweiterung der Verwaltungsschale) erfüllt.

6.5 Transfer der Informationen aus der Verwaltungsschale

Damit die Informationen aus der passiven VWS entnommen und in ein weiteres Werkzeug überführt werden können, bedarf es einer Schnittstelle, welche die Daten überträgt. In diesem Kapitel wird deshalb die Anforderung 2.2 (Austauschformat für Kommunikationsanforderungen) behandelt und eine Schnittstelle für diesen Transfer konzipiert und prototypisch anhand eines Beispiels umgesetzt.

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, liegen die Informationen in der passiven VWS ab. Indem die VWS bzw. ein Teilmodell mithilfe eines weiteren Werkzeugs instanziiert wird, entsteht aus der passiven VWS eine reaktive VWS. Dieser Datenaustausch muss mithilfe einer dedizierten Schnittstelle realisiert werden. Die Schnittstelle für diesen Datenaustausch muss bidirektional sein. In der einen Richtung nutzt die reaktive VWS Daten aus der passiven VWS für ihre Simulation. Die andere Richtung wiederum erwei-

tert die passive VWS durch neue Parameter, welche sich aus der Simulation ergeben.

In dieser Arbeit liegt der Fokus bei der Konzipierung der Schnittstelle Richtung Simulation. Die Anreicherung der passiven Verwaltungsschale wird daher nicht behandelt, stellt jedoch ebenso einen potenziellen Forschungsbedarf dar. Im Folgenden erfolgt daher zunächst die Konzeption der Schnittstelle und anschließend eine prototypische Implementierung anhand der zuvor vorgestellten Ergebnisse der applikationsbezogenen Anforderungen im Teilmodell der Verwaltungsschale.

6.5.1 Anforderungen an die Schnittstelle

Bei der Konzeption der Schnittstelle zum Austausch der Informationen von passiver zur reaktiven VWS gilt es die abgelegten Daten im Teilmodell Simulation zu transportieren. Wichtige Anforderungen sind dabei, dass die Daten persistent vorliegen, maschinenlesbar und in andere Werkzeuge mit geringfügigem Aufwand implementierbar sind. Für den Transport der Daten stehen in diesem Beispiel die Methode einer Dateiübertragung oder API-Schnittstelle zur Verfügung. Diese werden in Bild 39 miteinander verglichen.

Übertragungsmethode	Persistenz	Maschinenlesbar	Implementierungsaufwand
API - Schnittstelle	Sehr gut	Sehr gut	Hoher Aufwand
Datei	Sehr gut	Gut (je nach Implementierung)	Gering (je nach Format)

Bild 39: Vergleich zweier Methoden zur Übertragung von Daten über eine Schnittstelle

Eine Methode ist die feste Implementierung einer API-Schnittstelle an die passive VWS. Dadurch wäre es möglich, mithilfe eines weiteren Programms die Daten über diese Schnittstelle abzufragen. Die persistente Ablage wäre somit in der passiven VWS vorhanden und aufgrund der beschriebenen API auch maschinenlesbar abgreifbar. Einzig die Implementierung des Zugriffs auf die API in anderen Werkzeugen ist mit höherem Aufwand verbunden. Bei der zweiten Methode werden die Informationen mittels Datei transportiert. Durch eine standardisierte Dateiablage kann ebenfalls eine sehr gute Persistenz der Daten erreicht werden. Die Maschinenlesbarkeit ist im Allgemeinen als gut zu bezeichnen, hängt jedoch davon ab wie der Zugriff auf die Informationen erfolgt. Beim Punkt Implementierungsaufwand existieren verschiedene standardisierte und maschinenlesbare Formate, wie zum

Beispiel JSON und XML. Durch die Nutzung dieser Formate gestaltet sich der Aufwand beim Auslesen der Informationen als gering, da hierzu eine Vielzahl an Methoden für verschiedene Programmiersprachen existieren. Insgesamt überwiegt in Bild 39 die Übertragungsmethode in Dateiformat und wird deshalb im Weiteren definiert.

6.5.2 Konzeption der Schnittstelle

Bei der Entscheidung, ob JSON oder XML als Dateiübertragungsformat verwendet werden soll, gilt es zunächst zu analysieren, welches Format in dieser Arbeit besser geeignet ist. Beide Formate werden häufig verwendet und können sowohl von der Maschine als auch vom Menschen gelesen und interpretiert werden. JSON hat einen großen Vorteil bei der Performance, wenn es um das Einlesen großer Datenmengen geht. Aus diesem Grund wird JSON in modernen Browsern häufig vorgefunden. XML hingegen ist für den strukturierten und sequenziellen Aufbau von Daten bekannt, weshalb es sich besonders für das Ein- und Auslesen der Daten mithilfe eines Programmcodes eignet. [116]

Bei einem Vergleich beider Formate ergibt sich für die Anforderung der Schnittstelle in dieser Arbeit kein klarer Favorit. Aufgrund der sequenziellen Abarbeitung und Speicherung der Daten und vorhandener Implementierungen von XML-Pasern wird das XML-Format als Dateischnittstelle zwischen passiver und reaktiver VWS definiert. Ein großer Vorteil ergibt sich bei der Definition der Tags im XML-Dokument. Diese können entsprechend des Aufbaus der passiven VWS vergeben werden. Die nachfolgende Definition ermöglicht nicht nur den Datentransfer des Teilmodells Simulation, sondern kann analog auch für andere Teilmodelle implementiert werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Definition der Schnittstelle für das Teilmodell Simulation der Kommunikationsdomäne, weshalb die anderen Teilmodelle und Beschreibungen der Verwaltungsschale nicht adressiert werden.

In Bild 40 wird der Aufbau der XML-Struktur beschrieben. Dieser orientiert sich, wie zuvor beschrieben, an dem Aufbau der passiven VWS, damit diese persistent abgebildet wird. Entsprechend der Aufteilung innerhalb der passiven VWS lassen sich die XML-Tags definieren und implementieren. Je nachdem wie viel Teilmodelle vorhanden sind, können diese in der XML-Datei entsprechend ergänzt werden. Auch die Domänen im Teilmodell Simulation können analog zur Kommunikation erweitert werden. Weitere Applikationen werden unter dem Tag *Applications* aufgeführt. Zusätzlich zu den Tags müssen auch die entsprechenden Parameter der Kommunikationsanforderungen an das Netzwerk und an die Schnittstelle abgebildet werden. Insgesamt lassen sich dadurch sämtliche Anforderungen an das Kommuni-

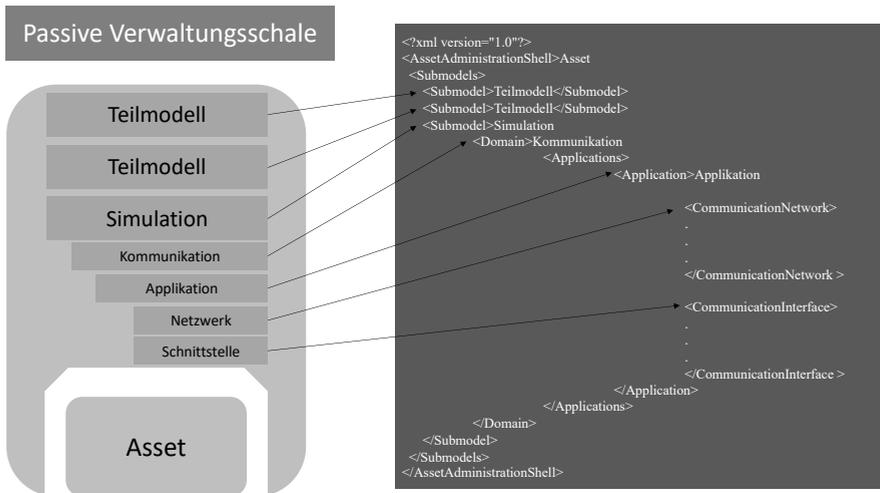


Bild 40: Aufbau der XML-Schnittstelle anhand der passiven Verwaltungsschale

kationsnetzwerk und die -schnittstelle abbilden und in einer persistenten XML-Datenstruktur hinterlegen. Die Übertragung der XML-Datenstruktur in ein Functional Mock-up Interface ist zudem gegeben. Dadurch lassen sich neben applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen auch weitere Teilmodelle in einer gemeinsamen XML-Datenstruktur ablegen und zudem erweitern, ohne dabei die Funktionalität der Informationsweitergabe zu beschränken. Aus diesem Grund ist die Struktur des Teilmodells Simulation als Baumform konzipiert, um weitere Simulationsdomänen zu integrieren.

6.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass aktuell keine einheitliche Modellierung von Kommunikationsanforderungen in der Planungsphase stattfindet. Die Nutzung der VWS bietet daher das passende Fundament, um eine einheitliche und standardisierte Definition aufzustellen. Mithilfe eines neuen Teilmodells, der Simulation, kann nun domänenspezifisch eine Anforderungsbeschreibung hinsichtlich der zugrundeliegenden Applikationen stattfinden. Dadurch können zum Beispiel Simulationen im Sinne der reaktiven Verwaltungsschale auf die Daten einer passiven VWS zugreifen und diese für den Simulationsprozess einsetzen und neue Informationen in die VWS integrieren. Mithilfe der prototypischen Implementierung konnte zudem gezeigt werden, dass applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen und Parameter, die zur Laufzeit in der Simulation entstehen, im neuen

Teilmodell untergebracht und für weitere Werkzeuge verfügbar gemacht werden können. Der Zugriff auf die Daten der passiven VWS wurde anhand einer Schnittstellenanalyse betrachtet und ein Konzept zur dateibasierten Übertragung der Informationen vorgestellt. Dadurch lassen sich die Daten persistent abbilden und der maschinenlesbare Zugriff ist aufgrund der XML-Struktur gegeben. So konnten sowohl die Anforderung A2.1 (Erweiterung der Verwaltungsschale) als auch A2.2 (Austauschformat für Kommunikationsanforderungen) in diesem Kapitel adressiert werden. Im Folgenden soll basierend auf den applikationsbezogenen Anforderungsbeschreibungen und mithilfe der Beschreibungssprachen ein Konzept zur Simulation von Kommunikationsnetzwerken in der Planungsphase vorgestellt werden.

7 Co-Simulation von komplexen industriellen Kommunikationsnetzwerken

Die Validierung des geplanten Kommunikationsnetzwerks soll mithilfe einer Co-Simulation realisiert werden. Dazu werden zunächst Anforderungen und Zielsetzungen der Co-Simulation definiert. Basierend auf den definierten Anforderungen wird die notwendige Architektur des Konzepts vorgestellt. Anschließend werden anhand einer Gewichtung von definierten Kriterien die geeigneten Simulationstools für die Co-Simulation in einer Matrix ausgewählt. Diese werden dann in das Konzept integriert wobei der Fokus auf die Änderungen innerhalb der Werkzeuge und die Definition ihrer Schnittstellen liegt. Dazu werden die ausgewählten Simulationstools und ihre Aufgaben innerhalb des Gesamtkonzepts vorgestellt. Neben den Änderungen an den Werkzeugen soll in diesem Zusammenhang auch der Informationsaustausch zwischen den Simulationen beleuchtet werden. Bezugnehmend auf bisherige Erkenntnisse in dieser Arbeit soll in diesem Kapitel untersucht werden, ob das Kommunikationsverhalten komplexer industrieller Automatisierungssysteme mittels Co-Simulation von ereignisdiskreter Materialflusssimulation und Kommunikationsnetzwerksimulation abgebildet werden kann.

In diesem Kapitel werden die Anforderungen A3.1 (Technologieunabhängige Co-Simulation) und A3.2 (Visuelle Darstellung der Kommunikationsanforderungen) der Anforderungsanalyse aus Kapitel 4.1 adressiert.

Einige Inhalte und der grundlegende Aufbau der Co-Simulation in diesem Kapitel wurden von VUKOVIC et al. [P3] und VUKOVIC et al. [P4] bereits publiziert.

7.1 Anforderungen und Zielsetzung an die Co-Simulation

Wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben, sind vorhandene Simulationstools zur Validierung von Kommunikationsnetzwerken nicht ohne Weiteres geeignet. Sie bilden dabei nicht die Flexibilität von zukünftigen APA hinreichend ab und können vom Planenden der Kommunikationsnetzwerke nicht ohne spezielle Kenntnisse bedient werden. Vorhandene industrielle Kommunikationssimulationen, wie zum Beispiel SINETPLAN, validieren das geplante Netzwerk einer Maschinenzelle mithilfe mathematischer Worst-Case-Betrachtung, benötigen jedoch für die exakte Berechnung Informationen aus der Engineeringphase. Zudem ist das System nicht ausreichend flexibel, um auf sich ändernde Anforderungen entsprechend zu reagieren. Aus diesem Grund ist es notwendig eine neue Lösung für die Validierung

des Kommunikationsnetzwerks während der Planungs- und Designphase einer APA zu konzipieren. Wie bereits im Stand der Technik analysiert wurde ermöglicht eine Verknüpfung mehrerer bestehender Simulationen einen zusätzlichen Informationsgewinn. Diese Art der Co-Simulation soll auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommen. Durch die Kombination aus der Simulation von Kommunikation und Materialfluss kann die Kommunikationssimulation um wichtige Aspekte von industriellen Anforderungen erweitert werden und somit eine aussagekräftige Validierung stattfinden. Zudem ist die Nutzung von Materialflusssimulationstools im industriellen Kontext bereits etabliert, wodurch für die Planenden eine niedrige Einstiegshürde entsteht.

Die Konzeption der Co-Simulation soll dabei an folgenden Anforderungen gemessen werden:

- Effiziente Nutzung vorhandener Materialflusssimulatoren zur Vermeidung von Mehraufwand
- Nutzung bereits vorhandener Informationen von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen in der VWS
- Co-Simulation soll bereits in der Planungsphase möglich sein
- Validierung eines geplanten Kommunikationsnetzwerks
- Visuelle Darstellung der Erfüllung von Dienstgüteparameter Latenz und Datenrate von Applikationen im Kommunikationsnetzwerk

Im Folgenden soll deshalb zunächst das Gesamtkonzept der Co-Simulation dargestellt und der zugehörige Informationsaustausch definiert werden.

7.2 Gesamtkonzept und Informationsaustausch der Co-Simulation

In diesem Kapitel soll das Gesamtkonzept und der zugehörige Informationsaustausch der Co-Simulation im Rahmen eines Simulationsframeworks beschrieben werden. Das Simulationsframework dient dazu, auf Basis eines geplanten Produktionsprogramms die Validierung des Kommunikationsnetzwerks anhand einer Simulation durchzuführen. Aus diesem Grund soll für die Simulation des Produktionsprogramms ein dedizierter Simulator für dessen Materialfluss verwendet werden. Für die Validierung des Kommunikationsnetzwerks soll auf einen Simulator gesetzt werden, der das Kommunikationsverhalten der Teilnehmer im Kommunikationsnetzwerk abbildet. Damit applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen in diesem Kontext berücksichtigt werden, bedarf es zudem eine Integration dieser Anforderungen in die Co-Simulation. Wie die einzelnen Simulatoren miteinander interagieren und welche Schnittstellen für eine umfassende Validierung des Kommunikationsnetzwerks nötig sind, wird in den folgenden Abschnitten

näher erläutert. Zunächst soll eine Betrachtung der groben Gesamtarchitektur erfolgen, welche anschließend detaillierter mithilfe eines Fundamental Modeling Concepts beschrieben wird.

7.2.1 Gesamtarchitektur

Bei der Betrachtung der Co-Simulation innerhalb des Simulationsframeworks, gilt es zunächst die Beziehungen zwischen den Teilnehmern im Framework zu definieren. In Bild 41 ist das Zusammenspiel zwischen den einzelnen Komponenten im Simulationsframework visuell dargestellt.

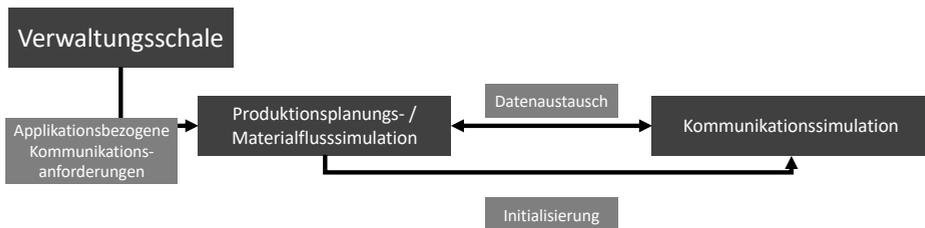


Bild 41: Zusammenspiel der einzelnen Teilnehmer im Co-Simulationsframework

Die Funktion des zentralen Elements der Co-Simulation übernimmt dabei der Simulator für den Materialfluss. Mithilfe der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen, welche in der Verwaltungsschale abgelegt sind, wird die Objektbibliothek dieses Simulators entsprechend erweitert. Die Erweiterung ist deshalb notwendig, da diese nativ keine Informationen über Kommunikationsanforderungen der Teilnehmer enthält. Die Kommunikationssimulation übernimmt die Aufgabe zur Validierung des geplanten Kommunikationsnetzwerks auf Basis des Produktionsprogramms. Da im industriellen Umfeld in der frühen Simulation von Kommunikationsnetzwerken wenig Expertise besteht, gilt es, die Simulation und Initialisierung innerhalb der Kommunikationssimulation auf einen hohen Automatisierungsgrad zu heben. Dafür soll das Modell in der Materialflusssimulationssimulation eine automatisierte Initialisierung für die Kommunikationssimulation bereitstellen. Anhand eines Datenaustausches in Echtzeit können Daten wie die Position von mobilen Applikationen, Latenz und Datenrate übermittelt und für ein optimales Simulationsergebnis essentielle Informationen ausgetauscht werden.

