

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 Kommunikationssimulation	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 Kommunikationsanforderungen	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