

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

## Reihe 8

Mess-,  
Steuerungs- und  
Regelungstechnik

Nr. 1269

Dipl.-Ing. Darina Schulze-Zipper,  
Magdeburg

## Ein regelungstechnischer Ansatz für ein technologieübergreifendes und automatisiertes drahtloses Koexistenz- management



Ein Regelungstechnischer Ansatz für ein technologieübergreifendes  
und automatisiertes drahtloses Koexistenzmanagement

**Dissertation**  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktorandenin  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Darina Schulze-Zipper  
geboren am 26.05.1986 in Neindorf / Beckendorf

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar  
Prof. Dr.-Ing. Carlos Eduardo Pereira

Promotionskolloquium am 22.10.2019



# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 8**

Mess-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Darina Schulze-Zipper,  
Magdeburg

**Nr. 1269**

**Ein regelungstechnischer  
Ansatz für ein  
technologieübergreifendes  
und automatisiertes  
drahtloses Koexistenz-  
management**

VDI verlag

Schulze-Zipper, Darina

## **Ein regelungstechnischer Ansatz für ein technologieübergreifendes und automatisiertes drahtloses Koexistenzmanagement**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1269. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

144 Seiten, 61 Bilder, 19 Tabellen.

ISBN 978-3-18-526908-0 ISSN 0178-9546,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Funkkommunikation – Modellierung – ereignisdiskrete Systeme – Modellprädiktive Regelung – max-plus Algebra – Fabrik – Hardware-in-the-Loop Test

Um die Vernetzung zwischen Maschinen und Endpunkten flexibler zu gestalten, erhält zunehmend die drahtlose Kommunikation an Aufmerksamkeit. Dabei werden die Anforderungen an das Zeit- und Fehlerverhalten der Nachrichtenübertragung bei Produktionsprozessen zunehmend höhergestellt. An dieser Stelle ist das Koexistenzmanagement von hoher Wichtigkeit, um die Prozesse koordiniert aufeinander abzustimmen. Es wird ein methodisches Vorgehen für ein technologieübergreifendes und automatisiertes Koexistenzmanagement untersucht. Das Besondere hierbei ist der im Vergleich zum aktuellen Stand der Wissenschaft einmalige, technologieübergreifende Ansatz. In der vorliegenden Arbeit wird das Koexistenzmanagement als modellprädiktive Regelung untersucht. Dadurch werden aktuelle Systemzustände kontinuierlich erfasst und bewertet. Begleitet werden diese Untersuchungen durch mathematische Stabilitätsbeweise. Die Validierung erfolgt an einem Hardware-in-the-Loop-Versuchsaufbau.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie  
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at  
[www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-526908-0

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg. Für das gute Gelingen meiner Arbeit sind eine Reihe von Menschen mit verantwortlich, bei denen ich mich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank dabei gilt Herrn Prof. Ulrich Jumar, der mich bei dieser Arbeit wissenschaftlich begleitet hat. Immer wenn es Gesprächsbedarf gab, war er für mich da und hat mich immer unterstützt. Das habe ich nie als selbstverständlich angesehen. Für sein Vertrauen und die Freiheiten, die er mir entgegen gebracht hat, bedanke ich mich herzlich. Ich danke Herrn Prof. Carlos Eduardo Pereira, Universität von Rio Grande do Sul in Porto Alegre (Brasilien), für die wertvollen Ratschläge und dass er mein Zweitgutachten übernommen hat.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kollegen vom Institut für Automation und Kommunikation e.V. für die Unterstützung und die damit verbundene Zusammenarbeit. Wohl wissend, dass ich an dieser Stelle nicht alle Kollegen berücksichtigen kann, möchte ich dabei André Gnad, Christian Diedrich, Holger Zipper, Marko Krätzig, Matthias Riedl, Stefan Magnus, Tim Ruß und noch viele viele mehr hervorheben, die es hoffentlich nicht persönlich nehmen, wenn sie an dieser Stelle nicht genannt werden. Natürlich möchte ich auch den Projektassistenzen für die organisatorischen Angelegenheiten innerhalb der Projekte danken, ganz besonders Frances Plöwka und Nancy Bärwinkel, die zu Freundinnen für mich geworden sind.