Für eine genauere Beschreibung der Informationsflüsse und nötigen Bausteine einzelner Akteure des Simulationsframeworks dient eine Beschreibung der Gesamtarchitektur mithilfe Fundamental Modeling Concepts (FMC) [117]. Daraus ableitend können sowohl Schnittstellen zwischen den einzelnen Bestandteilen identifiziert, als auch notwendige Methoden innerhalb

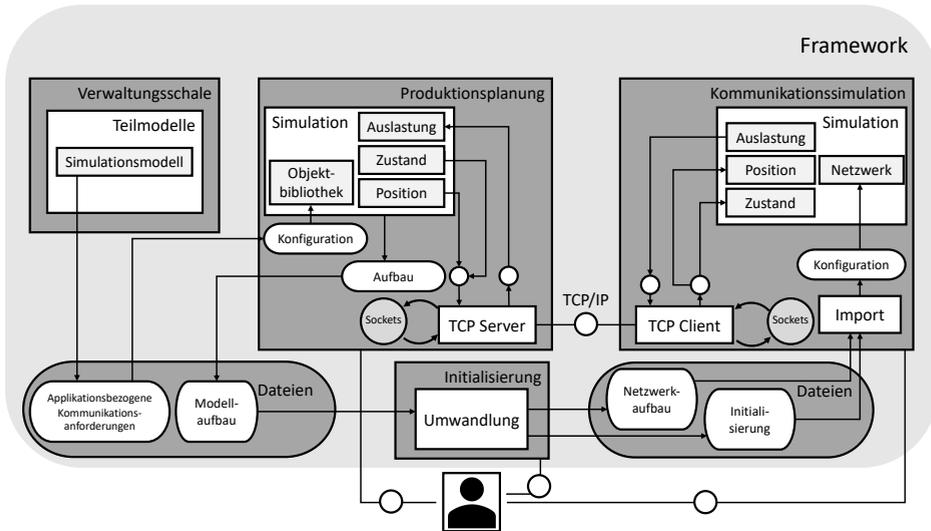


Bild 42: Gesamtarchitektur des Simulationsframeworks modelliert mit FMC [117]

der Teilnehmer definiert werden. In Bild 42 ist eine detaillierte Abbildung der Architektur mit FMC vorgenommen. Daraus resultierend sind einige Schnittstellen zwischen den Teilnehmern im Simulationsframework entstanden. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher beleuchtet. Der Akteur Mensch gilt weiterhin als Bedienender und hat dabei Interaktionen mit dem Simulator des Materialflusses und der Kommunikation sowie Initialisierung dieser Umgebung. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bestandteile und deren Aufgaben in der Gesamtarchitektur soll zunächst eine Auswahl an geeigneten Simulatoren durchgeführt werden.

7.3 Auswahl und Bewertung geeigneter Simulationswerkzeuge zur Co-Simulation

Damit eine geeignete Kombination bestehend aus Materialfluss- und Kommunikationssimulation für die in dieser Arbeit zu konzipierenden Co-Simulation gefunden werden kann, müssen zunächst verfügbare Softwarelösungen analysiert werden. Für eine strukturierte Analyse werden deshalb einige Kriterien beschrieben, die für eine Eignung des Simulators im Kontext der zuvor vorgestellten Gesamtarchitektur sprechen. Anschließend sollen verschiedene Simulationswerkzeuge dahingehend untersucht und in einer Matrix bewertet werden. Mithilfe einer geeigneten Gewichtung kann anschließend für die jeweilige Disziplin die bestmögliche Lösung gefunden werden.

7.3.1 Definition der Kriterien zur Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge

Für die Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge für die Co-Simulation bedarf es zunächst einer Festlegung geeigneter Kriterien. Mithilfe dieser Kriterien kann anschließend ein objektiver Vergleich der Simulationswerkzeuge durchgeführt und anhand einer Matrix eine geeignete Konstellation festgelegt werden. Dabei sollen die Kriterien sowohl technologische Aspekte als auch die vorhandene industrielle Durchdringung abdecken. Diese Kriterien werden im Folgenden vorgestellt.

Schnittstellen

Das Kriterium der Schnittstelle soll hauptsächlich die Simulationswerkzeuge dahingehend betrachten, welche Möglichkeiten der Anbindung externer Informationen möglich sind. Dazu gehört zum Beispiel die Option Daten mithilfe einer Datei in die Simulation zu integrieren. Basierend auf der Gesamtarchitektur soll dies mithilfe einer socketbasierten Schnittstelle zum regelmäßigen Informationsaustausch stattfinden. Dieses Kriterium ist besonders relevant, da ohne Schnittstellen nach außen keine Co-Simulation zu einem weiteren Simulationswerkzeug möglich ist.

Verbreitung

Bei der Verbreitung soll analysiert werden, inwieweit das Simulationswerkzeug bereits flächendeckend eingesetzt wird. Bei dieser Betrachtung ist es nicht relevant, ob eine Verbreitung speziell im industriellen Kontext existiert. Je höher die Verbreitung des Simulationswerkzeugs, desto besser ist die spätere Akzeptanz bei der Nutzung.

Industrielle Nutzung

Neben der speziell zu untersuchenden Verbreitung soll bei diesem Kriterium die bereits vorhandene industrielle Nutzung analysiert werden. Eine vorhandene industrielle Nutzung des Simulationswerkzeugs vermeidet dabei tiefgreifende Änderungen, da vorhandene Abläufe und Simulationen bereits für den industriellen Nutzen ausgelegt und entwickelt wurden. Durch die Nutzung vorhandener Elemente reduziert sich die spätere Wartung der konzipierten Co-Simulation und erhöht dadurch ebenso die Langlebigkeit.

Erweiterbarkeit

Falls bestimmte Abläufe, Simulationen und Schnittstellen in den Simulationswerkzeugen für den Einsatz in der Co-Simulation angepasst werden

müssen, ist das Kriterium der Erweiterbarkeit essentiell. Dabei ist es wichtig, dass die Simulationswerkzeuge bezogen auf die Gesamtarchitektur mithilfe eigener Bibliotheken und Anpassungen erweitert werden können. Simulationswerkzeuge, welche einen hohen Grad der Erweiterbarkeit bieten, können ebenso für den industriellen Kontext genutzt werden, auch wenn sie nicht speziell für diesen Zweck konzipiert bzw. entwickelt wurden.

Simulationsergebnisse

Das fünfte und letzte Kriterium soll die Ergebnisse des Simulationswerkzeugs betrachten. Dabei ist speziell darauf zu achten, dass die Simulation des Kommunikationsnetzwerks Aussagen über die Einhaltung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen treffen kann. Der Simulator den Materialfluss soll dabei Informationen über dynamische Produktionsabläufe liefern und zudem die Position von mobilen Teilnehmern in der Produktionshalle simulieren. Diese Informationen sind essentiell für eine Validierung des geplanten Kommunikationsnetzwerks. Die Kommunikationssimulation soll diese Informationen verarbeiten können und Dienstgüteparameter wie Latenz und Datenrate im Zusammenhang mit dem Kommunikationsnetzwerk darstellen könne.

Tabelle 16: Gewichtung der Kriterien zur Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge

Kriterium	Gewichtung
Schnittstellen	3
Verbreitung	1
Industrielle Nutzung	2
Erweiterbarkeit	3
Simulationsergebnisse	3

Diese fünf Parameter unterstützen im Weiteren bei der Auswahl der Simulationswerkzeuge. In Tabelle 16 ist zudem eine Gewichtung der einzelnen Parameter vorgenommen. Dadurch kann mithilfe einer späteren Bewertung eine eindeutige Entscheidung für die Verwendung geeigneter Simulationswerkzeuge durchgeführt werden. Die Gewichtung der Kriterien erfolgt dabei von 1 (weniger wichtig) bis 3 (sehr wichtig). Diese wurden entsprechend der Wichtigkeit im Kontext des Gesamtkonzepts vergeben. So ist die Schnittstelle, Erweiterbarkeit und das Simulationsergebnis mit drei Punkten gewichtet, da ohne diese Kriterien eine Nutzung in diesem Simulationsframework nicht möglich ist. Wohingegen die industrielle Nutzung der Simulatoren zwar

den Bediencomfort für den Nutzer erleichtern und die Akzeptanz fördert, jedoch nicht dem funktionalen Ergebnis beisteuert. Die Verbreitung ist mit einem Gewichtungspunkt so gewählt, dass falls zwei Simulatoren ähnliche Ergebnisse erzielen der Simulator die höchste Punktzahl erzielt, welcher die höchste Verbreitung hat. Dadurch kann die Akzeptanz des Simulationsframeworks weiterhin gesteigert werden. Je höher die Summe des Ergebnisses ausfällt, desto geeigneter ist es für den Einsatz innerhalb des Co-Simulations-Frameworks.

7.3.2 Analyse vorhandener Simulationswerkzeuge zur Materialfluss- und Kommunikationssimulation

In diesem Abschnitt werden vorhandene Simulationswerkzeuge im Bereich der Materialfluss- und Kommunikationssimulation analysiert, um sie anschließend in einer festgelegten Bewertungsmatrix einzuordnen. Die Auswahl der Simulationswerkzeuge beschränkt sich dabei auf Werkzeuge, welche bereits in der frühen Planungsphase Anwendung finden.

Materialflusssimulation

Bei der Untersuchung der Simulationswerkzeuge für den Materialfluss werden im Folgenden die Programme Simio, Plant Simulation und Arena Simulation betrachtet. Diese Materialflusssimulationswerkzeuge sind für das industrielle Umfeld konzipiert und bieten daher diverse Werkzeuge zur Simulation des Verhaltens von Maschinen und Anlagen, um eine Produktion optimal abzubilden. Des Weiteren können ebenso mobile Applikationen abgebildet werden, um die Änderung ihrer Position zu simulieren. Ebenso sind die zu erwarteten Simulationsergebnisse, wie Zustand der Maschinen und Anlagen, zeitliche Dauer eines Arbeitsvorgangs innerhalb der Maschine und die Verweilzeit von mobilen Applikationen für diese Arbeit bei allen drei Simulationswerkzeugen gleich repräsentiert. Daher wird bei der Analyse auf die drei Kriterien Schnittstellen, Verbreitung und Erweiterbarkeit eingegangen.

Simio ist eine Simulationssoftware, welche im Bereich der diskreten Materialflusssimulation unterstützt. Dieses Programm bietet diverse Schnittstellen zur Anbindung und Integration externer Daten. So bietet es neben einer spezifischen API-Schnittstelle auch die Möglichkeit eigene Schnittstellen mithilfe von sogenannten DLL (Dynamic Link Library) einzubinden. Dadurch lassen sich diverse Varianten von Schnittstellen implementieren, wenn sie vom Programm nicht nativ bereitgestellt werden. Eine dedizierte Socket-Verbindung zum dynamischen Informationsaustausch mit einem weiteren Programm ist nicht vorhanden. Vorhandene Bibliotheken können zur Abbildung der

Produktion verwendet und auch mithilfe selbst erstellter Objektbibliotheken erweitert werden. [82]

Die von der Firma Siemens entwickelte Software Plant Simulation ist ebenso für die diskrete Materialflusssimulation konzipiert. Bei der Analyse der Schnittstellen von Plant Simulation fällt auf, dass eine Vielzahl von Möglichkeiten existieren, Informationen von außen nativ einzubinden. Neben einer dedizierten XML-Schnittstelle ist auch eine spezifische API vorhanden, um Informationen in Plant Simulation zu importieren. Dabei bietet Plant Simulation auch eine große Anzahl an Kopplungsmöglichkeiten mit Schnittstellen wie zum Beispiel zu OPC UA, SQL, PLCSIM und Socket-Verbindungen. Dadurch lassen sich diverse Programme und Dienste extern anbinden und eine Kommunikation in Echtzeit realisieren. Besondere Anwendung findet Plant Simulation im europäischen und deutschen Umfeld, da das Zusammenspiel speziell mit verbreiteter Hardware (z.B. Speicherprogrammierbare Steuerungen) von Siemens nativ funktioniert. Beim Kriterium Erweiterbarkeit lässt sich ebenso feststellen, dass neben den vorhandenen Objekten auch eigene Bibliotheken zur Verwendung im Kontext der Materialflusssimulation erstellt werden können. [80]

Arena Simulation kommt ebenso aus dem US-amerikanischen Markt und wird von der Firma Rockwell Automation entwickelt. Ähnlich wie die beiden Werkzeuge zuvor, handelt es sich hierbei ebenso um eine Simulation, welchen den diskreten Materialfluss widerspiegelt. Es bietet jedoch nur eine geringe Anzahl an Möglichkeiten externe Informationen in das Simulationsprogramm zu integrieren. So existiert keine native Implementierung einer XML-Schnittstelle, um einen dateibasierten Datenimport durchzuführen. Auch Schnittstellen wie OPC UA bzw. Socket-Verbindungen sind in Arena Simulation nicht implementiert. Dies erschwert die Möglichkeit einer Kopplung mit weiteren Werkzeugen in Echtzeit. Dabei besitzt Arena Simulation eine große Durchdringung in verschiedenen Branchen und ist nicht nur auf den Bereich der Fertigungsautomatisierung bzw. Prozessautomatisierung beschränkt. Ebenso lässt sich Arena Simulation mithilfe von eigenen Objektbibliotheken anpassen und für nicht standardmäßig vorgesehene Zwecke und Anwendungen verwenden. [81]

Kommunikationssimulation

In diesem Abschnitt werden die drei diskreten Simulatoren OMNeT++, OPNET und ns-3 für Kommunikationsnetzwerke analysiert. Anders als bei den Simulationswerkzeugen zur Materialflusssimulation, sind diese Programme nicht speziell für die industrielle Nutzung im Bereich der Fertigungsautomatisierung ausgelegt. Aus diesem Grund muss speziell auf den Punkt der

Erweiterbarkeit Wert gelegt werden, da sonst die nötigen Erweiterungen nicht implementiert werden können. Dennoch existieren bereits einige wenige Implementierungen für industrielle Protokolle und Umgebungen in allen Simulatoren, weshalb von einer geringen industriellen Nutzung ausgegangen werden kann. Da es sich hier um diskrete Simulationen handelt, sind die Ergebnisse vergleichbar und für allgemeingültige Kommunikationsnetzwerke identisch.

OMNeT++ der Firma OpenSim Ltd. bietet eine Vielzahl an Schnittstellen nativ bzw. in diversen Publikationen veröffentlichten Quellcode zur eigenständigen Implementierung. Aufgrund der Open Source Architektur kann so jeder Typ von Schnittstelle integriert werden. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung im Kontext einer Co-Simulation, da dadurch eine echtzeitfähige Kommunikation mit weiteren Simulatoren ermöglicht wird. OMNeT++ ist vor allem im Bereich der wissenschaftlichen Gemeinschaft vertreten und wird dadurch kontinuierlich auf Basis neuer Kommunikationstechnologien und -protokolle angepasst und erweitert. [89]

OPNET der Firma OPNET Technologies bietet ebenso einige Möglichkeiten des Informationsimports in die Software. Auch ist es möglich mit diversen externen Programmen in Echtzeit zu kommunizieren. Da die Software jedoch nicht Open Source ist bietet sie lediglich die vom Hersteller bereitgestellten Möglichkeiten. So kann nicht garantiert werden, dass jede Software als Konterpart fungieren kann. OPNET bietet selbst die Möglichkeit eigene Modelle zu entwickeln, ist jedoch auf den internen Modellersteller limitiert. Das kostenpflichtige Programm findet seine größte Verbreitung in diversen Branchen mit Schwerpunkt auf Kommunikationstechnologie. Im wissenschaftlichen Umfeld ist der Simulator seltener anzutreffen. [90]

Der Simulator ns-3 ist im gleichnamigen Projekt ns-3 entstanden. Es handelt sich dabei genauso wie OMNeT++ um eine Open Source Software, wodurch nicht vorhandene Schnittstellen zusätzlich implementiert werden können. Insgesamt existieren hier auch einige beispielhafte Implementierungen, wie Informationen von extern importiert werden können. Die Menge ist jedoch geringer als bei OMNeT++ und auch die Verbreitung der Software ist im wissenschaftlichen Umfeld weniger ausgeprägt. Die Software bietet einige vorgefertigte Bibliotheken zur Simulation von Kommunikationsnetzwerken und lässt sich bei Bedarf ebenso erweitern und anpassen. Im Bereich der Co-Simulation ist eine geringere Anzahl an prototypischen Implementierungen und beispielhaften Architekturen vorzufinden. [91]

7.3.3 Bewertung von Simulationswerkzeugen anhand einer Matrix

Anhand der zuvor durchgeführten Analyse hinsichtlich der Bewertungskriterien, lassen sich die Simulationswerkzeuge mithilfe der Matrix in Tabelle 17 vergleichen. Die quantifizierte Bewertung erfolgt dabei analog zur vorherigen Beschreibung der Kriterien. Die Verteilung der Bewertungspunkte erfolgt von einem bis vier Punkten.

Tabelle 17: Bewertung der Simulationswerkzeuge anhand zuvor festgelegter Kriterien

Simulationswerkzeug	Schnittstellen	Verbreitung	Industrielle Nutzung	Erweiterbarkeit	Simulationsergebnisse
Simio	2	2	4	3	4
Plant Simulation	4	3	4	4	4
Arena Simulation	1	3	4	2	4
OMNeT++	4	4	1	4	4
OPNET	2	2	1	2	4
ns-3	2	4	1	3	4

Die durchgeführte Bewertung muss mithilfe der zuvor definierten Gewichtung in Tabelle 16 multipliziert und anschließend zu einer Summe addiert werden. Die entstehende Summe gibt Aussage darüber, inwiefern sich das jeweilige Simulationswerkzeug im Kontext dieser Arbeit eignet. Das Resultat der Gewichtung wird in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Bewertung der Simulationswerkzeuge nach Gewichtung der analysierten Kriterien

Simulationswerkzeug	Summe der gewichteten Kriterien
Simio	37
Plant Simulation	47
Arena Simulation	32
OMNeT++	42
OPNET	28
ns-3	33

In diesem Zusammenhang ergibt sich, basierend auf der abschließenden Gewichtung der Kriterien, dass für das Co-Simulationskonzept eine Kom-

bination aus Plant Simulation (Summe 47) und OMNeT++ (Summe 42) geeignet ist. Entscheidend ist hierbei, dass die Bewertung für die einzelnen Simulatoren gilt und nicht für die Kombination aus beiden Programmen. Beide Werkzeuge liefern in der Theorie die besten Grundvoraussetzungen, um in einer Co-Simulation miteinander zu interagieren. Basierend auf diesen Ergebnissen wird im folgenden Kapitel die Architektur und das Zusammenspiel beider Simulatoren als Co-Simulation vorgestellt.

7.4 Werkzeuge und Aufgaben innerhalb des Gesamtkonzepts

Zur Umsetzung des Gesamtkonzepts werden in diesem Kapitel die einzelnen Werkzeuge Plant Simulation und OMNeT++ näher beleuchtet. Dabei wird vor allem auf die notwendigen Änderungen der Simulationswerkzeuge eingegangen, damit sie innerhalb des Co-Simulationsframeworks PLANET die geforderten Ergebnisse liefern. Nachfolgend wird auch die automatisierte Initialisierung des Modells in OMNeT++ durch Export und Import der Daten vorgestellt und welche Informationen durch die socketbasierte Kommunikation ausgetauscht werden müssen.

7.4.1 Produktionsplanungs- und Materialflusssimulation

Wie zuvor bereits beschrieben, soll Plant Simulation im Kontext des Co-Simulationsframeworks PLANET das zentrale Element der Co-Simulation bilden. Plant Simulation definiert dabei sämtliche Schnittstellen, da es in der Produktionsplanungs- und Materialflusssimulation bereits häufig eingesetzt wird und für die Planenden vertraut ist. Dabei ist es notwendig verschiedene Informationen zu verarbeiten und für weitere Abläufe zur Verfügung zu stellen. Innerhalb Plant Simulation müssen deshalb verschiedene Aufgaben erfüllt bzw. entsprechende Methoden bereitgestellt werden.

Dabei stellt Plant Simulation folgende Informationen für die Co-Simulation bereit:

- Aufbau der APA und der genutzten Applikationen mit deren applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen
- Positions- und Zustandsveränderungen von Applikationen der APA
- Visuelle Darstellung der Auslastung des Kommunikationsnetzwerks

Folgende Informationen werden in Plant Simulation verarbeitet:

- Erweiterung der Objektbibliothek durch Applikationen aus der VWS mittels applikationsbezogener Kommunikationsanforderungen
- Verarbeitung von Dienstgüteparameter wie Latenz und Datenrate

Wie im Bild 42 zu erkennen ist, muss Plant Simulation innerhalb der Co-Simulation diverse Simulationsergebnisse und entsprechende Methoden bereitstellen. Eine davon ist die Erstellung einer benutzerdefinierten Objektbibliothek, welche applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen aus der passiven Verwaltungsschale in die Simulationsumgebung integriert. Die Planung der Produktionsabläufe kann somit unter Berücksichtigung der erstellten Applikationen innerhalb der benutzerdefinierten Objektbibliothek erfolgen. Das fertig geplante Modell wird mithilfe einer Exportfunktion für weitere Simulationswerkzeuge, zum Beispiel das in dieser Arbeit verwendete OMNeT++, im XML-Format zur Verfügung gestellt. Daraus können Informationen wie Größe der Produktion, Anzahl und Art der Applikationen und Netzwerkkomponenten sowie den jeweiligen Positionen entnommen und weiterverarbeitet werden. Innerhalb einer laufenden Simulation von Plant Simulation verändern sich zur Laufzeit diverse Parameter. Anhand eines geplanten Produktionsablaufs ändern sich Positionswerte von mobilen Applikationen. Diese gilt es mithilfe einer Socket-Verbindung extern zur Verfügung zu stellen. Dadurch können sich ändernde Zustände und Position von Applikationen über den TCP-Server publiziert werden und entsprechende Informationen zur Auslastung der Netzwerkkomponenten bzw. Einhaltung der Dienstgüteparameter innerhalb des Netzwerks empfangen werden. Der Ablauf bei einer Planung des Modells mit erweiterten Kommunikationskomponenten entspricht dem in Bild 43 gezeigten Vorgehen.

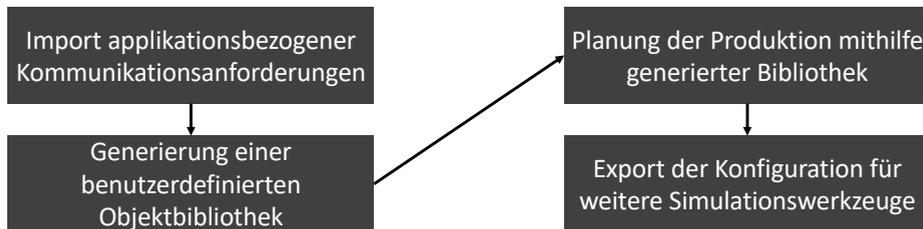


Bild 43: Reihenfolge des Aufbaus eines Plant Simulation-Modells im Kontext der Co-Simulation

Mithilfe der bidirektionalen TCP-Verbindung werden Informationen über die Auslastung und Einhaltung von Dienstgüteparameter der Netzwerkkomponenten empfangen. Damit der Planende einer Produktion über die Überschreitung von Grenzwerten der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen aufmerksam gemacht wird, soll eine farbliche Indikation der platzierten Netzwerkkomponenten erfolgen. Mithilfe von Signalfarben wird so eine Überlastung des Netzwerks visualisiert. Bei der Verwendung von Netzwerkkomponenten und Applikationen wird dabei eine technologieunabhängigkeit bereitgestellt. Dabei kann sowohl auf funkbasierten als auch auf

kabelgebundene Applikationen und Netzwerkkomponenten zurückgegriffen werden.

7.4.2 Kommunikationssimulation

Die Verwendung von OMNeT++ im Kontext der Co-Simulation soll dabei das erstellte Modell in Plant Simulation mit den enthaltenen applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen überprüfen. Da Plant Simulation nicht die Fähigkeiten zur Simulation von Kommunikationsnetzwerken mit sich bringt, übernimmt OMNeT++ diese Aufgabe. Die Einstiegshürde für die Verwendung von OMNeT++ soll dabei niedrig sein, weshalb die Initialisierung und der Simulationsablauf größtenteils automatisiert ablaufen soll.

Dabei stellt OMNeT++ folgende Informationen für die Co-Simulation bereit:

- Berechnung der Datenrate im Kommunikationsnetzwerk
- Bestimmung der Latenzen jeder Applikation
- Beurteilung der Übertragungsqualität durch Entfernung von funkbasierten Applikationen zur nächsten Funkzelle

Folgende Informationen werden in OMNeT++ verarbeitet:

- Import des Aufbaus der APA durch die bereitgestellte XML-Datei von Plant Simulation
- Positions- und Zustandsdaten von Applikationen

In Bild 42 wird der Import der entstandenen Dateien durch die Umwandlung des Plant Simulation Modells beschrieben. Für eine korrekte Konfiguration der Simulationsumgebung in OMNeT++ sind dafür zwei verschiedene Dateien nötig. Mithilfe des erstellten Kommunikationsnetzwerks werden Kommunikationsbeziehungen, Gerätetypen und Netzwerkkomponenten in das Modell integriert. Die Applikationsinitialisierung hingegen definiert die zu übertragenden Daten und welche Art von Kommunikationsprotokoll verwendet wird. Zudem wird dabei auch die jeweilige Kommunikationstechnologie dadurch festgelegt und parametrisiert. Der Konfigurationsvorgang erfolgt automatisiert über diese Dateien und bedarf keiner weiteren manuellen Anpassungen. OMNeT++ simuliert auf Paketebene den Kommunikationsverkehr über das Netzwerk. Dabei werden sowohl die Position und Entfernungen von funkbasierten Applikationen zu einzelnen Netzwerkkomponenten berücksichtigt, aber auch Zustandsänderungen in der Applikation und daraus resultierend sich ändernde Kommunikationsanforderungen. Das Ergebnis der Simulation ist dabei eine Ausgabe diverser Dienstgüteparameter bzw. Messwerte. Zum Beispiel kann dadurch die Latenz bei der Übertragung von Paketen von einer zur anderen Applikation gemessen werden. Sowohl die

externen Informationen bzgl. der Position und des Zustands von Applikationen als auch die Ausgabe von Messwerten wird über eine TCP-Schnittstelle realisiert. Der TCP-Client kann sich dabei mit einem TCP-Server koppeln und so die benötigten Informationen austauschen. Der konkrete Ablauf zur Konfiguration des OMNeT++-Modells ist in Bild 44 beschrieben.

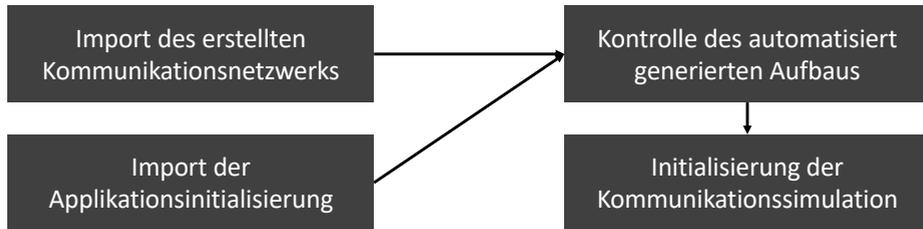


Bild 44: Reihenfolge des Aufbaus eines OMNeT++-Modells im Kontext der Co-Simulation

Die stetige Interaktion mit Plant Simulation über die TCP-Socketverbindung ermöglicht dabei eine Aktualisierung der benötigten Werte. Daraus resultierend wird in jedem Zyklus der Simulation mit den aktuellsten Informationen gerechnet. Eine dedizierte Synchronisation ist in diesem Falle nicht erforderlich, da die Simulation auf Paketebene dieser Kommunikationsebene davon nicht profitiert.

7.4.3 Konfigurationsexport und -import zur Initialisierung von OMNeT++

Wie bereits bei der Architekturbeschreibung von Plant Simulation (7.4.1) aufgezeigt, ermöglicht ein Export des Modells die Verwendung der Daten in weiteren Programmen und Simulationen. Je nach Anwendungsfall wird zwischen dem Export und Import der Daten eine Umwandlung bzw. Initialisierung benötigt. In diesem Kapitel erfolgt daher die Beschreibung der Exportdaten und die zugehörige Umwandlung zur Bereitstellung der korrekten Initialisierungsdaten für die OMNeT++ Simulationsumgebung.

Mithilfe der exportierten Daten von Plant Simulation kann im nächsten Schritt OMNeT++ diese nutzen und das Simulationsmodell automatisch generieren. Dabei werden Daten über folgende Komponenten im Plant Simulation Modell ausgeleitet:

- Produktionshalle
- Netzwerkkomponenten
- Applikationen

Die Produktionshalle liefert dabei essentielle Informationen über die jeweilige Länge und Breite des aufgespannten Modells. Dadurch lassen sich die Dimensionen der Halle ableiten. Zugehörig sind auch die Ursprungskordinaten des Modells, damit die Positionsangaben von Applikationen und Netzwerkkomponenten innerhalb des Modells entsprechend angepasst werden können. Die zweite Information im Export enthält Daten über gesetzte Netzwerkkomponenten im Modell. Hier werden sowohl die Anzahl der Komponenten abgebildet als auch welcher Typ verwendet wurde. So kann später unterschieden werden, ob ein WiFi-Access Point gesetzt wurde oder eine 5G-Basestation. Zusätzlich wird auch die Position über die platzierte Komponente exportiert, die mithilfe der vorherigen Ursprungskordinaten umgewandelt werden kann. Das letzte Element im Export bilden die Applikationen. Diese repräsentieren im Export die Teilnehmer des Kommunikationsnetzwerks. Neben den essentiellen X- und Y-Koordinaten im Modell, wird ebenso die Art der Applikationen beschrieben. Die Unterscheidung zwischen einer stationären und mobilen Applikation wird dadurch festgelegt.

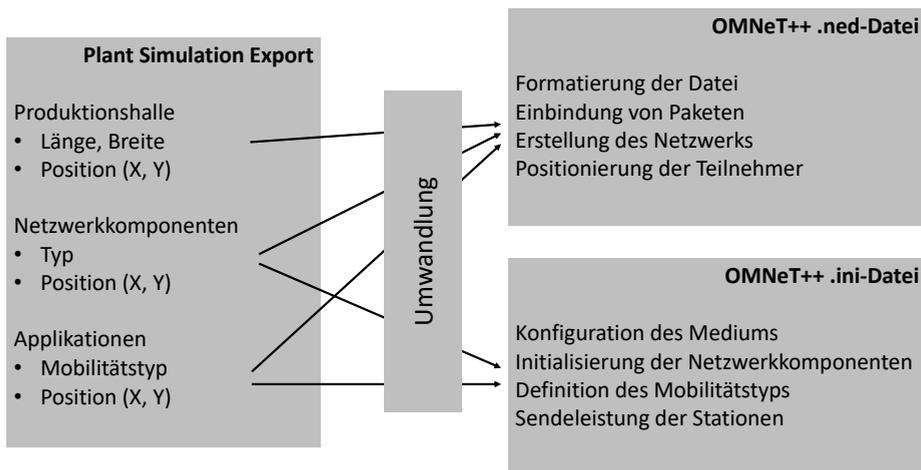


Bild 45: Umwandlung und Initialisierung des Plant Simulation Exports in OMNeT++-Dateien

In dieser Arbeit sollen diese Daten für die Initialisierung einer OMNeT++-Simulation genutzt werden. Der Hintergrund dabei ist, dass Materialflusssimulation geringe bis keine Berührungspunkte mit Kommunikationssimulationen haben und deshalb die Initialisierung automatisiert erfolgen sollte. Dies reduziert Komplexität bei der Nutzung der Co-Simulation und steigert den effektiven Nutzen. Die notwendige Umwandlung ist in Bild 45 beschrieben. OMNeT++ benötigt insgesamt für die Initialisierung der Simulation

eine .ned- und eine .ini-Datei. OMNeT++ erwartet bei der Initialisierung der Positionen eine X- und Y-Koordinate im positiven Wert. Dabei bildet die Koordinate (0,0) den Ursprung. In Plant Simulation hingegen repräsentieren die Ursprungskordinaten die Mitte des Modells. Die abgebildete Produktion ist dabei ein Teil des Modells und stellt somit nicht den Ursprung dar, weshalb eine Korrektur durchgeführt werden muss. Hierzu müssen die X- und Y-Koordinaten der platzierten Objekte in Plant Simulation jeweils um einen Korrekturfaktor verschoben werden.

Bei der Umwandlung der Dateien wird innerhalb OMNeT++ zwischen .ned und .ini unterschieden. Die .ned-Datei steht dabei für Network Description und beschreibt die Positionierung und Art der Teilnehmer. Zusätzlich wird hier das aufgespannte Kommunikationsnetzwerk definiert. Da es sich dabei um eine Datei innerhalb einer Programmierumgebung handelt, benötigt sie auch die korrekte Formatierung und Einbindung notwendiger Pakete.

Bei der .ini-Datei handelt es sich um eine Datei, welche die Konfiguration und Initialisierung des Netzwerks und ihrer Teilnehmer beschreibt. Sie dient zur Konfiguration des verwendeten Mediums indem Parameter bezüglich des Übertragungswegs definiert werden. Beispielsweise können stochastische Modelle zur Funkausbreitung hinterlegt werden. Des Weiteren erfolgt eine Definition des Mobilitätstyp der jeweiligen Teilnehmer und die Einstellung der Sendeleistung der Netzwerkkomponenten.

Beide Dateien bilden somit die Umwandlung der aus Plant Simulation extrahierten Daten und initialisieren bzw. konfigurieren ein simulationsfähiges Modell in OMNeT++. Eine genauere Konfiguration des Netzwerks und dessen Umgebung, sowie der einzelnen Teilnehmer kann anschließend spezifisch vorgenommen werden.

7.4.4 Socketbasierter Datenaustausch zur Informationssynchronisation

Der Datenaustausch zwischen Plant Simulation und OMNeT++ ermöglicht eine Aktualisierung der Simulationenwerte in kurzen zeitlichen Abständen. Für die Verbindung zwischen den beiden Simulatoren wird dabei auf eine socketbasierte TCP-Verbindung gesetzt. Der Vorteil gegenüber einer UDP-Verbindung ist der zuverlässige Transport der Daten aufgrund garantierter Zustellung mit Quittierung der Gegenseite.

Der TCP-Server wird in dieser Co-Simulation innerhalb von Plant Simulation erstellt. Dies ermöglicht eine Kopplung diverser Anwendungen an das Simulationsmodell von Plant Simulation. Da OMNeT++ ein aufgebautes Kommunikationsnetzwerk innerhalb Plant Simulation validieren soll, kop-

pelt sich OMNeT++ mittels TCP-Client an die Serverinstanz. Der Austausch neuer Daten wird alle zehn Millisekunden Simulationszeit angestoßen. Dies garantiert eine stetige Aktualität der Daten. Der Aufbau der Datenstruktur ist trotz bidirektionaler Kommunikation unterschiedlich.

Tabelle 19: Datenstruktur der bidirektionalen Übertragung von Plant Simulation zu OMNeT++

Kommunikationsteilnehmer	Parameter	Beschreibung
Access Point bzw. Basestation	Index	Index der Komponente
	Zustand	Aktueller Betriebszustand der Komponente
Applikation	Index	Index der Applikation
	Position	X- und Y-Koordinaten der Applikation
	Zustand	Aktueller Arbeitszustand der Applikation

In Tabelle 19 ist die benötigte Datenstruktur für die Übertragung von Plant Simulation zu OMNeT++ beschrieben. Die jeweiligen Kommunikationsteilnehmer werden dabei als Array hinterlegt und mittels Index auf die Daten der Teilnehmer zugegriffen. Die Übertragung des Zustands einer Netzwerkkomponente ermöglicht es dabei, zur Laufzeit eine Applikation in einen anderen Betriebszustand zu versetzen und die Auswirkungen auf das Kommunikationsnetzwerk zu evaluieren. Die stetig aktualisierte Position der Applikationen wird benötigt, damit bei mobilen Applikationen die Entfernung und Zugehörigkeit zum jeweiligen Access Point bzw. zur Basestation in der OMNeT++ Simulation entsprechend simuliert werden kann.

Tabelle 20: Datenstruktur der bidirektionalen Übertragung von OMNeT++ zu Plant Simulation

Kommunikationsteilnehmer	Parameter	Beschreibung
Access Point bzw. Basestation	Index	Index der Komponente
	Auslastung	Aktuelle Bandbreite
Applikation	Index	Index der Applikation
	Auslastung	Latenzzeit der letzten Übertragung

Analog zur Datenstruktur in Tabelle 19 wird auch die Datenstruktur in Tabelle 20 aufgebaut. Hierbei gilt es, die Simulationsergebnisse aus OMNeT++ in Plant Simulation zu übertragen. Diese beinhalten neben der Auslastung der

jeweiligen Access Points und Basesetations bzw. des Kommunikationsnetzwerks auch Dienstgüteparameter wie Latenz und Bandbreite von Applikationen. Die jeweils aktuell anliegende Bandbreite entscheidet dabei über die Auslastung der Netzwerkkomponente. Zusätzlich wird die Latenzzeit der jeweils letztens Paketübertragung analysiert und an Plant Simulation zur Anzeige weitergeleitet. In Tabelle 20 ist die Datenstruktur entsprechend aufgeführt. Plant Simulation kann anschließend die Informationen zur Auslastung nutzen und dies visuell mithilfe von farbigen Indikatoren anzeigen, damit der Planende eine Rückmeldung bezüglich der aktuellen Netzwerkplanung erhält. Entsprechend hierzu enthält ein Bericht nach Simulationsende die Ergebnisse in einer grafischen und tabellarischen Übersicht.