Einen Großteil der Ergebnisse meiner Arbeit habe ich dem EU-Projekt ReICoVAir (Reliable Industrial Communication Over the Air) zu verdanken. Die Zusammenarbeit und die Diskussionen mit den Kollegen haben mir immer sehr geholfen. Hervorheben möchte ich dabei Frank Burkhardt, der mir innerhalb des Projektes sehr viel Vertrauen und Zuversicht geschenkt hat. Die zahlreichen Gespräche, die wir geführt haben machten mir sehr viel Mut.

Weiterhin gilt ein besonderer Dank meiner gesamten Familie. Meinen Eltern, Schwiegereltern und meinem Bruder, Tobias, ohne Eure mentale Unterstützung und Euer Verständnis wäre die Arbeit gar nicht erst möglich gewesen. Dem Anschließen möchte ich meinen Kollegen Holger, der jetzt zu meinem Ehemann geworden ist. Dein Vertrauen in meinen Fähigkeiten und unsere zahlreichen fachlichen Diskussionen haben mich motiviert

diese Arbeit auch zu Ende zu führen. Ihr seid diejenigen, die mich über Jahre hinweg motiviert und meine Interessen in jeglicher Art und Weise unterstützt habt. Dafür sage ich Danke!

Darina Schulze-Zipper  
Magdeburg, 22.10.2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>X</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel und Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Stand der Wissenschaft</b>	<b>4</b>
2.1 Überblick Koexistenzmanagement . . . . .	4
2.2 Schlussfolgerung . . . . .	13
<b>3 Das Koexistenzmanagement als Regelkreis</b>	<b>14</b>
3.1 Beschreibung des Betrachtungsraums als Regelkreis . . . . .	14
3.2 Analogie-Funkkommunikation und Regelungstechnik . . . . .	16
3.3 Beschreibung des Arbeitsbereiches für die Regelung . . . . .	20
3.4 Schlussfolgerung . . . . .	21
<b>4 Modellierung des Koexistenzmanagements</b>	<b>23</b>
4.1 Formulierung der Anforderungen . . . . .	23
4.2 Modellierung der Regelstrecke . . . . .	24
4.2.1 Modellierung des interferenzfreien Streckenverhaltens . . . . .	28
4.2.2 Nachweis der Stabilität für das interferenzfreie Streckenverhalten .	30
4.2.3 Modellierung des interferenzbehafteten Streckenverhaltens . . . . .	32
4.2.4 Nachweis der Stabilität des interferenzbehafteten Streckenverhaltens	33
4.3 Reglerentwurf zum Koexistenzmanagement . . . . .	35
4.3.1 Modelprädiktive Regelung in der <i>max – plus</i> -Algebra . . . . .	39
4.3.2 Formulierung des Optimierungsproblems für die modellprädiktive	
Regelung (Modell Predictive Control) (MPC) . . . . .	42

4.3.3	Regler als zentrale Instanz . . . . .	47
4.3.4	Regler als dezentrale Instanz . . . . .	48
4.4	Schlussfolgerung . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Validierung des Modells für den Regelkreis</b>	<b>50</b>
5.1	Beschreibung des <i>Hardware in the Loop</i> – Versuchsaufbaus . . . . .	50
5.2	Parametrierung des Modells für die Regelung . . . . .	52
5.3	Validierung des Modells für die Regelung . . . . .	56
5.3.1	Formulierung der Testfälle . . . . .	56
5.3.2	Validierung des Modells für die zentrale Regelung . . . . .	59
5.3.3	Validierung des Modells für die dezentrale Regelung . . . . .	64
5.4	Schlussfolgerung . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>69</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	69
6.2	Ausblick . . . . .	70
<b>Anhang A Analyse des Systemverhaltens</b>	<b>72</b>	
A.1	Nachweis der Nichtlinearität des Systemverhaltens im Zustandsraummodell (ZRM) . . . . .	72
A.2	Die <i>max-plus</i> Algebra . . . . .	73
A.3	Explizite Bildungsvorschrift-Interferenzfrei . . . . .	74
A.4	Explizite Bildungsvorschrift-Interferenzbehaftet . . . . .	76
<b>Anhang B Analyse des Optimierungsproblems</b>	<b>79</b>	
B.1	Nachweis der Nichtlinearität für den <i>max</i> -Term . . . . .	79
B.2	Formulierung eines konvexen Optimierungsproblems . . . . .	80
<b>Anhang C Implementierung der Modelle für die Regelung</b>	<b>84</b>	
C.1	Implementierung des Modells für die zentrale Regelung . . . . .	87
C.2	Implementierung des Modells für die dezentrale Regelung . . . . .	94
<b>Anhang D Messergebnisse zur Validierung der Regelung</b>	<b>105</b>	
D.1	Messergebnisse für die zentrale Regelung . . . . .	105
D.2	Messergebnisse für die dezentrale Regelung . . . . .	110
<b>Glossar</b>	<b>116</b>	
<b>Eigene Publikationen</b>	<b>119</b>	
<b>Betreute wissenschaftliche Arbeiten</b>	<b>122</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>123</b>	

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>BT</b>	Bluetooth
<b>bzgl.</b>	bezüglich
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>C</b>	Regler (Controller)
<b>CACCA</b>	Coexistence Aware Clear Channel Assessment
<b>C2x</b>	Auto zu x Kommunikation (Car to x Communication)
<b>CCP</b>	Zentrale Verwaltungseinheit (Central Coordination Point)
<b>CR</b>	Cognitive Radio
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance
<b>CW</b>	Wettbewerbsfenster (Command Window)
<b>dBm</b>	Dezibel Milliwatt - Leistungspegel
<b>DAF</b>	Distributed Application Function
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DOME</b>	Distributed Object Model Environment
<b>DIFS</b>	DCF Interframe Spacing
<b>ELCP</b>	Extended Linear Complementary Problem
<b>FG</b>	Funkgerät
<b>FH</b>	Frequency Hopping
<b>FKS</b>	Funkkommunikationssystem (Wireless Communication System)
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>Gl.</b>	Gleichung
<b>IoT</b>	Internet der Dinge (Internet of Things)
<b>Kap.</b>	Kapitel
<b>LBT</b>	Listen Before Talk
<b>LP</b>	Lineare Programmierung (Linear Programming)
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>MPC</b>	modellprädiktive Regelung (Modell Predictive Control)
<b>NRX</b>	Anzahl der empfangenen Nachrichten
<b>NTX</b>	Anzahl der gesendeten Nachrichten
<b>NVR</b>	Nachrichtenverlustrate

<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection Model
<b>P</b>	Regelstrecke (Plant)
<b>QoC</b>	Qualität der Koexistenz (englisch Quality of Coexistence)
<b>Q</b>	Quelle (Source)
<b>SDN</b>	Software Defined Networking
<b>SIFS</b>	Short Interframe Spacing
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>Tab.</b>	Tabelle
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>WCF</b>	Funkkommunikationsfunktion (Wireless Communication Function)
<b>WISA</b>	Drahtlose Schnittstelle für Sensoren und Aktoren (Wireless Interface for Sensors and Actuators)
<b>W</b>	Watt
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WSAN-FA</b>	Wireless Sensor Actor Network - Factory Automation
<b>Z</b>	Ziel (Target)
<b>ZRM</b>	Zustandsraummodell

# Symbolverzeichnis

$A$	Systemmatrix
$B$	Eingangsvektor
$C$	Ausgangsvektor
$D$	Störung/Interferenz
$E$	Regelabweichung
$f(\cdot)$	Zustandsfunktion
$G$	Petri-Netzgraph
$g$	Prädiktionsvektor für die Anfangszustände
$H$	Prädiktionsmatrix für das Eingangsverhalten
$h(\cdot)$	Ausgangsfunktion
$i$	Nummerierung des Funkkommunikationssystems
$l$	Nummerierung der logischen Verbindung
$pl$	Nummerierung der physikalischen Verbindung
$P$	Index für den Prädiktionshorizont
$p$	Sub-Regelstrecke
$s$	Absolute Anzahl der Funkkommunikationssysteme
$U$	Stellgröße
$a$	Index für anwendungsbezogene Stellgröße
$ds$	Index für geräte- und systembezogene Stellgröße
$v$	Verzögerungen an den Transitionen
$W$	Führungsgröße
$Y$	Regelgröße
$\mathbb{N}$	Menge aller natürlichen Zahlen ohne die Null
$\mathbb{R}$	Menge aller reellen Zahlen
$\oplus$	Max-Operator
$\otimes$	Plus-Operator
$\theta$	Platz
$\lambda$	Transition
$\xi$	Kante
$\nu$	Wichtung