7.4.5 Ergebnisse der Co-Simulation

Resultierend aus der Kopplung zwischen Plant Simulation und OMNeT++ liefert die Co-Simulation entsprechende Ergebnisse zur Bewertung des geplanten Kommunikationsnetzwerks. In der Kommunikationssimulation werden sämtliche für die Kommunikation relevanten Komponenten und Eigenschaften des Kommunikationsnetzwerks betrachtet. Dies sind die Access Points bzw. Basestations, Latenzen der Applikationen und Entfernungen von mobilen Teilnehmern.

Auslastung

Die aktuelle Auslastung während der Simulation an den Access Points bzw. Basestations wird anhand der übertragenen Pakete und Paketgrößen gemessen. Falls der maximal mögliche Paketdurchsatz überschritten wird kommt es hierbei zum Paketstau in den jeweiligen Netzwerkkomponenten welcher eine höhere Latenz der Applikationen zur Folge und auch zu Paketverlusten führen kann, da die Warteschlangen in den Netzwerkkomponenten volllaufen und die nachfolgenden Pakete verworfen werden. Die resultierende Bandbreite und die jeweilige Auslastung in Prozent während der Simulation wird an Plant Simulation weitergeleitet und zur Anzeige für den Planenden gebracht.

Latenz

Die Berechnung der Latenzzeit der Applikation erfolgt mittels Paketüberwachung vom Sender bis zum Empfänger. Hierbei sind verschiedene Faktoren relevant aus welchen sich die Latenz bildet. Wie zuvor erwähnt ist eine mögliche Ursache für eine erhöhte Latenz die Auslastung an Netzwerkkomponente, welches die Paketübertragung durchquert. Ein weiterer Faktor kann jedoch auch die Entfernung zu Netzwerkkomponenten bei einer funkbasierten Übertragung sein. In der Kommunikationssimulation wird dabei sowohl die Umge-

bung, als auch die Applikationen und Netzwerkkomponenten betrachtet, damit ein realitätsnahes Ergebnis entsteht. Deshalb wird jede einzelne projektierte Applikation für sich betrachtet und die Latenz der Übertragung berechnet. Dieses Ergebnis wird ebenfalls an Plant Simulation weitergeleitet, wo es anschließend mit den importierten Daten aus der AAS verglichen und bewertet wird. Falls die Latenz der letzten Paketübertragung über 80% der maximal zulässigen Latenz liegt wird dies visuell veranschaulicht. Somit führt die Kommunikationssimulation anders als bei der Auslastung von Netzwerkkomponenten keine Bewertung der Latenz durch, da diese Informationen aus der AAS in Plant Simulation vorliegen.

Entfernung

Bei der Bestimmung der Entfernung von mobilen Teilnehmern im Kommunikationsnetzwerk gilt es den Pfad der Übertragung zu untersuchen. Die Kommunikationssimulation OMNeT++ nutzt hierzu verschiedene Pfadverlustmodelle, um eine realitätsnahe Abbildung zu ermöglichen. Dabei ist für die Signalstärke und Qualität der Übertragung bei funkbasierten Teilnehmern nicht nur die Entfernung entscheidend sondern ebenso physikalische Eigenschaften wie Reflexion, Beugung, Streuung und Absorption von elektromagnetischen Wellen. Ebenso sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit, Verluste an Hindernissen und Hintergrundrauschen bei der Simulation der Signalstärke von Bedeutung. Mithilfe verschiedener Modelle lässt sich somit eine typische industrielle Umgebung parametrieren. Da sich die Entfernung zwangsläufig auf die Latenz auswirkt wird dieses Simulationsergebnis nicht separat in Plant Simulation verarbeitet sondern als Teil der Latenz behandelt.

Mithilfe dieser Ergebnisse lässt sich das geplante Kommunikationsnetzwerk in Plant Simulation inklusive der projektierten Applikationen hinsichtlich Erfüllung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen untersuchen und dem Planenden das Ergebnis verdeutlichen.

7.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde das Konzept der technologieunabhängigen Co-Simulation im Bereich der Validierung von Kommunikationsnetzwerken von APA eingeführt. Dabei wurden zunächst benötigte Anforderungen an die Co-Simulation definiert und anschließend mithilfe einer gewichteten Matrix geeignete Simulatoren ausgesucht. Auf Basis dieser Auswahl wurde die für das Simulationsframework PLANET notwendige Architektur definiert. Dazu sind jeweils Anpassungen in Plant Simulation und OMNeT++ notwendig, um im Kontext der Co-Simulation miteinander zu interagieren. Plant Simulation wurde entsprechend um diverse Schnittstellen erweitert, um einerseits Infor-

mationen aus der VWS entgegenzunehmen und in eine benutzerdefinierte Objektbibliothek zu überführen und andererseits das geplante Simulationsmodell inklusive Kommunikationskomponenten und applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen für weitere Werkzeuge und Simulatoren zu exportieren. Mithilfe des Exports der APA von Plant Simulation kann ein automatisiert generiertes Modell in OMNeT++ erzeugt werden. Dies ermöglicht eine niedrige Einstiegshürde für Planende, welche noch keine Erfahrung mit Kommunikationssimulationen sammeln konnten. Für den Austausch von Informationen in Echtzeit ist eine socketbasierte Kommunikation mit ihren notwendigen Austauschdaten definiert worden. Dadurch tauschen die Simulationen die Simulationsergebnisse regelmäßig aus und garantieren die Aktualität der Daten. Basierend auf den Simulationsergebnissen in OMNeT++ werden in Plant Simulation dem Planenden die Einhaltung der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen und Auslastung der Netzwerkkomponenten visuell angezeigt. Sowohl Anforderung A3.1 (Technologieunabhängige Co-Simulation) als auch A3.2 (Visuelle Darstellung der Kommunikationsanforderungen) konnten in diesem Kapitel adressiert werden. Im Folgenden soll eine prototypische Implementierung und Validierung der Co-Simulation als Teil des Simulationsframeworks PLANET erfolgen.

8 Umsetzung und Validierung des Gesamtsystems

Die vorherigen Kapitel haben ein holistisches Gesamtkonzept des Co-Simulationsframeworks PLANET aufgezeigt. Mithilfe dieser Co-Simulation lässt sich ein geplantes Kommunikationsnetzwerk in der Produktion durch applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen simulieren. Der Vorteil ist, dass dadurch das Netzwerk in einem sehr frühen Stadium der Planung bereits evaluiert werden kann und somit spätere teure Folgekosten vermieden werden.

In diesem Kapitel soll deshalb das theoretisch beschriebene PLANET in seiner Gesamtheit umgesetzt und validiert werden. Zunächst soll eine prototypische Implementierung der Co-Simulation und ihrer applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen stattfinden. Anschließend wird eine Validierung anhand eines realen Anwendungsfalls im Produktionsumfeld durchgeführt.

8.1 Prototypische Implementierung

Bei der prototypischen Implementierung soll die Co-Simulation in ihrer Gesamtheit implementiert und getestet werden. Zudem sollen ebenso erste Simulationen und Berechnungen des Kommunikationsnetzwerks durchgeführt werden. Deshalb werden zunächst die notwendigen Anpassungen an Plant Simulation und OMNeT++ erläutert, um anschließend ein prototypisches Modell aufzubauen. Anschließend wird die Technologieflexibilität der Co-Simulation demonstriert, um darauf aufbauend mithilfe eines geplanten WiFi-Netzwerks das erste Simulationsszenario aufzubauen und Ergebnisse abzuleiten.

8.1.1 Anpassungen Plant Simulation

Damit Plant Simulation im Kontext der Co-Simulation die notwendigen Simulationsergebnisse aufbringen kann, müssen dazu einige Anpassungen im Plant Simulation-Modell durchgeführt werden. Dazu gehören unter anderem die nachfolgend beschriebenen Methoden und Schnittstellen.

ImportAAS_Interface stellt die Schnittstelle für den Import der passiven Verwaltungsschale und den zugehörigen Applikationen im Simulationsmodell bereit. Die zugehörige Methode *ImportApplications* wertet die ausgewählte XML-Datei aus und erstellt daraus die Applikation mit den applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen, welche anschließend in der Biblio-

thek zur Auswahl stehen. *ExportModel_Interface* definiert die Schnittstelle für den Export des erstellten Plant Simulation-Modells in eine XML-Datei für die weitere Verwendung in anderen Werkzeugen bzw. Simulation. Die Methode *ExportModel* filtert die hierfür notwendigen Informationen aus dem geplanten Modell und bereitet sie in einer XML-Struktur auf. Sowohl die Methoden *SendTCP* und *ReceiveTCP* als auch die Variablen *MessageSent* und *MessageReceived* werden für den Datenaustausch mittels TCP-Kommunikation zwischen OMNeT++ und Plant Simulation benötigt.

Mithilfe eines entsprechenden TCP Servers werden die zuvor genannten Methoden bzw. Variablen an OMNeT++ verschickt und empfangen. In diesem Beispiel wird sowohl Plant Simulation als auch OMNeT++ auf dem gleichen Simulationsrechner betrieben, weshalb der Host die IP-Adresse 127.0.0.1 (localhost) besitzt. Die Protokollart entspricht dabei TCP und der Port wird auf 1986 festgelegt. Beim Empfang der Informationen soll die Methode *ReceiveTCP* zur weiteren Bearbeitung der Daten aufgerufen werden und Plant Simulation als TCP Server fungieren.

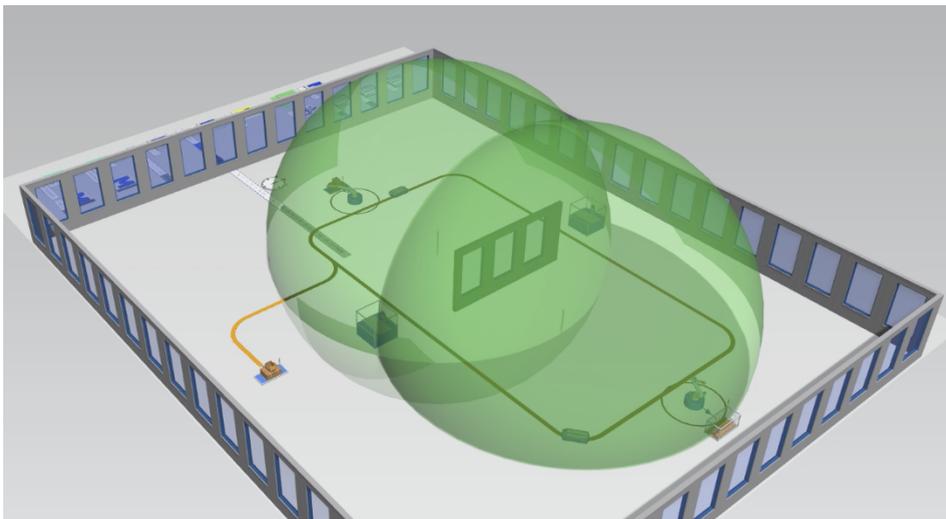


Bild 46: 5G Basestation und WiFi-Access Point als kugelförmiges Objekt in Plant Simulation

Neben den Schnittstellen und Methoden werden auch neue Bibliothekselemente benötigt, um die jeweiligen Netzwerkkomponenten zu platzieren. Hierzu sollen die funkbasierten Stationen als neu definierte Objekte nutzbar sein. Die Platzierung der funkbasierten Netzwerkkomponenten ist dabei entscheidend, da diese in der späteren Modellerstellung in OMNeT++ für eine Kommunikationssimulation entscheidend ist. Da sowohl WiFi- als auch 5G-Netzwerke mittels dieser Co-Simulation abgedeckt werden sollen, werden

die Objekte *AP_WiFi* und *BS_5G* in der Bibliothek angeboten. Dabei handelt es sich wie in Bild 46 zu sehen ist um kugelförmige Objekte, welche initial die Farbgebung Grün enthalten. Diese sollen aufgrund ihrer Form den ausgeleuchteten Bereich repräsentieren. Entsprechend der zurückgemeldeten Auslastung des Netzwerks können die Farben angepasst werden und somit den Zustand der Applikationen in dieser Zelle visuell bzw. der Auslastung der Netzwerkkomponente darstellen.

Für die jeweils passende Einfärbung der funkbasierten Netzwerkkomponenten *AP_WiFi* und *BS_5G* sind zwei unterschiedliche Methoden zuständig. Die Methode *ApplicationRequirements* ist für den Vergleich der zurückgemeldeten Dienstgüteparameter von OMNeT++ über die TCP-Verbindung zuständig. Diese entscheidet darüber, ob die Anforderungen erfüllt sind, sich an der Grenze befinden oder überschritten wurden. Die Methode *NetworkColor* färbt dementsprechend die platzierten Netzwerkkomponenten in die Farben grün, gelb und rot ein, um den Status der Applikation innerhalb einer Zelle zu visualisieren.

8.1.2 Anpassungen OMNeT++

Zusätzlich zum Import der zwei benötigten Dateien *.ned* und *.ini* aus der Umwandlung des Plant Simulation-Modells, müssen noch weitere Anpassungen für eine automatisierte Co-Simulation zwischen OMNeT++ und Plant Simulation erfolgen.

Der TCP Client ist der Bestandteil zur echtzeitfähigen Kommunikation und Kopplung zum TCP Server von Plant Simulation. Da dieser nativ in OMNeT++ nicht vorliegt wird er mithilfe der Dateien *TcpClient.h* und *TcpClient.cc* der Umgebung hinzugefügt. Dadurch kann die Verbindung zu Plant Simulation mit der IP Adresse *127.0.0.1* sowie Port *1986* konfiguriert und die Nachrichten mit einer Puffergröße von *512* Kilobyte der Kommunikation festgelegt werden.

Das Modul *DynamicClients.cc* ist dabei für die Initialisierung und Aufrechterhaltung der TCP Verbindung zuständig. Des Weiteren werden hier die empfangenen Daten der Kommunikation mit Plant Simulation verarbeitet und neu empfangene Positionen von mobilen Applikationen mithilfe von Formeln umgerechnet. Im Anschluss werden auch die jeweils aktuellen Dienstgüteparameter aus dem vorherigen Simulationsschritt bereitgestellt und der Sendevorgang an den TCP Server von Plant Simulation angestoßen.

OMNeT++ besitzt nativ verschiedene Mobilitätsmodelle, um die Bewegung einzelner Netzwerkteilnehmer zu simulieren. Diese sind jedoch für die hier verwendete Co-Simulation nicht verwendbar, da der Positionswert von extern (Plant Simulation) vorgegeben werden soll. Dadurch ergibt sich die Notwen-

digkeit für eine Erstellung eines neuen Mobilitätsmodell für diesen Anwendungsfall. *PlantSimMobility.h*, *PlantSimMobility.cc* und *PlantSimMobility.ned* schließen dabei diese Lücke und lassen eine Veränderung der Positionsdaten über die zuvor beschriebene TCP-Schnittstelle zu. Dadurch wird nach jedem Empfang neuer Daten die Position entsprechend mithilfe der Funktion *PlantSimMobility::move()* zur Neuberechnung der Positionsdaten angepasst, um so für eine funkbasierte Kommunikationssimulation die notwendige Ausgangssituation zu schaffen und die aktuellsten Positionsdaten zu simulieren.

Damit die TCP Schnittstelle Daten aus der Simulation senden und neue Informationen von Plant Simulation empfangen kann, wird zusätzlich ein Ablageort für diese Daten benötigt. Dieser wird mithilfe von *PlantSimData.h* und *PlantSimData.cc* realisiert. Hier können sämtliche Daten abgelegt und gespeichert werden, welche nicht für die Simulation direkt benötigt werden, jedoch für die Co-Simulation im Gesamtkontext essentiell sind. Dazu gehören unter anderem auch Werte über die Modellgröße und Position von Plant Simulation für eine Umrechnung der Positionsangaben der Applikation. Auch die simulierten Dienstgüteparameter werden hier zwischengespeichert, um beim nächsten Sendevorgang von der TCP Verbindung verarbeitet zu werden.

Die letzte Anpassung findet im Modul *TcpSinkApp.cc* statt. Diese ist essentiell für eine Aufnahme und darauffolgende Speicherung der Dienstgüteparameter beim Sendevorgang von Daten. In diesem Beispiel werden Pakete des TCP-Telegramms untersucht und analysiert, wie lange ein Paket zum Beispiel von der Quelle bis zur Senke benötigt hat. Daraus lässt sich die entstandene Ende-zu-Ende-Latenz berechnen und an Plant Simulation senden. Jedes Telegramm setzt beim Versenden einen *Tag* seiner Erstellungszeit, welches bei der Ankunft mit der aktuellen Simulationszeit verglichen wird. Daraus ergibt sich die benötigte Dauer durch das Kommunikationsnetzwerk. Analog hierzu können ebenso weitere Dienstgüteparameter ausgewertet und für die Co-Simulation bereitgestellt werden.

8.1.3 Modellaufbau anhand der beispielhaften Produktion

Für eine prototypische Implementierung der Co-Simulation wird zunächst eine beispielhafte Produktion benötigt. Diese sollte in diesem Szenario einige Applikationen abdecken, um das Kommunikationsnetzwerk entsprechend zu validieren. Hierzu soll die zuvor beschriebene Produktion in Kapitel 5.3 als Grundstruktur herangezogen werden. In Bild 47 ist die entsprechende Implementierung der Produktion vorzufinden.

Die Produktion selbst besitzt vier verschiedene Bearbeitungsstationen, welche die Applikation einer direkten MES-Anbindung zum Austausch von

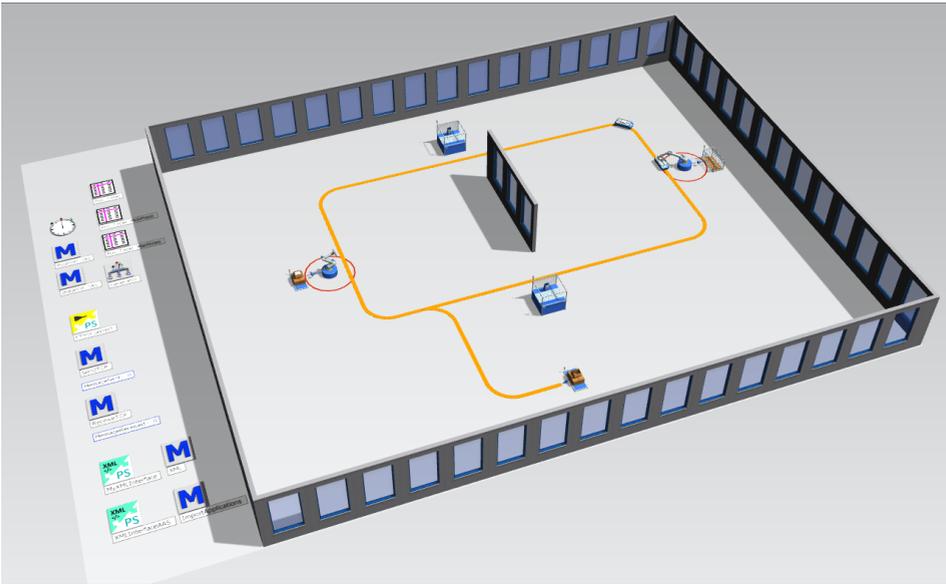


Bild 47: Aufbau einer beispielhaften Produktion zur prototypischen Implementierung in Plant Simulation

Prozess- und Produktionsdaten repräsentieren. Des Weiteren sind zwei autark fahrende FTS vorzufinden, die entsprechend der eingezeichneten Route eine fixe Bahn abfahren. Die projektieren FTS repräsentieren jeweils zwei verschiedene Applikationen in der Produktion. Bei der einen Applikation handelt es sich um die Auswertung von Bilddaten zur Objekterkennung entlang der Route, wohingegen die zweite Applikation den Informationsaustausch für die Auftragssteuerung mit dem Server abbildet. In der Mitte der Produktion wird eine Wand platziert, welche durch eine Nicht-Sichtverbindung die funkbasierte Kommunikation beeinflussen soll. Die zugehörige Umzäunung der Produktion entspricht dabei der jeweiligen maximalen Modellgröße und ist für die nachfolgende Umrechnung der Positionsdaten in OMNeT++ entscheidend. Wie im linken Teil des Modells zu sehen ist, sind hier ebenso die jeweiligen Anpassungen in Plant Simulation durchgeführt, um die notwendigen Methoden und Schnittstellen einzupflegen.

8.1.4 Technologieflexibilität in der Co-Simulation

Entsprechend der ausgewählten und platzierten Netzwerkkomponenten in Plant Simulation muss seitens OMNeT++ die passende Technologie simuliert werden. Deshalb bietet die hier vorgestellte Co-Simulation eine Technologieflexibilität bei der Auswahl zwischen WiFi und 5G. Analog dazu können

auch weitere Technologien zur Nutzung innerhalb von OMNeT++ hinzugefügt werden.

Neben der verwendeten Kommunikationstechnologie ist auch die Umgebung für eine aussagekräftige Simulation der Funkkommunikation entscheidend. Deshalb muss zunächst das Übertragungsmedium in OMNeT++ parametrierbar werden. Die zugehörigen Parameter sind in Tabelle 21 beschrieben.

Tabelle 21: Parametrierung des Mediums, welches die Funkwellen beeinflusst

Parameter	Wert
Ausbreitung	Konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit
Pfadverlust	Rician Fading
Hindernisverlust	Dielektrischer Verlust
Hintergrundrauschen	Isotropes skalares Rauschen mit -110dBm

Die jeweils vorhandenen Unterschiede bei der korrekten Parametrierung der physikalischen Schicht werden im Folgenden näher erläutert.

Kommunikationstechnologie WiFi

Bei der Parametrierung der WiFi-basierten Simulation muss vor allem die genutzte physikalische Schicht korrekt parametrierbar werden, da sonst die entstehenden Simulationsergebnisse keine Aussagekraft besitzen. Das WiFi Netzwerk wird dabei von zwei verschiedenen Access Points aufgespannt, welche automatisch eine Übergabe des WiFi Clients durchführen, falls dieser den Empfangsbereich des Access Points wechselt. Dazu benötigen die Access Points jeweils getrennte SSID, welche das aufgespannte Netzwerk benennen. Dabei spielt auch der Abstrahlwinkel der verbauten Antenne auf die Access Points und die Clients eine Rolle, da anhand dessen der zugehörige Abstrahlwinkel der Funkwellen definiert wird. In diesem Beispiel werden sogenannte Isotropstrahler verwendet. Der Abstrahlwinkel entspricht dabei einer Kugelform, bei der die Wellen im dreidimensionalen Raum gleichmäßig abgestrahlt werden. Je nach Konfiguration in der Produktion ist durch eine veränderte Antennenwahl auch eine gezieltere Abdeckung der Produktionsumgebung möglich. Zusätzlich ist auch die Sendeleistung der WiFi-Komponenten wichtig, um die Reichweite und Abdeckung simulieren zu können.

In Bild 48 ist die beschriebene Konfiguration des WiFi-Netzwerks vorgenommen und das Plant Simulation-Modell importiert. Entsprechend der Konfiguration wird mittels blauer Kreise die theoretische Reichweite der Isotropstrahler

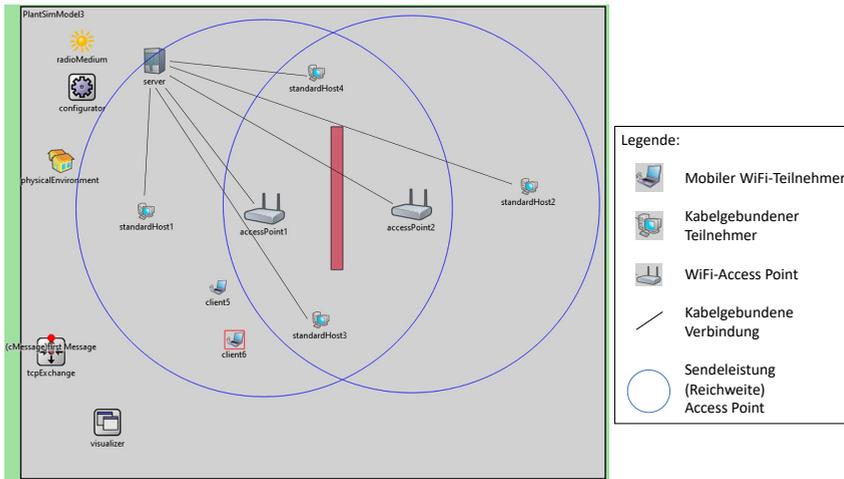


Bild 48: Abbild der spezifischen Konfiguration des WiFi-Netzwerks in OMNeT++ basierend auf dem zuvor definierten Plant Simulation-Modell

im zweidimensionalen Raum eingezeichnet. Für die Simulation auf Basis von WiFi wird dabei die von OMNeT++ bereitgestellte *inet* Bibliothek zur Verfügung gestellt.

Kommunikationstechnologie 5G

Ähnlich zur Konfiguration bei WiFi-Netzwerken, muss auch bei einem 5G-Netzwerk die physikalische Schicht definiert werden. Da es hierbei primär um einen Mobilfunkstandard handelt, sind stellenweise andere Bezeichnungen oder gänzlich unterschiedliche Parameter vorhanden. Bei einem 5G-Netzwerk wird das Netzwerk in diesem Beispiel mittels zwei verschiedener Base Stations aufgespannt. Diese ermöglichen ebenso eine nahtlose Übergabe der User Equipments (UE) - äquivalent zu den WiFi-Clients - zwischen den Base Stations, falls diese den Empfangsbereich wechseln. Bei den Antennen zur Definition des Abstrahlwinkels werden die bei der WiFi-Konfiguration bereits verwendeten Isotropstrahler genutzt. Ähnlich verhält sich dies auch bei der Sendeleistung, wobei diese im 5G-Beispiel sowohl bei den Base Stations und den UE separat konfiguriert werden kann. Durch eine ähnliche Konfiguration lassen sich anschließend beide Technologien optimal zueinander vergleichen.

Dabei ist in Bild 49 die unterschiedliche Konfiguration sichtbar. Die Base Stations benötigen für eine reibungslose Übergabe der UEs eine direkte Verbindung zueinander. Zudem ist die User Plane Function (UPF) als eine der Basisfunktionen eines 5G-Basisnetzwerks vorhanden. Sie ist für die Weiter-

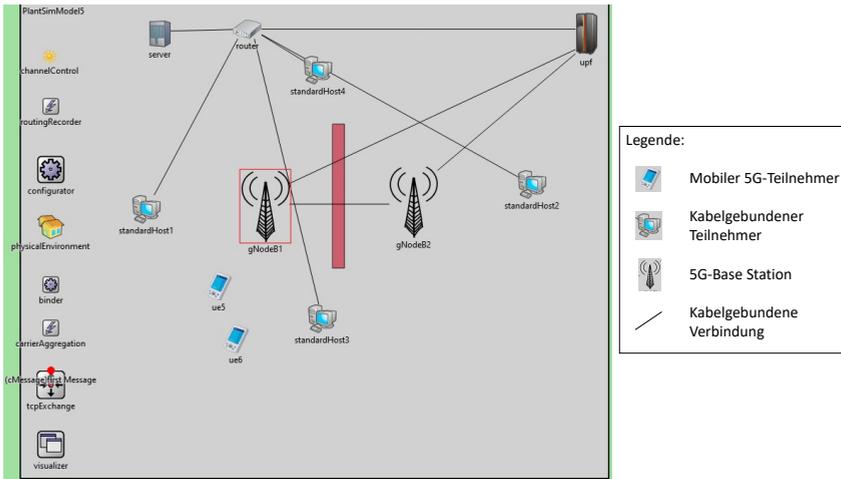


Bild 49: Abbild der spezifischen Konfiguration des 5G-Netzwerks in OMNeT++ basierend auf dem zuvor definierten Plant Simulation-Modell

leitung und Routing der Pakete sowie QoS-Behandlung zuständig [118]. Da in OMNeT++ eine native 5G-Unterstützung noch nicht vorhanden ist, wird auf eine eigens für 5G-Simulationen entwickelte Bibliothek zurückgegriffen. Mithilfe von *Simu5G* lassen sich bereits zu diesem Zeitpunkt 5G-Netzwerke effektiv parametrieren und im Kontext dieser Co-Simulation validieren [119, 120].

8.1.5 Simulationsszenario und -ergebnisse

Für die zuvor vorgestellte beispielhafte Produktion soll in diesem Kapitel ein entsprechendes Simulationsszenario erstellt werden und die entstehenden Ergebnisse bewertet werden. Dazu wird das Simulationsszenario anhand einer bestimmten Applikation durchgeführt, die wie folgt definiert wird.

Ein FTS empfängt in Zeitabständen von einer Sekunde neue Auftragssteuerungsdaten vom Server. Dabei handelt es sich um eine mobil-stationäre Beziehungsart, da der Server einen festen Standort besitzt und das FTS sich durch die Produktion entlang der vorgegebenen Route bewegt. Die Übertragungsart findet dabei aufgrund der mobilen Anforderungen mit Funk statt. Zusätzlich sollen die Daten mittels TCP-Protokoll übertragen werden. Die gesamte Nachrichtengröße entspricht dabei 1000 Byte und die maximale Ende-zu-Ende-Latenz soll 20 Millisekunden nicht überschreiten. Zusammenfassend beschrieben sind die applikationsbezogenen Anforderungen dieser Applikation im Anhang 57. Anhand des Kommunikationstechnologie-Portfolios von industriellen Applikationen aus Kapitel 5.4 ist zu entnehmen,

dass eine Machbarkeit mittels Funk gegeben ist, weshalb in diesem Beispiel das Szenario mit WiFi umgesetzt wird.

Entsprechend dieser Applikationsbeschreibung erfolgt die Initialisierung der Simulation in Plant Simulation und OMNeT++. In Bild 50 ist das daraus entstehende Simulationsergebnis sichtbar.

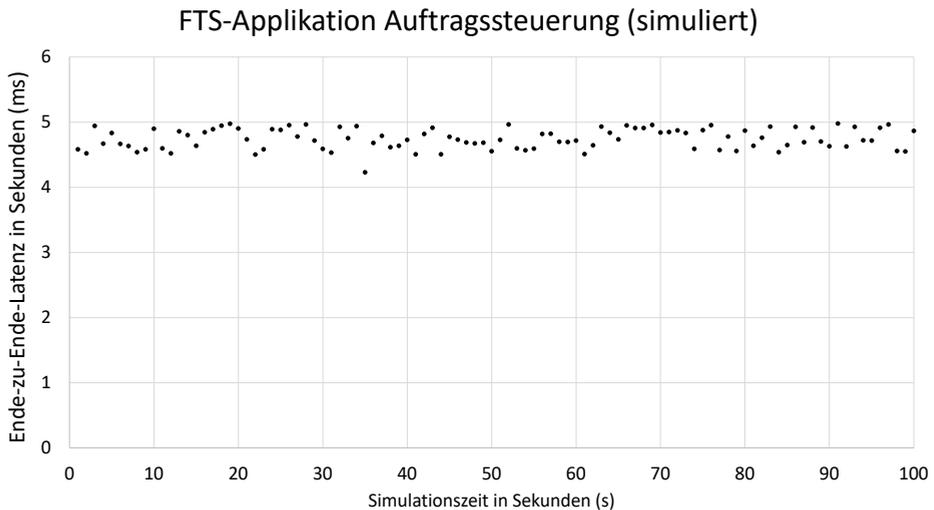


Bild 50: Simulationsergebnisse in OMNeT++ bei der Validierung des geplante Kommunikationsnetzwerks anhand einer FTS-Applikation

Zu sehen ist der Verlauf der Ende-zu-Ende-Latenz von der Quelle (Server) bis zur Senke (FTS-Applikation), welche durch die Paketanalyse in der OMNeT++-Simulation entsteht. Daraus lässt sich über einen Zeitraum von 100 Sekunden beobachten, ob die Latenz während der Simulation über den angestrebten 20 Millisekunden liegt, welche in den applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen beschrieben sind. Anhand des Bilds 50 lässt sich erkennen, dass die angestrebte Ende-zu-Ende-Latenz über den kompletten Zeitraum eingehalten wird. Daraus lässt sich ableiten, dass das für diese Applikation ausgelegte Kommunikationsnetzwerk ausreichend dimensioniert ist.

Zusätzlich zu den Auswertungen in OMNeT++ wird den Planenden direkt in Plant Simulation das Ergebnis visuell zur Laufzeit dargestellt. Dadurch wird zu jedem Zeitpunkt der Simulation erkannt, ob die Einhaltung der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen stattfindet. In Bild 51 ist der Zeitpunkt der Simulation festgehalten, an dem die OMNeT++ Simulation eine Überschreitung der Ende-zu-Ende-Latenz festgestellt hat. Solange dieser Wert kleiner als die Überlebenszeit der Applikation ist, wird dies mit der

Farbe Gelb markiert. Ist der Wert größer als die konfigurierte Überlebenszeit, so wird die jeweilige Netzwerkkomponenten, in der die Überschreitung stattgefunden hat, rot eingefärbt.

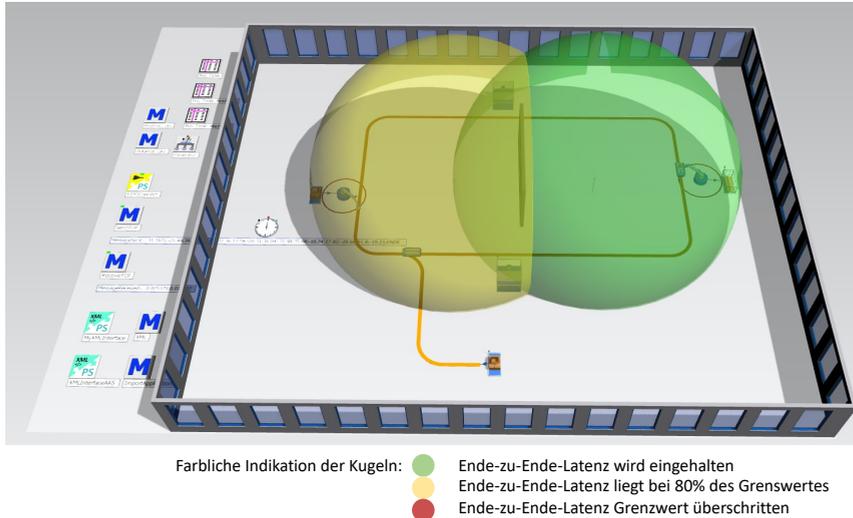


Bild 51: Farbliche Anzeige der eingehaltenen Latenzgrenzen in Plant Simulation bei der Validierung des geplante Kommunikationsnetzwerks anhand einer FTS-Applikation

In diesem Beispiel soll prototypisch gezeigt werden, wie konfigurierte applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen in Plant Simulation anhand der OMNeT++ Simulation überprüft und visualisiert werden können. Die Durchführung erfolgt analog für sämtliche Kommunikationsanforderungen einer Applikation.

8.2 Validierung der Simulation anhand eines realen Anwendungsfalls

Die zuvor simulierten Ergebnisse der Ende-zu-Ende-Latenz sollen in diesem Kapitel anhand eines realen Anwendungsfalls validiert werden. Dazu wird zunächst ein Validierungsszenario vorgestellt anhand dessen Messungen des Kommunikationsaufkommens durchgeführt und bewertet werden.

8.2.1 Validierungsszenario

Das Validierungsszenario soll die simulierte Applikation bestmöglich widerspiegeln. In diesem Zusammenhang wird zunächst ein Hardwareaufbau vorgenommen, welcher das generierte Paketaufkommen repräsentiert. Zwei SPS dienen hier als Quelle und Senke der Applikationskommunikation. Eine

SPS repräsentiert dabei den Server, welcher die Auftragssteuerungsdaten übermittelt und die andere das FTS, welches diese Daten entgegennimmt und verarbeitet. Entsprechend der vorherigen Simulation werden dafür 1000 Byte große TCP-Pakete im Sekundentakt übertragen.

Damit das Szenario validiert werden kann, wird eine dedizierte Netzwerkanalyse benötigt, welche die über das Netzwerk übertragenen Pakete analysieren kann. Zusätzlich wird ein Access Point für den Server und ein Client für das FTS benötigt, um eine Funkverbindung herzustellen. Die Verbindung wird, wie bei der Simulation, nach dem IEEE 802.11n Standard hergestellt. Der Aufbau und die zugehörigen Verbindungen sind in Bild 52 beschrieben.