# Kurzfassung

Die Digitalisierung, die digitale Fabrik und die damit verbundene Vernetzung von Produktionsressourcen beschreiben nur einige Schwerpunkte aktueller Diskussionen um die Themen Industrie 4.0, das Internet der Dinge (Internet of Things) (IoT) oder die Entwicklung der 5. Generation mobiler Netzwerke (5G). Ziel ist es unter anderem die physische Ebene mit der digitalen Ebene im Produktionsprozess zu verbinden. Anwendungsbereiche davon sind beispielsweise die Kommunikation zwischen Fahrzeugen in der Automobil- und der Schiffsbranche oder in der industriellen Kommunikation hinsichtlich verschiedener Produktionssysteme. Um die Vernetzung zwischen Maschinen und Endpunkten flexibler zu gestalten, erhält zunehmend die drahtlose Kommunikation an Aufmerksamkeit. Dabei werden die Anforderungen an das Zeit- und Fehlerverhalten der Nachrichtenübertragung bei komplexeren Produktionsprozessen zunehmend höher gestellt. Diese stetig wachsenden Anforderungen sind Kernaspekte im Bereich 5G. Das Ziel hierbei ist es, für diese Anforderungen die notwendigen Kapazitäten und Datenraten zur Verfügung zu stellen. Dabei nimmt die Zahl der Maschinen und Endpunkte innerhalb der Produktionshalle zu, wodurch das Nachrichtenaufkommen in der Funkkommunikation ansteigt. Damit wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Nachrichten während der Kommunikation verloren gehen oder mit einer zusätzlichen zeitlichen Verzögerung an ihrem jeweiligen Ziel ankommen. An dieser Stelle ist der Begriff der drahtlosen Koexistenz von hoher Wichtigkeit. Wie im Rahmen der nationalen und internationalen Standardisierungsarbeit festgelegt, beschreibt der Begriff der drahtlosen Koexistenz einen Zustand, in dem alle Funkkommunikationslösungen einer Anlage, die ein gemeinsames Medium nutzen, alle Kommunikationsanforderungen ihrer Anwendung erfüllen. Das Ziel eines daraus resultierenden drahtlosen Koexistenzmanagements soll sein, die Prozesse koordiniert aufeinander abzustimmen und durch entsprechende Maßnahmen die Endgeräte zu konfigurieren, damit die drahtlose Koexistenz erhalten bleibt bzw. wieder hergestellt wird.

Das Anwendungsgebiet der vorliegenden Arbeit gliedert sich in die industrielle Funkkommunikation ein. Das Ziel ist es, ein methodisches Vorgehen für ein technologieübergreifendes und automatisiertes drahtloses Koexistenzmanagement zu untersuchen. Das Besondere hierbei ist der technologieübergreifende Ansatz. Es ist somit nicht entscheidend welche Funktechnologien (Wireless Local Area Network (WLAN), Bluetooth, Wireless Interface for Sensors and Actuators (WISA) oder ZigBee) verwendet werden. Dieser An-