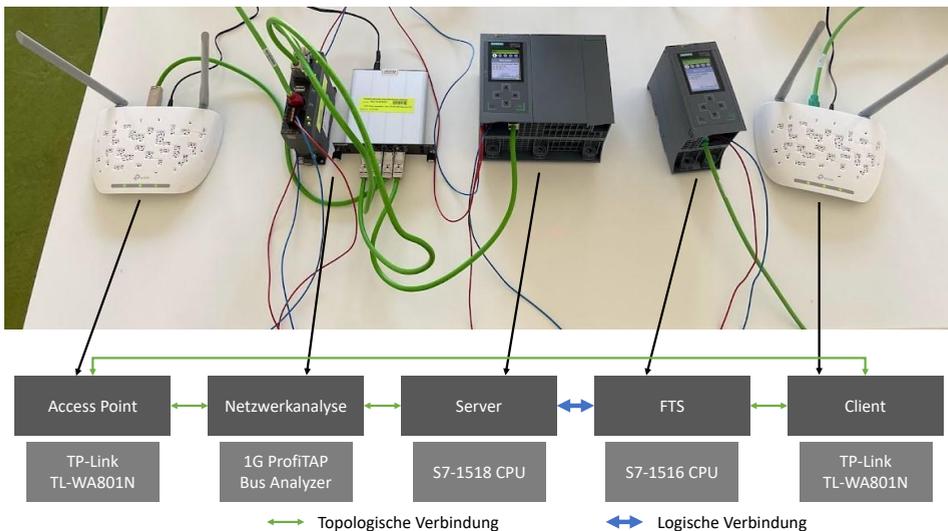


Bild 52: Hardwareaufbau für die Validierungsmessung der FTS-Applikation

Anhand der topologischen Verbindung ist die Netzwerkverkabelung im Hardwareaufbau ersichtlich. Zwischen dem Access Point und dem Server ist die benötigte Netzwerkanalyse geschaltet. Diese dupliziert mithilfe des 1G-ProfiTAPs die gesendeten Pakete und leitet diese an den Bus Analyzer weiter, welcher die empfangenen Pakete aufzeichnet. Diese Konstellation ermöglicht eine störungsfreie Analyse der Kommunikation ohne diese durch die aktive Teilnahme am Kommunikationsgeschehen zu beeinflussen. Die gesendeten TCP-Pakete werden vom Client empfangen und direkt an das FTS weitergeleitet. So setzt sich die logische Verbindung zwischen Server und FTS zusammen.

Für eine realitätsnahe Abbildung der Ende-zu-Ende-Latenz wird dieser Hardwareaufbau in einer produktionsnahen Umgebung aufgebaut. Dadurch wer-

den die eingestellten Umgebungswerte in der Simulation optimal widergespiegelt. Der Abstand zwischen Access Point und Client beträgt 30 Meter zueinander, was dem Abstand in der Simulation entspricht.

8.2.2 Messung des Kommunikationsaufkommens

Zur Messung des Kommunikationsaufkommens wird eine Initialisierung der TCP-Kommunikation benötigt. Die Aufzeichnungsdauer beträgt entsprechender Simulation 100 Sekunden. Während dieser Zeit überträgt der Bus Analyzer die aufgezeichneten Pakete zum Auswertetool Wireshark. Hierdurch lassen sich die kompletten 100 Sekunden in einer Datei speichern, um sie auch im Nachhinein auszulesen und zu analysieren.

Da nur an einer bestimmten Stelle gemessen wird, muss für die Berechnung der Ende-zu-Ende-Latenz zunächst die Route der TCP-Pakete betrachtet werden. Diese wird in Bild 53 graphisch dargestellt.

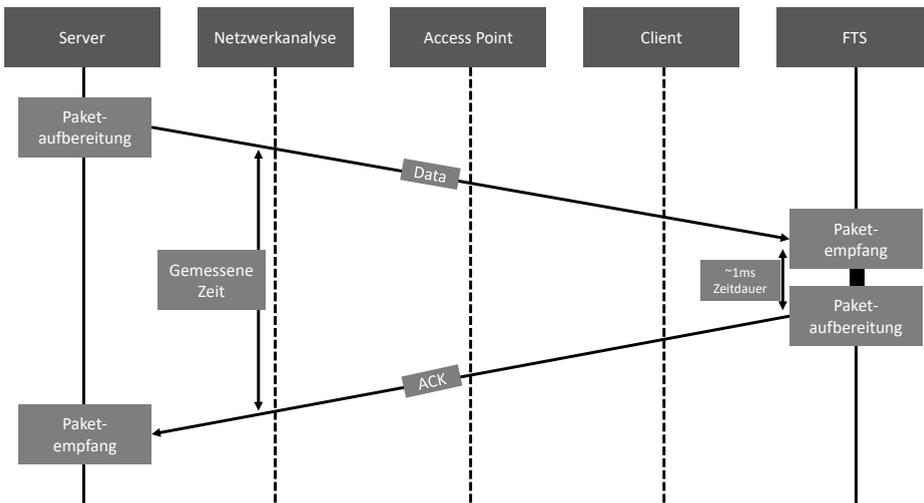


Bild 53: Messung der Paketlaufzeit in der Netzwerkanalyse

Der Server sendet 1000 Byte an Daten Richtung Client. Diese passieren sowohl die Netzwerkanalyse, wo das erste Mal die Zeit erfasst wird. Nach der Übertragung von Access Point zu Client erreicht das Paket das FTS. Entsprechend der TCP-Architektur wird nach erfolgreichem Empfang der Daten eine Bestätigung an den Server zurückgeschickt. Die Dauer zwischen Empfang und dem Senden neuer Daten beträgt in diesem Szenario im Durchschnitt eine Millisekunde. Nachdem die Bestätigung (ACK) die über den Funkstrecke die Netzwerkanalyse wieder passiert, wird die zweite Zeit

gestoppt und das Paket an den Server übermittelt. Die gemessene Zeit ergibt sich nun aus der kompletten Funkstrecke von Netzwerkanalyse bis FTS inklusive der Verarbeitungszeit innerhalb des FTS. Um die einfache Wegstrecke inklusive der Verarbeitungszeit zu berechnen, wird folgende Formel verwendet:

$$t_{\text{EinfacheWegstrecke}} = \frac{t_{\text{ACK}} - t_{\text{Data}}}{2} \quad (3)$$

Die Anwendung der Gleichung 3 auf den kompletten Beobachtungszeitraum der Aufzeichnung ergibt das Diagramm in Bild 54. Es ist zu sehen, dass während der gesamten Aufzeichnungsdauer der Wert relativ konstant um die fünf bis sechs Millisekunden bleibt.

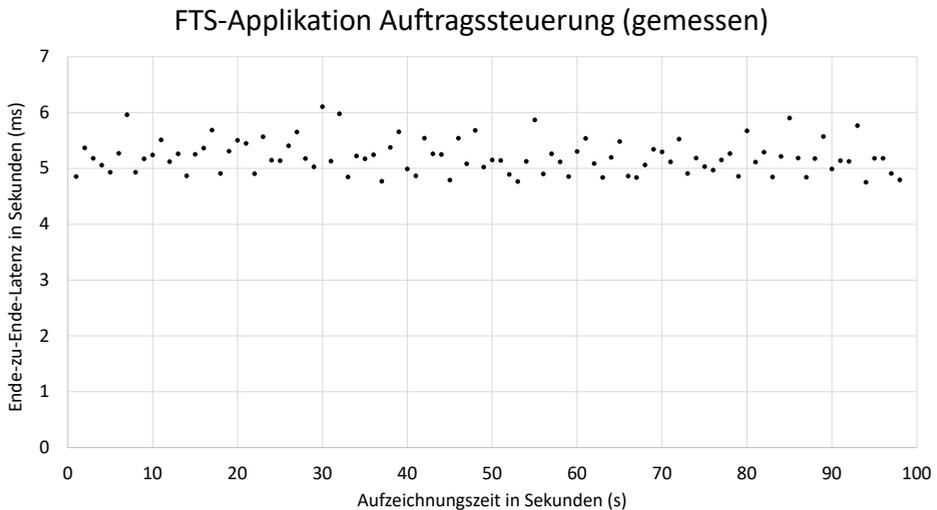


Bild 54: Dauer der einfachen Wegstrecke der gemessenen FTS-Applikation im realen Produktionsumfeld

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen aus OMNeT++ in Bild 50 wird in Bild 54 ein ähnliches Messergebnis erzielt. Dieses ist um ungefähr 0.5 bis eine Millisekunde höher, als die simulierten Werte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in der Kommunikationssimulation die Verarbeitungszeit des FTS in der Berechnung der Ende-zu-Ende-Latenz nicht eingerechnet wird. Die nachträgliche Reduktion der Messung um den Wert der Verarbeitungszeit innerhalb der SPS liefert die Ergebnisse, die von der Simulation vorausgesagt wurden.

8.3 Grenzen der Validierung und der Co-Simulation

In der vorgestellten Co-Simulation werden neben der Ende-zu-Ende-Latenz auch weitere Dienstgüteparameter berechnet und verwertet. So ist sowohl die Auslastung von Netzwerkkomponenten wie Access Points als auch die Entfernung von Funkteilnehmern relevant für die Einhaltung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen. Sowohl die Auslastung von Netzwerkkomponenten als auch die Entfernung der Teilnehmer spiegeln sich in der Latenz wieder. Die Latenz ist in diesem Fall ein direktes Resultat dieser Parameter. Wenn die Auslastung an den Netzwerkkomponenten steigt, dann verlängert sich zwangsläufig die Ende-zu-Ende-Latenz, da es zu einem Paketstau und dadurch verzögerte Abarbeitung der Pakete kommt. Auch die Entfernung der Funkteilnehmer zum nächsten Access Point hat zum gewissen Anteil eine Auswirkung auf die Latenz, denn je weiter der Teilnehmer entfernt ist, desto länger benötigt das Paket zur Übertragung. Bezogen auf die Entfernung lässt sich sagen, dass in der Dimension einer Halle keine signifikanten Auswirkungen auf die Latenz zu erwarten sind, denn dafür sind die Entfernungen bei einer Übertragung mit Lichtgeschwindigkeit vernachlässigbar. Vielmehr ist bei der Entfernung relevant, bis zu welchem Punkt der Teilnehmer noch Kontakt zum Access Point ohne Paketverluste halten kann. Die Betrachtung der Auslastung von den Access Points ist in diesem Szenario nicht relevant, da dieser Aufbau aufgrund des geringen Kommunikationsaufkommens die Access Points nicht an die Auslastungsgrenzen bringt.

Aktuell ist die Co-Simulation ausschließlich auf Basis von Maschine-zu-Maschine-Kommunikation konzipiert, da applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen maschineninterne Kommunikation noch nicht berücksichtigt, jedoch in das Konzept integriert werden kann. Auch wenn applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen generisch beschrieben sind und deshalb in jede Simulationsumgebung integriert werden können, ist die automatisierte Modellerstellung zur Komplexitätsreduktion aktuell nur von Plant Simulation zu OMNeT++ möglich.

8.4 Fazit

Durch die prototypische Implementierung des Gesamtsystems konnte gezeigt werden, dass die Informationsweitergabe von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen in die Co-Simulation funktioniert. Die Co-Simulation liefert dabei entscheidende Ergebnisse über die Einhaltung von definierten Anforderungen. Daraus lässt sich ableiten, ob das geplante Kommunikationsnetzwerk ausreichend dimensioniert ist. Sowohl eine grafische Aufbereitung innerhalb Plant Simulation als auch ein Diagramm der Daten

zeigen, zu welchem Zeitpunkt eine Überschreitung von Grenzwerten stattgefunden hat. Es wurden zudem auch verschiedene Parametrierungen vorgestellt, welche eine Technologieflexibilität innerhalb der Co-Simulation gewährleisten. In dieser Implementierung können deshalb sowohl WiFi als auch 5G-Netzwerke simuliert werden. Eine zusätzliche Erweiterung um weitere Technologien ist zudem problemlos möglich. Eine beispielhafte Applikation mit ihren applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen ist in diesem Kontext simuliert worden, um die Ergebnisse anschließend zu validieren.

Damit Aussagen über die Qualität der Co-Simulation getroffen werden können, wurde zusätzlich eine Validierung der Simulationsergebnisse durchgeführt. Anhand eines realitätsnahen Hardwareaufbaus inklusive einer zugehörigen WiFi-Funkstrecke konnte die FTS-Applikation implementiert und in einer produktionsnahen Umgebung gemessen werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Simulation sehr nah an den realen Werten ist. Dadurch lässt sich schließen, dass für dieses Applikationsbeispiel eine Simulation der Anforderungen erfolgreich war und das Kommunikationsnetzwerk korrekt ausgelegt ist.

Insgesamt konnte mithilfe der prototypischen Implementierung und der darauffolgenden Validierung das Co-Simulationsframework PLANET erfolgreich getestet und die Ergebnisse der Simulation als plausibel befunden werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Seit der Einführung des Begriffs Industrie 4.0 ist eine stetige Zunahme der Digitalisierung in der Produktion zu beobachten. Gleichzeitig führt das zu einer steigenden Anzahl an kommunikationsfähigen Teilnehmern in der Fertigung. Auch die zunehmende Konvergenz zwischen IT und OT stellt solche Kommunikationsnetzwerke vor besonderen Herausforderungen. Dies führt dazu, dass heutige Netzwerke heutigen und zukünftigen Anforderungen nicht mehr ausreichend gerecht werden. Zudem erschwert diese Entwicklung den Planenden eine konkrete Aussage über die Dimensionierung und Qualität von geplanten Kommunikationsnetzwerken ohne weitere Hilfsmittel zu treffen. Bisher galten zudem kabelgebundene Kommunikationstechnologien als Goldstandard in der Fertigungsindustrie, da nur sie die notwendigen Anforderungen bedienen konnten. Doch durch die Entwicklung neuer Funkstandards wie 5G und WiFi 6 dringen funkbasierte Lösungen immer weiter in das industrielle Umfeld vor, wodurch erstmalig neuartige Konzepte und Lösungen etabliert werden können. Erst durch eine holistische Betrachtung der Produktion und ihren Kommunikationsanforderungen ist die frühzeitige Planung von industriellen Kommunikationsnetzwerken für eine wandelbare und flexible APA möglich.

Bisher existiert kein Konzept, welches bereits in der Planungs- und Designphase einer APA ansetzt und das geplante Kommunikationsnetzwerk validiert. Hierzu etabliert diese Arbeit ein Gesamtkonzept auf Basis des Co-Simulationsframeworks PLANET. Dadurch wird erstmals die Möglichkeit geschaffen, mithilfe einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation das Kommunikationsnetzwerk mit den jeweiligen Anforderungen der Applikationen zu beschreiben und zu validieren.

Den grundsätzlichen Forschungsbedarf ergab eine strukturierte Analyse des Stands der Technik. Damit dies jedoch weiter geschärft wird und auch Expertenmeinungen in diese Arbeit mit einbezogen werden, hat eine quantitative Umfrage weitere wichtige Erkenntnisse gebracht. Zum einen wurde dadurch erstmals klar, dass bereits heute Fehler und Komplikationen bei der Planung von Kommunikationsnetzwerken auftreten und zum anderen, dass die empfundene Komplexität von Kommunikationsnetzwerken in der Zukunft weiter steigen wird. Obwohl bereits einige Werkzeuge und Simulatoren im Bereich der Kommunikationstechnik existieren, werden diese in der Fertigungsautomatisierung nur selten eingesetzt. Dies ist erstaunlich, da sich sehr viele Umfrageteilnehmende eine erhebliche Kostenreduktion, Verkürzung der Inbetriebnahmezeit und eine optimale Ressourcenausnutzung verspre-

chen. Die Kombination aus dem Forschungsbedarf und der Umfrage ergab die Anforderungen an das in dieser Arbeit vorgestellte Co-Simulationsframework.

Diese Arbeit konnte zudem einen erheblichen Beitrag für die Beschreibung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen leisten. Es konnte gezeigt werden, dass eine reine Anforderungsbetrachtung von Kommunikationsanforderungen in vielen Fällen nicht ausreichend ist. Häufig fehlen dabei dynamische Aspekte wie die Position, der Zustand oder Kommunikationspartner der Applikation. Diese sind jedoch für eine umfassende Betrachtung und Validierung des genutzten Kommunikationsnetzwerks entscheidend. Ebenso bringt die applikationsbezogene Sicht auf die Produktion einen erheblichen Vorteil, da nicht die Maschine als solches betrachtet wird, sondern welche Applikation sie zu diesem Zeitpunkt erfüllt. Dadurch lassen sich mit Hilfe von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen auch flexible Konzepte ausreichend beschreiben. In diesem Zusammenhang ist auch eine grobe Strukturierung von Applikationen vorgenommen worden. Das daraus entstandene Kommunikationstechnologie-Portfolio von industriellen Applikationen bietet einen Überblick über eine Auswahl von Applikationen, wodurch Planende vorhandene Technologiegrenzen von kabelgebundenen und funkbasierten Lösungen klar erkennen und sich entsprechend für eine entscheiden können. Dies leistet einen Beitrag zur Komplexitätsreduktion in Bezug auf Komplexität durch heterogene Kommunikationstechnologien.

Die Ergebnisse dieser applikationsbezogenen Anforderungen galt es in einer Beschreibungssprache für weitere Verwendungen zugänglich zu machen. Dabei hat sich die Verwaltungsschale im Sinne der Industrie 4.0 als geeignet erwiesen. Bisher bildete sie nur eine Kommunikation auf Metaebene ab, um eine Industrie 4.0 konforme Orchestrierung verschiedener Skills zwischen den Assets zu beschreiben. Durch die Bereitstellung der Informationen in der Verwaltungsschale mithilfe einer Simulationsumgebung wird diese zur reaktiven Verwaltungsschale. Informationen können somit weiteren Simulationen zur Verfügung gestellt und aktiv genutzt werden. Zudem leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Standardisierung eines neuen Teilmodells der Verwaltungsschale. Das neue Teilmodell Simulation ermöglicht eine domänenspezifische Abbildung von simulationsrelevanten Daten zur weiteren Nutzung. Diese konnte anhand einer prototypischen Implementierung für die Kommunikationsdomäne erfolgreich gezeigt werden. Zudem ist dabei auch eine Transferschnittstelle entstanden, die mittels XML-Format Informationen aus der Verwaltungsschale exportieren kann.

Kerngebiet des Co-Simulationsframeworks spiegelt die Co-Simulation selbst wieder. Es wurde eine Architektur vorgestellt, welche die zuvor gewonnenen Informationen der Verwaltungsschale verarbeiten kann. Hauptelement der

Co-Simulation bildet die ereignisdiskrete Materialflusssimulation Plant Simulation. Planende haben bereits diverse Erfahrungen mit dieser Art von Simulator. Zudem wird er in der Planungs- und Designphase einer APA verwendet. Die Erweiterung der Objektbibliothek um neue Elemente der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen und Netzwerkkomponenten wie WiFi-Access Points oder 5G-Basestations befähigen Plant Simulation erstmals zur Abbildung komplexer industrieller Kommunikationsteilnehmer. Durch eine automatisierte Modellerstellung im Netzwerksimulator OMNeT++ werden zudem keine besonderen Expertenkenntnisse benötigt. Die Synchronisation beider Werkzeuge ermöglicht einen bidirektionalen Austausch von simulationsrelevanten Daten. Dadurch wird ein optimales Simulationsergebnis erzielt. Eine visuelle Anzeige der Einhaltung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen zeigt dem Planenden, ob dies mit dem bisher geplanten Kommunikationsnetzwerk zu erreichen ist.

Den gültigen Ablauf der Simulation konnte die nachfolgende prototypische Umsetzung des Gesamtsystems zeigen. Mithilfe einer beispielhaften Produktion wurde das Modell in Plant Simulation um die notwendigen applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen erweitert und die geplanten WiFi-Access Points platziert. Ein anschließender Export und Umwandlung des Modells, initialisierte den OMNeT++-Simulator. Der Datenaustausch wurde durch eine TCP-Verbindung gewährleistet. Mit dem Start beider Simulatoren wurden zuvor definierte applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen im Kontext der Netzwerksimulation überprüft und grafisch dargestellt. Eine nachfolgende Validierung durch eine real aufgebaute Applikation zeigte mit der Simulation übereinstimmende Ergebnisse. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse mit den realen Bedingungen übereinstimmen und eine Abbildung des Kommunikationssystems mittels ereignisdiskreter Materialflusssimulation möglich ist.

Ein weiterer möglicher Ansatz besteht in der Integration von maschineninterner Kommunikation in das Co-Simulationsframework. Die zunehmende Konvergenz führt zukünftig dazu, dass diese Art der Kommunikation ebenso im gleichen Kommunikationsnetzwerk ablaufen kann. Einen möglichen Vorstoß liefert dabei OPC UA FLC. Die Erweiterung von OMNeT++ um OPC UA FLC könnte dadurch die vollkommene Konvergenz ausreichend validieren. In diesem Kontext ist ebenso eine dedizierte Hochfrequenzsimulation denkbar. Dadurch könnten dem Planenden zusätzlich sogenannte Heatmaps in Plant Simulation visualisiert werden, bei denen die platzierten funkbasierten Kommunikationskomponenten eine entscheidende Dämpfung besitzen. Auch eine zukünftige maschinengestützte Unterstützung des Planenden für die Platzierung der Netzwerkkomponenten ist denkbar. Hier kann mittels KI Optimierungsverfahren die bestgeeignete Position ermittelt und vorge-

schlagen werden. Dafür müsste in einem iterativen Prozess verschiedene Positionierungen der Access Points bzw. Basestations getestet und mithilfe der Co-Simulation validiert werden. Dadurch wird zusätzlich Komplexität reduziert und die Platzierung der Hardware erfolgt noch ressourceneffizienter. In diesem Zusammenhang könnte ebenso eine Komplexitätsanalyse erfolgen, um neben dem konzeptionellen Nutzen, welcher in der Validierung gezeigt wurde, auch die konkrete Komplexitätsreduktion nachzuweisen.

Für eine umfassende Betrachtung aller möglichen Applikationen in der Fertigungsautomatisierung sollte zudem eine Weiterarbeit im Bereich der applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen erfolgen. Eine Betrachtung weiterer spezifisch eingesetzter Applikationen und die daraus entstehenden Anforderungsbeschreibungen ermöglicht dem Co-Simulationsframework eine stärkere Durchdringung, da deutlich mehr Konstellationen simuliert werden können. Dazu müsste eine Applikation im Detail durchdrungen, ihre Parameter erarbeitet werden und welche Auswirkungen diese auf die Kommunikationsanforderungen haben. Dadurch lässt sich eine noch genauere Validierung durchführen. Denkbar ist ebenso die Konzeption eines Konfigurators, welcher basierend auf spezifischen Ontologien und Eingaben des Nutzens applikationsbezogene Kommunikationsanforderungen für die Beschreibung der Applikation erstellen. Dazu müssten die zuvor erarbeiteten Parameter in den Konfigurator eingepflegt und durch den Nutzens ausgewählt werden. Das Resultat ist eine exakt auf seine Anforderungen abgestimmte Kommunikationsbeschreibung.

10 Summary and Outlook

Since the introduction of the term Industry 4.0, a steady increase in digitalization in production has been observed. At the same time, this leads to an increasing number of communication-enabled participants in manufacturing. The increasing convergence between IT and OT also poses particular challenges for such communication networks. As a result, today's networks no longer adequately meet current and future requirements. In addition, this development makes it difficult for planners to make a concrete statement about the dimensioning and quality of planned communication networks without further aids. Until now, wired communication technologies were also considered the gold standard in the manufacturing industry, as only they could serve the necessary requirements. However, with the development of new wireless standards such as 5G and WiFi 6, wireless-based solutions are penetrating further and further into the industrial environment, allowing novel concepts and solutions to be established for the first time. Only by taking a holistic view of production and its communication requirements is early planning of industrial communication networks for a changeable and flexible automated production line possible.

Up to now, no concept exists that already starts in the planning and design phase of an automated production line and validates the planned communication network. For this purpose, this work establishes an overall concept based on the co-simulation framework PLANET. Thus, for the first time, the possibility is created to describe and validate the communication network with the respective requirements of the applications by means of a discrete-event material flow simulation.

The fundamental need for research was revealed by a structured analysis of the state of the art. However, in order to sharpen this further and to include expert opinions in this work, a quantitative survey provided further important insights. On the one hand, this made it clear for the first time that errors and complications are already occurring today in the planning of communication networks and, on the other hand, that the perceived complexity of communication networks will continue to increase in the future. Although some tools and simulators already exist in the field of communication technology, they are rarely used in manufacturing automation. This is astonishing, since very many survey participants expect significant cost reductions, shortening of commissioning time, and optimal resource utilization. The combination of the research needs and the survey resulted in the requirements for the co-simulation framework presented in this thesis.

This work was also able to make a significant contribution to the description of application-related communication requirements. It could be shown that a pure requirements view of communication requirements is not sufficient in many cases. Often, dynamic aspects such as the position, state or communication partners of the application are missing. However, these are crucial for a comprehensive consideration and validation of the communication network used. Likewise, the application-related view of production brings a significant advantage, since it is not the machine as such that is considered, but rather which application is fulfilling it at that point in time. This means that flexible concepts can also be adequately described with the aid of application-related communication requirements. In this context, a rough structuring of applications has also been carried out. The resulting communication technology portfolio of industrial applications provides an overview of a selection of applications, enabling planners to clearly identify existing technology boundaries of wired and radio-based solutions and to choose one accordingly. This contributes to complexity reduction in terms of complexity due to heterogeneous communication technologies.

The results of these application-related requirements had to be made accessible in a description language for further uses. The Asset Administration Shell proved to be suitable for this purpose in the sense of Industry 4.0. Until now, it only represented communication at the meta level in order to describe Industry 4.0-compliant orchestration of various skills between the assets. By making information available in the Asset Administration Shell with the help of a simulation environment, it becomes a reactive Asset Administration Shell. Information can thus be made available to further simulations and actively used. In addition, this work contributes to the standardization of a new submodel of the Asset Administration Shell. The new simulation submodel enables a domain-specific mapping of simulation-relevant data for further use. This could be successfully demonstrated by means of a prototypical implementation for the communication domain. In addition, a transfer interface was created that can export information from the Asset Administration Shell using XML format.

The core area of the co-simulation framework reflects the co-simulation itself. An architecture was presented that can process the previously obtained information from the Asset Administration Shell. The main element of the co-simulation is the discrete-event material flow simulation Plant Simulation. Planners already have various experiences with this type of simulator. It is also used in the planning and design phase of an automated production line. The extension of the object library with new elements of application-related communication requirements and network components such as WiFi access points or 5G basestations enable Plant Simulation for the first time to

model complex industrial communication participants. Moreover, thanks to automated model creation in the OMNeT++ network simulator, no special expert knowledge is required. The synchronization of both tools enables a bidirectional exchange of simulation-relevant data. This results in an optimal simulation outcome. A visual indication of compliance with application-related communication requirements shows the planner whether this can be achieved with the previously planned communication network.

The following prototypical implementation of the entire system was able to demonstrate the valid sequence of the simulation. With the help of an exemplary production, the model in Plant Simulation was extended by the necessary application-related communication requirements and the planned WiFi access points were placed. A subsequent export and conversion of the model, initialized the OMNeT++ simulator. Data exchange was provided through a TCP connection. With the start of both simulators, previously defined application-related communication requirements were checked and graphically displayed in the context of the network simulation. A subsequent validation by a real built application showed results consistent with the simulation. This demonstrated that the simulation results match real-world conditions and that it is possible to map the communication system using discrete-event material flow simulation.

Another possible approach is to integrate intra-machine communication into the co-simulation framework. In the future, increasing convergence will mean that this type of communication can also take place in the same communication network. OPC UA FLC provides a possible advance in this respect. The extension of OMNeT++ by OPC UA FLC could thereby sufficiently validate the perfect convergence. In this context, a dedicated high-frequency simulation is also conceivable. This would allow the planner to additionally visualize so-called heat maps in Plant Simulation, where the placed radio-based communication components have a decisive attenuation. A future machine-supported support of the planner for the placement of the network components is also conceivable. Here, AI optimization techniques can be used to determine and suggest the most suitable position. For this purpose, various positions of the access points or basestations would have to be tested in an iterative process and validated with the help of co-simulation. This would also reduce complexity and make the placement of the hardware even more resource-efficient. In this context, a complexity analysis could also be carried out in order to demonstrate the concrete reduction in complexity in addition to the conceptual benefits shown in the validation.

For a comprehensive consideration of all possible applications in manufacturing automation, further work should also be done in the area of application-

related communication requirements. A consideration of other specifically used applications and the resulting requirement descriptions enables the co-simulation framework to penetrate more deeply, since significantly more constellations can be simulated. This would require penetrating an application in detail, working out its parameters and what effects these have on the communication requirements. This would allow even more precise validation. It is also conceivable to design a configuration-tool that creates application-specific communication requirements for the description of the application based on specific ontologies and input from the user. For this purpose, the previously developed parameters would have to be entered into the configuration-tool and selected by the user. The result is a communication description that is precisely tailored to the user's requirements.

Anhang

Kommunikationsnetzwerk		Kommunikationsschnittstelle	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verfügbarkeit	99.999 9%	Burst	---
Ende-zu-Ende-Latenz	< 100ms	Nachrichtengröße	2 kByte
Zuverlässigkeit	~ 365 Tage	Überlebenszeit	1s
Service-Bitrate	---	Transferintervall	200ms
Aktualisierungszeit	---	Protokoll	OPC UA
Beziehungsart	stationär - stationär	Übertragungsart	Kabel
Kommunikationspartner	Server		

Bild 55: Anforderungen eine Bearbeitungsstation hinsichtlich Kommunikationsnetzwerk und Kommunikationsschnittstelle

Kommunikationsnetzwerk		Kommunikationsschnittstelle	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verfügbarkeit	99.999 999%	Burst	---
Ende-zu-Ende-Latenz	< 30 ms	Nachrichtengröße	250 Byte
Zuverlässigkeit	~ 365 Tage	Überlebenszeit	50 ms
Service-Bitrate	250 kbit/s	Transferintervall	30ms
Aktualisierungszeit	---	Protokoll	PROFINET
Beziehungsart	mobil - stationär	Übertragungsart	Funk
Kommunikationspartner	Bearbeitungsstation A		

Bild 56: Anforderungen eine HMI-Applikation mit Not-Halt hinsichtlich Kommunikationsnetzwerk und Kommunikationsschnittstelle

Kommunikationsnetzwerk		Kommunikationsschnittstelle	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verfügbarkeit	99.999 9%	Burst	---
Ende-zu-Ende-Latenz	< 20 ms	Nachrichtengröße	1 kByte
Zuverlässigkeit	~ 365 Tage	Überlebenszeit	2 s
Service-Bitrate	---	Transferintervall	1 s
Aktualisierungszeit	---	Protokoll	TCP
Beziehungsart	mobil - stationär	Übertragungsart	Funk
Kommunikationspartner	Server		

Bild 57: Anforderungen eine FTS-Applikation hinsichtlich Auftragsdatenabfrage vom Server

Literaturverzeichnis

- [1] Plattform Industrie 4.0. *Was ist Industrie 4.0? Menschen, Maschinen und Produkte sind direkt miteinander vernetzt: die vierte industrielle Revolution hat begonnen.* 2022. <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>.
- [2] Wollschlaeger, Martin; Sauter, Thilo und Jasperneite, Juergen. „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 (2017), S. 17–27.
- [3] Gölzer, Philipp. *Big Data in Industrie 4.0 – Eine strukturierte Aufarbeitung von Anforderungen, Anwendungsfällen und deren Umsetzung.* Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [4] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. „Thesen und Handlungsfelder: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation“ (2013).
- [5] Westkämper, Engelbert und Löffler, Carina. *Strategien der Produktion.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [6] Attri, Rajesh und Grover, Sandeep. „A comparison of production system life cycle models“. *Frontiers of Mechanical Engineering* 7.3 (2012), S. 305–311.
- [7] Preiss, K.; Patterson, R. und Field, M. „The future directions of industrial enterprises“. *Maynard's Industrial Engineering Handbook* 5 (2001), S. 133–161.
- [8] Bellgran M; Gullander P und Harlin U. „Towards improvement of production efficiency and effectiveness from a life-cycle perspective“. *Proceedings of 33rd International Symposium on Robotics* (2002).
- [9] Fay, Alexander. *Informationsmodelle im Lebenszyklus automatisierter Anlagen: Ein Überblick über 15 Jahre wissenschaftlicher Arbeit der Professur für Automatisierungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg.* Hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay. 2019.
- [10] Chase R B, Aquilano N J. *Production and Operations Management: A Life Cycle Approach.* Homewood: Richard D. Irwin Inc., 1977.
- [11] Wiktorsson, Magnus. „Performance assessment of assembly systems: Linking strategy to analysis in early stage design of large assembly systems“ (2002).

- [12] Košturiak, Ján und Gregor, Milan. „Simulation in production system life cycle“. *Computers in industry* 38.2 (1999), S. 159–172.
- [13] Schmidt-Kretschmer, Michael; Gries, Bruno und Blessing, Lucienne. „Bug or Feature? Möglichkeiten und Grenzen des Fehlermanagements in der Produktentwicklung“. 17. *Symposium „DESIGN FOR X“ Neukirchen* (2006).
- [14] Forstner, Lisa und Dümmler, Mathias. „Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke – Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0“. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 131.7 (2014), S. 199–201.
- [15] Meudt, Tobias; Pohl, Malte und Metternich, Joachim. *Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick*. 2017.
- [16] Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten und Vogel-Heuser, Birgit. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [17] Roth, Armin. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [18] Martin Ruskowski. „Begriffe aus der Welt von Industrie 4.0“. *messtec drives Automation* (2018).
- [19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Industrie 4.0. „Verwaltungsschale in der Praxis: Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen (Version 1.0)“ (2020).
- [20] Wang, Zheng. *Internet QoS: architectures and mechanisms for quality of service*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [21] Ferrarri, Domenico; Ramaekers, Jean und Ventre, Giorgio. „Client-Network Interactions in Quality of Service Communication Environments“ (1992).
- [22] Soucek, S. und Sauter, T. „Quality of Service Concerns in IP-Based Control Systems“. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51.6 (2004), S. 1249–1258.
- [23] Andrew T. Campbell. *A Quality of Service Architecture*. 1996.
- [24] 3GPP. *3GPP TR 22.804: Study on Communication for Automation in Vertical Domains*. Hrsg. von 3GPP. 2020.
- [25] 5G Acia. *A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases*. 2019.
- [26] Wörn, Heinz und Brinkschulte, Uwe. *Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 2005.

- [27] Brandt, S. A.; Banachowski, S.; Lin, Caixue und Bisson, T. „Dynamic integrated scheduling of hard real-time, soft real-time, and non-real-time processes“. *Proceedings. 2003 International Symposium on System-on-Chip (IEEE Cat. No.03EX748)*. IEEE Comput. Soc, 3-5 Dec. 2003, S. 396–407.
- [28] Buttazzo, Giorgio C.; Lipari, Giuseppe; Abeni, Luca und Caccamo, Marco. *Soft real-time systems: Predictability vs. efficiency*. Series in computer science. New York: Springer, 2005.
- [29] Jonsson, M. und Kunert, K. „Reliable Hard Real-Time Communication in Industrial and Embedded Systems“. *International Symposium on Industrial Embedded Systems* (2008), S. 184–191.
- [30] Jonsson, M. und Kunert, K. „Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees“. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 5.4 (2009), S. 429–442.
- [31] Pierre Simon Laplace. *A philosophical essay on probabilities*. 1814.
- [32] Ismael, Jenann. „Determinism, Counterpredictive Devices, and the Impossibility of Laplacean Intelligences“. *The Monist* 102.4 (2019), S. 478–498.
- [33] Jean-Yves Le Boudec und Patrick Thiran. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet*. Springer, 2001.
- [34] Gerstl, Sebastian. *Echtzeit: Grundlagen von Echtzeitsystemen*. Hrsg. von embedded-software-engineering. 2017. <https://www.embedded-software-engineering.de/echtzeit-grundlagen-von-echtzeitsystemen-a-669520/>.
- [35] Frotzscher, Andreas; Wetzker, Ulf; Bauer, Matthias; Rentschler, Markus; Beyer, Matthias; Elspass, Stefan und Klessig, Henrik. „Requirements and current solutions of wireless communication in industrial automation“. *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. IEEE, 10.06.2014 - 14.06.2014, S. 67–72.
- [36] Weinländer, Markus, Hrsg. *Industrielle Kommunikation: Basistechnologie für die Digitalisierung der Industrie*. [1. Auflage]. Berlin u. a.: Beuth Verlag GmbH und VDE Verlag GmbH, 2017.
- [37] Varghese, Anitha und Tandur, Deepaknath. „Wireless requirements and challenges in Industry 4.0“. *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. IEEE, 27.11.2014 - 29.11.2014, S. 634–638.