satz ist im Vergleich zum aktuellen Stand der Wissenschaft einmalig. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein neues Konzept entwickelt, welches auf der Formulierung des drahtlosen Koexistenzmanagements als Regelkreis beruht. Diese Herangehensweise erlaubt die Möglichkeiten die aktuellen Systemzustände kontinuierlich zu erfassen und so zu bewerten, dass gegebenenfalls Maßnahmen für die Beeinflussung des Systemverhaltens getroffen werden können. Diese Art der Formulierung und Umsetzung ist im Bereich des drahtlosen Koexistenzmanagements neu. Die Methoden für die Modellierung solch eines Regelkreises werden untersucht, wobei festgestellt wird, dass ein nichtlineares Systemverhalten in der klassischen Algebra vorliegt. Für die Untersuchungen wird daher eine Transformation mit Hilfe der *max – plus*-Algebra vorgenommen, um ein lineares Systemverhaltens zu erhalten. Die vorgeschlagene Regelung wird auf einem modellprädiktiven Ansatz beruhen, welcher zentral und dezentral ausgeführt ist. Das Ziel ist es, die Nachrichtenübertragung verschiedener Funkkommunikationssysteme zeitlich zu entkoppeln. Begleitet werden diese Untersuchungen durch mathematische Stabilitätsbeweise, welche darauf schlussfolgern, ob die Nachrichten an ihren jeweiligen Zielen zeitverzögert angekommen sind. Die Validierung und Auswertung der entsprechenden Methoden erfolgt an einem industrienahen *Hardware in the Loop*-Versuchsaufbau, der speziell für diese Versuchsreihen aufgebaut wird. In der vorliegenden Arbeit werden dazu Testfälle für homogene und heterogene Funkkommunikationssysteme definiert. Heterogen in dem Sinne bedeutet, dass unterschiedliche Funktechnologien wie WLAN und Bluetooth verwendet werden. Anhand des Versuchsaufbaus und der Testfälle wird gezeigt, dass die modellprädiktive Regelung in der *max – plus*-Algebra für solch ein drahtloses Koexistenzmanagement geeignet ist.

# Abstract

Digitalization, digital factory and associated interconnection of production ressources describe some of the main topics in Industrie 4.0, Internet of Things (IoT) or development of the fifth generation mobile networks (5G) recently. The ultimate vision is the connection of the physical world with the digital world amongst others. Application areas include for example the connectivity between vehicles in the automotive- and shipindustry as well as the industrial communication of various production systems. For designing a flexible interconnection between the machines and endpoints, the interests in wireless communication is growing. In industrial wireless communication systems, the demands for outstanding time and fault behaviour during the message transmission are increasing. These constantly growing demands are core aspects in 5G. The aim here is to provide the capacity to meet the high demands on data volumes and data rates. Infact, the number of machines and endpoints within the production hall multiplies, which increases the amount of messages in wireless communication. This increases the probability, that messages can be lost or arrive at their target with an additional time delay. At this point, a definition for the wireless coexistence is of great importance. As defined within the framework of national and international standardization activities, the concept of wireless coexistence describes a state in which all wireless communication solutions of a system using a common medium fulfil all communication requirements of their application. The purpose of the wireless coexistence management should be to coordinate the processes and to configure the end devices through appropriate measures so that the wireless coexistence is maintained or restored.

The application field of this thesis focusses on the industrial wireless communicaion. The goal is to investigate a methodical procedure for a cross-technology and automated wireless coexistence management in the industrial wireless communication. The special thing about this is the employment of the cross-technology approach. It is therefore not decisive which wireless technology (Wireless Local Area Network (WLAN), Bluetooth, Wireless Interface for Sensors and Actuators (WISA) or ZigBee) is used. This approach is unique compared to the current state of the science. In this thesis a new concept is developed, which is based on the formulation of a wireless coexistence management as a control loop. This approach allows the possibilities to continuously measure and evaluate the current system state in such a way that, if necessary, measures can be taken on

the system behavior. This type of formulation and implementation is new in the field of wireless coexistence management compared to the current state of the science. Methods for modelling such a control loop are investigated, where it is determined that there is a non-linear system behavior in the classical algebra. For the investigations a transformation into a linear system behavior in *max – plus*-algebra is performed. The proposed controller is based on a model predictive approach, which is centralized and decentralized. The aim is to decouple the message transmission of different wireless communication systems in time. These investigations are accompanied by mathematical proofs of stability, which conclude whether the messages arrived at their respective targets with an additional time delay. For the validation and the evaluation of these methods an industry oriented *Hardware in the Loop*-experimental setup is introduced. This thesis defines several homogeneous and heterogeneous test cases. The heterogeneity refers to the involvement of different wireless technologies such as WLAN and Bluetooth. On the basis of the test setup and the test cases, it is shown that the model predictive control in the *max – plus* algebra is suitable for such a coexistence management.