- [38] ETSI. *ETSI TR 102 889-2: Technical characteristics for SRD equipment for wireless industrial applications using technologies different from Ultra-Wide Band*. Hrsg. von European Telecommunications Standards Institute. 2011.
- [39] ZVEI. *Kommunikation im Industrie-4.0-Umfeld: Welchen Herausforderungen hat sich die industrielle Kommunikation im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0 zu stellen?* Hrsg. von Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. Frankfurt am Main, 2018.
- [40] 3GPP. *3GPP TS 22.104: Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains*. Hrsg. von 3GPP. 2021.
- [41] Kersken, Sascha. *IT-Handbuch für Fachinformatiker*innen: Der Ausbildungsbegleiter*. 10th ed. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2021.
- [42] Küveler, Gerd und Schwach, Dietrich. *Informatik für Ingenieure: C/C++ Mikrocomputertechnik Rechnernetze*. 4., durchgesehene und erweiterte Auflage. Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden und s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 2003.
- [43] Jondral, Friedrich K. „Industrie 4.0 – Funk in der Fabrik“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111.1-2 (2016), S. 59–62.
- [44] Wellenreuther, Günter. *Automatisieren mit SPS — Theorie und Praxis: Programmierung: DIN EN 61 131-3, STEP 7, CoDeSys, Entwurfsverfahren, Bausteinbibliotheken Applikationen: Steuerungen, Regelungen, Antriebe, Safety Kommunikation: AS-i-Bus, PROFIBUS, Ethernet-TCP/IP, PROFINET, Web-Technologien, OPC*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer eBook Collection Computer Science and Engineering. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [45] Tanck, Hajo. „Grundlagen der Vernetzung“. *Medizintechnik* (2007), S. 719–731.
- [46] Osseiran, Afif; Monserrat, Jose F.; Marsch, Patrick; Dohler, Mischa und Nakamura, Takehiro. *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [47] Eiman Mohyeldin. *Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)*. 2020.
- [48] 3GPP. *TR 21.915: Release 15 Description*. Hrsg. von 3GPP. 2019.
- [49] 3GPP. *TR 21.916: Release 16 Description*. Hrsg. von 3GPP. 2022.
- [50] 3GPP. *TR 21.917: Release 17 Description*. Hrsg. von 3GPP. 2021.
- [51] 3GPP. *Release 18*. 2022. <https://www.3gpp.org/release18>.

- [52] Alan Weissberger. *German Telecom Regulator awards 5G private network licenses in the 3.7GHz to 3.8GHz band*. 2020. <https://techblog.comsoc.org/2020/09/25/german-telecom-regulator-awards-5g-private-network-licenses-in-the-3-7ghz-to-3-8ghz-band/>.
- [53] Bundesnetzagentur. *3,7 GHz*. 6.01.2022. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/_functions/faq_3,7%20GHz.html.
- [54] Naik, Gaurang; Park, Jung-Min; Ashdown, Jonathan und Lehr, William. „Next Generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz Bands: Opportunities and Challenges“. *IEEE Access* 8 (2020), S. 153027–153056.
- [55] Varghese, Anitha und Tandur, Deepaknath. „Wireless requirements and challenges in Industry 4.0“. *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. IEEE, 2014, S. 634–638.
- [56] Oughton, Edward J.; Lehr, William; Katsaros, Konstantinos; Selinis, Ioannis; Buble, Dean und Kusuma, Julius. „Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6“. *Telecommunications Policy* 45.5 (2021), S. 102127.
- [57] James Powell P Eng. *HART Communication Protocol: A Practical Guide*. 2020.
- [58] Babel, Wolfgang. *Industrie 4.0, China 2025, IoT*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [59] Tanenbaum, Andrew S. *Computernetzwerke*. 5., aktualisierte Auflage. München: Pearson Higher Education, 2012.
- [60] Hauser, Bernhard J. *Fachwissen Netzwerktechnik: Modelle - Geräte - Protokolle*. 2. Auflage. Bibliothek des technischen Wissens. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2015.
- [61] Höme, Stephan. *Analytische Modellierung des Zeitverhaltens von verteilten industriellen Steuerungssystemen*. Magdeburg: Universitätsbibliothek Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, 2016.
- [62] PROFIBUS & PROFINET International. „PROFINET Systembeschreibung: Technologie und Anwendung“ (2014).
- [63] PROFIBUS & PROFINET International. *PROFINET over TSN*. 2020. <https://www.profibus.com/technology/industrie-40/profinet-over-tsn#tab3-221437>.

- [64] John Browett und Thomas J. Burke. „Time-Sensitive Networking (TSN) – Zeit zum Handeln: Warum TSN heute Teil Ihrer Unternehmensstrategie sein sollte“ (2021).
- [65] Siemens. *TSN – Time-Sensitive Networking*. <https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/industrial-ethernet/tsn.html>.
- [66] Gunnar Knuepffer. *ODVA erweitert EtherNet/IP-Spezifikation für Systemdiagnosen und TSN*. 2020. <https://www.all-electronics.de/markt/odva-erweitert-ethernetip-spezifikation-fuer-systemdiagnosen-und-tsn.html>.
- [67] Beckhoff. *EtherCAT und TSN*. https://www.ethercat.org/de/ethercat_and_tsn.htm.
- [68] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. *OPC Unified Architecture: Festlegungen zur Umsetzung des Publisher-Subscriber-Models*. 2019.
- [69] Technische Universität München – Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie. *Weihenstephaner Standards*. 2021. <https://www.weihenstephan-standards.com/de/technik/kommunikationsschnittstellen/ws-opc-ua/>.
- [70] OMAC. *OPC 3050: UA Companion Specification for PackML*. 11.11.2020.
- [71] OPC Foundation. *OPC Unified Architecture: Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge*. Hrsg. von OPC Foundation. 2017.
- [72] OPC Foundation. „OPC UA FLC: OPC UA for Field Level Communication – Extending OPC UA to the field: Extending OPC UA to the Field: OPC UA for Field eXchange (FX)“ (2020).
- [73] Mourtzis, Dimitris; Papakostas, Nikolaos; Mavrikios, Dimitris; Makris, Sotiris und Alexopoulos, Kosmas. „The Role of Simulation in Digital Manufacturing - Applications and Outlook“. *Proceedings of DET2011 7th International Conference on Digital Enterprise Technology* (2011).
- [74] Jäger, Jens; Schöllhammer, Oliver; Lickefett, Michael und Bauernhansl, Thomas. „Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the “Industrie 4.0” Complexity for Small and Medium Enterprises“. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 116–121.
- [75] Lechler, Tobias; Fischer, Eva; Metzner, Maximilian; Mayr, Andreas und Franke, Jörg. „Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems“. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 1125–1130.

- [76] Mourtzis, D.; Doukas, M. und Bernidaki, D. „Simulation in Manufacturing: Review and Challenges“. *Procedia CIRP* 25 (2014), S. 213–229.
- [77] Metzner, Maximilian; Bönig, Jochen; Blank, Andreas; Schäffer, Eike und Franke, Jörg. „Human-In-The-Loop“- Virtual Commissioning of Human-Robot Collaboration Systems“. *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Hrsg. von Schüppstuhl, Thorsten; Tracht, Kirsten und Franke, Jörg. Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 131–138.
- [78] Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven und Wenzel, Sigrid. *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [79] Hosseinpour, F und Hajihosseini, H. „Importance of Simulation in Manufacturing“. *World Academy of Science, Engineering and Technology* (2009), S. 292–295.
- [80] Siemens PLM. *Plant Simulation and Throughput Optimization: Use plant simulation and throughput optimization to improve manufacturing performance*. 2022. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html>.
- [81] Rockwell Automation. *Arena Simulation Software: Take the guesswork out of your decision making. Move confidently forward using Arena software*. 2022. <https://www.rockwellautomation.com/de-de/products/software/arena-simulation.html>.
- [82] Simio. *Simio Simulation Software*. 2022. <https://www.simio.com/>.
- [83] A Vieira, L Dias, G Pereira, JA Oliveira. *Comparison of SIMIO and ARENA simulation tools*. 2014.
- [84] Kerschbaum, Sven; Höme, Stephan und Talanis, Thomas. „Auswirkungen der Netzwerkplanung auf die Qualität von Industriellen Anlagen“. *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Hrsg. von Jasperneite, Jürgen und Lohweg, Volker. Technologien für die intelligente Automation. Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 3–16.
- [85] Leßmann, Gunnar; Schneider, Daniel; Flatt, Holger; Schriegel, Sebastian und Jasperneite, Jürgen. „Modellbasierter Entwurfsassistent zur Auslegung Spezifischer Architektur- und Konfigurationseigenschaften von Kommunikationsnetzen mit Echtzeitanforderungen“. *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Hrsg. von Jasperneite, Jürgen und Lohweg, Volker. Technologien für die intelligente Automation. Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 149–162.

- [86] Chang, Xinjie. „Network simulations with OPNET“. *WSC'99. 1999 Winter Simulation Conference Proceedings. 'Simulation - A Bridge to the Future' (Cat. No.99CH37038)*. IEEE, 5-8 Dec. 1999, S. 307–314.
- [87] Kerschbaum, Sven. *Dienstgütegarantien fuer Ethernet in der industriellen Kommunikation*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [88] Van Bemten, Amaury und Kellerer, Wolfgang. „Network Calculus: A Comprehensive Guide“. *Technische Universität München* (2016).
- [89] OpenSim Ltd. *OMNeT++ Discrete Event Simulator: OMNeT++ is an extensible, modular, component-based C++ simulation library and framework, primarily for building network simulators*. 2022. <https://omnetpp.org/>.
- [90] OPNET Technologies. *OPNET: Optimum Network Performance*. 2022. <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>.
- [91] ns-3 Projekt. *ns-3 Network Simulator*. 2022. <https://www.nsnam.org/>.
- [92] Siemens AG. *SINETPLAN - Siemens Network Planner: Planen – simulieren – testen: SINETPLAN*. 2022. <https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/profinet/sinetplan.html>.
- [93] Chen, Feng; German, Reinhard und Dressler, Falko. „QoS-oriented Integrated Network Planning for Industrial Wireless Sensor Networks“. *2009 6th IEEE Annual Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops*. IEEE, 22.06.2009 - 26.06.2009, S. 1–3.
- [94] Jens Dede; Koojana Kuladinithi; Anna Foerster und Okko Nannen and Sebastian Lehnhoff. „OMNeT++ and Mosaik: Enabling Simulation of Smart Grid Communications“. *Proceedings of the "OMNeT++ Community Summit 2015"* (2015).
- [95] Liu, Yongkang; Candell, Richard; Lee, Kang und Moayeri, Nader. „A simulation framework for industrial wireless networks and process control systems“. *2016 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE, 3.05.2016 - 06.05.2016, S. 1–11.
- [96] Sollfrank, Michael; Freymann, Moritz von und Vogel-Heuser, Birgit. „Overview and classification of approaches for the simulation of networked control systems“. *at - Automatisierungstechnik* 68.3 (2020), S. 151–165.
- [97] Shoch, John F. und Hupp, Jon A. „Measured performance of an Ethernet local network“. *Communications of the ACM* 23.12 (1980), S. 711–721.

- [98] Zhou, Keliang; Liu, Taigang und Zhou, Lifeng. „Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges“. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. IEEE, 15.08.2015 - 17.08.2015, S. 2147–2152.
- [99] Ehrlich, Marco; Jasperneite, Jurgen; Krummacker, Dennis; Fischer, Christoph; Guillaume, Rene; Perez Olaya, Santiago Soler; Frimpong, Ansah; Meer, Hermann de; Wollschlaeger, Martin und Schotten, Hans D. „Software- Defined Networking as an Enabler for Future Industrial Network Management“. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 4.09.2018 - 07.09.2018, S. 1109–1112.
- [100] Kampen, Anna-Lena; Fojcik, Marcin; Cupek, Rafal und Stoj, Jacek. „The requirements for using wireless networks with AGV communication in an industry environment“. *2021 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. IEEE, 11.10.2021 - 13.10.2021, S. 212–218.
- [101] Makris, S.; Michalos, G. und Chryssolouris, G. „Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots“. *Advances in Decision Sciences 2012 (2012)*, S. 1–11.
- [102] Aceto, Giuseppe; Persico, Valerio und Pescapé, Antonio. „A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges“. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.4 (2019), S. 3467–3501.
- [103] Scharfe, Philipp und Wiener, Martin. „A Taxonomy of Smart Machines in the Mechanical Engineering Industry: Toward Structuring the Design Solution Space“. *ICIS*. 2020.
- [104] Miljanovic, D. M. und Croft, E. A. „A taxonomy for robot control“. *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. IEEE, 10–15 May 1999, S. 176–181.
- [105] Stüber, Gordon L. *Principles of Mobile Communication*. SpringerLink Bücher. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [106] O’Connell, Eoin; Moore, Denis und Newe, Thomas. „Challenges Associated with Implementing 5G in Manufacturing“. *Telecom* 1.1 (2020), S. 48–67.
- [107] Kim, KwangOk; Doo, Kyeong-Hwan; Lee, Han Hyub; Kim, SeungHwan; Park, Heuk; Oh, Jung-Yeol und Chung, Hwan Seok. „High Speed and Low Latency Passive Optical Network for 5G Wireless Systems“. *Journal of Lightwave Technology* 37.12 (2019), S. 2873–2882.

- [108] Mr. Marcus Pieska, Prof. Andreas J. Kassler; Mr. Marcus Pieska und Prof. Andreas J. Kassler. *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob): 9-11 Oct. 2017*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.
- [109] Ansari, Junaid; Andersson, Christian; Bruin, Peter de; Farkas, János; Grosjean, Leefke; Sachs, Joachim; Torsner, Johan; Varga, Balázs; Harutyunyan, Davit; König, Niels und Schmitt, Robert H. „Performance of 5G Trials for Industrial Automation“. *Electronics* 11.3 (2022), S. 412.
- [110] Beckhof. *EtherCAT - Der Ethernet-Feldbus*. 2022. <https://www.ethercat.org/de/technology.html>.
- [111] Prytz, Gunnar. „A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT“. *2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. IEEE, 15.09.2008 - 18.09.2008, S. 408–415.
- [112] Yoshino, Takeshi; Sugawara, Yutaka; Inagami, Katsushi; Tamatsukuri, Junji; Inaba, Mary und Hiraki, Kei. „Performance optimization of TCP/IP over 10 Gigabit Ethernet by precise instrumentation“. *2008 SC - International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. IEEE, 15.11.2008 - 21.11.2008, S. 1–12.
- [113] Belyaev A., Diedrich C. „Aktive Verwaltungsschale von I4.0-Komponenten“. *Automation 2019* (2019).
- [114] Plattform Industrie 4.0. „Details of the Asset Administration Shell: Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01)“ (2020).
- [115] Boss, Birgit; Diedrich, Christian und Wagner, Johanna. „Verwaltungsschale vernetzt: Sagt die eine Maschine zur anderen...“. *atp magazin*, Bd. 62 (2020).
- [116] Nurzhan Nurseitov; Michael Paulson; Randall Reynolds und Clemente Izurieta. „Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats: A Case Study“ (2009).
- [117] Consortium, F. M.C. *FMC - Home of Fundamental Modeling Concepts*. 25.03.2020. <http://www.fmc-modeling.org/home>.
- [118] Cisco. *Ultra Cloud Core 5G User Plane Function, Release 2020.03 - Configuration and Administration Guide: Chapter: 5G-UPF Overview*. 2020. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/ucc/upf/2020-03/b_ucc-5g-upf-config-and-admin-guide_2020-03/b_UPF_chapter_010101.html.

- [119] Nardini, Giovanni; Sabella, Dario; Stea, Giovanni; Thakkar, Purvi und Viridis, Antonio. „Simu5G–An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks“. *IEEE Access* 8 (2020), S. 181176–181191.
- [120] Nardini, Giovanni; Stea, Giovanni; Viridis, Antonio und Sabella, Dario. „Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks“. *Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 8.07.2020 - 10.07.2020, S. 68–80.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Vukovic, Petar; Collischon, Matthias und Franke, Jörg. „Simulation software design as a potential solution to the increasing complexity of industrial communication networks“. *Procedia CIRP* 97 (2021), S. 1–6.
- [P2] Vukovic, Petar und Franke, Jörg. „Kommunikationsbedürfnisse flexibler Produktionsanlagen“. *Automation 2020*. VDI Verlag, 2020, S. 843–852.
- [P3] Vukovic, Petar; Lechler, Tobias und Franke, Jörg. „A Concept for Wireless Network Integration in Production System Planning“. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 8.09.2020 - 11.09.2020, S. 1095–1098.
- [P4] Vukovic, Petar; Höme, Stephan; Kerschbaum, Sven und Franke, Jörg. „Resource-Optimized Design of Communication Networks for Flexible Production Plants“. *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation* (2022).

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Grödel, Eric. „Entwicklung einer Systematik zur Einordnung industrieller Applikationen unter Berücksichtigung ihrer Kommunikationsanforderungen“. Projektarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, 2021.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2023):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperditzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenewickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hergestoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineering
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöllner
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-
system für den Einsatz im Produk-
tions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7
Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommuni-
kationssysteme in der Fertigungs-
automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21
Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-673-2.

Abstract

The increasing networking of machines and plants, the growing heterogeneity of communication participants, and the convergence of IT and OT applications in the course of Industry 4.0 pose major challenges for planners of industrial communication networks. Up to now, industrial communication networks can only be sufficiently validated after completion of the engineering phase. This leads to high costs due to undetected errors in the early phase of the life cycle of an automated production plant.

The aim of this work is to enable validation of the planned communication network in the early planning and design phase of an automated production plant. For this purpose, the co-simulation framework PLANET is introduced, which validates the industrial communication network based on application-related communication requirements and a combination of material flow and communication simulation.

For this purpose, industrial applications are structured with respect to communication requirements based on a communication technology portfolio. By modelling application-related communication requirements, a description language is defined in the asset administration shell for use in simulations. Furthermore, the overall architecture of the co-simulation is also presented, which uses this information and validates the results using a prototypical implementation.

Die zunehmende Vernetzung von Maschinen und Anlagen, steigende Heterogenität von Kommunikationsteilnehmern und die Konvergenz von IT- und OT-Applikationen im Zuge von Industrie 4.0 stellen Planende von industriellen Kommunikationsnetzwerken vor große Herausforderungen. Bisher lassen sich industrielle Kommunikationsnetzwerke erst nach Vervollendung der Engineering-Phase hinreichend validieren. Dies führt zu hohen Kosten durch nicht entdeckte Fehler in der frühen Phase des Lebenszyklus einer automatisierten Produktionsanlage. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Validierung des geplanten Kommunikationsnetzwerks bereits in der frühen Planungs- und Design-Phase einer automatisierten Produktionsanlage zu ermöglichen. Hierfür wird das Co-Simulationsframework PLANET eingeführt, welches auf Basis von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen und einer Kombination aus Materialfluss- und Kommunikationssimulation das industrielle Kommunikationsnetzwerk validiert. Dazu wird eine Strukturierung industrieller Applikationen hinsichtlich Kommunikationsanforderungen anhand eines Kommunikationstechnologie-Portfolios vorgenommen. Durch die Modellierung von applikationsbezogenen Kommunikationsanforderungen erfolgt die Definition einer Beschreibungssprache in der Verwaltungsschale zur Verwendung in Simulationen. Des Weiteren wird auch die Gesamtarchitektur der Co-Simulation vorgestellt, welche diese Informationen nutzt und anhand einer prototypischen Implementierung die Ergebnisse validiert.

ISBN 978-3-96147-673-2

