

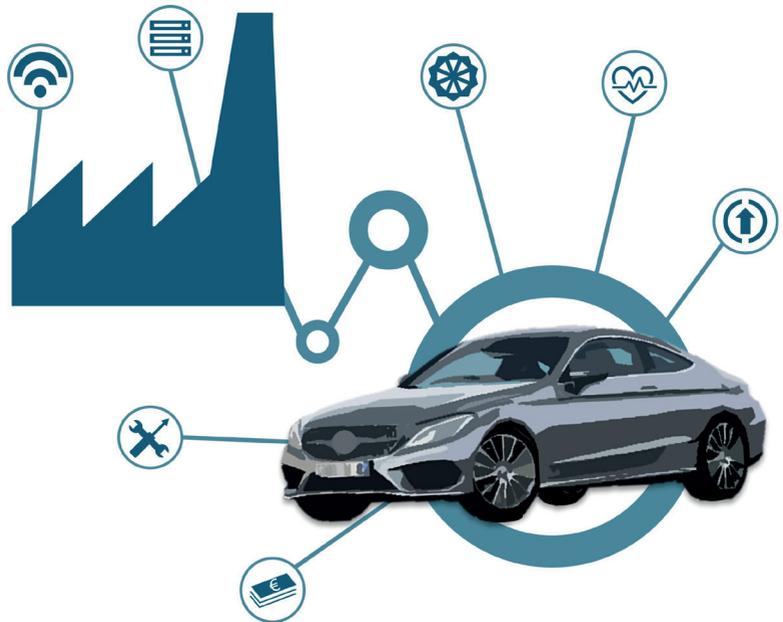
# Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Florian Gruß

Band 5

## Ganzheitliche Untersuchung der drahtlosen Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktionsinfrastruktur für eine zukunftsfähige Inbetriebnahme



**SHAKER  
VERLAG**

**ZeMA**

Ganzheitliche Untersuchung der drahtlosen  
Vernetzung des Fahrzeugs  
mit der Produktionsinfrastruktur  
für eine zukunftsfähige Inbetriebnahme

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

von

Florian Jörg Gruß

Saarbrücken

2021

**Tag des Kolloquiums:** 9. September 2021

**Dekan:** Prof. Dr. Jörn Eric Walter

**Berichterstatter:** Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller  
Prof. Dr.-Ing. Georg Frey

**Akad. Mitglied:** Dr.-Ing. Paul Motzki

**Vorsitz:** Prof.-Ing. Michael Vielhaber

Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Band 5

**Florian Gruß**

**Ganzheitliche Untersuchung der drahtlosen Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktionsinfrastruktur für eine zukunftsfähige Inbetriebnahme**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8351-4

ISSN 2512-6369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Anstellung bei der Daimler AG in Kooperation mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken. Für das Vertrauen, die Unterstützung und das Überlassen der Thematik bedanke ich mich an dieser Stelle bei allen Beteiligten sehr herzlich.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing Rainer Müller, der mir diese Arbeit ermöglichte. Seine Erfahrungen, fachlichen Anregungen sowie sein Vertrauen trugen maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit bei. Ich danke ebenfalls Prof. Dr.-Ing Georg Frey sehr herzlich für die Übernahme des Korreferats und den letzten Feinschliff des Manuskripts.

Meinem damaligen Abteilungsleiter Rainer Michael Rösch und Bereichsleiter Martin Kelterer sowie meinem aktuellen Abteilungsleiter Ralf Kniefert und meinen Teamleitern Nikolai Kedzierski, Stefan Kochwatsch und Axel Trautmann danke ich für den ermöglichten Freiraum während dieser Arbeit.

Ebenso gilt mein Dank Dr. Marco Kick und Thomas Wurdig für den Zugang zu deren Entwicklungsplattform, welche einen erheblichen Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit beigesteuert hat. Dr. Philipp Skogstad und seinem Bereich von MBRDNA danke ich für die Ermöglichung des erfolgreichen Forschungsprojekts in Long Beach, welches zu vielen Erkenntnissen in dieser Dissertation beigetragen hat. Für die vielen fachlichen Diskussionen und ihre Zusammenarbeit möchte ich mich bei Daniel Brauneis, Lars Marten, Christine Keegan und Bernd Napholz besonders bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich sehr herzlich bei den Kolleginnen und Kollegen im Werk Düsseldorf und der Technologiefabrik, insbesondere aus dem E/E Integrationscenter für die hervorragende Zusammenarbeit und fachlichen Austausch. Meinen studentischen Mitarbeitern danke ich für ihren motivierten und engagierten Einsatz.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich stets in jeglicher Hinsicht unterstützt hat. Ich danke ganz besonders meiner Partnerin Ina für ihr Verständnis sowie ihre liebevolle und tatkräftige Unterstützung während der stressigen Zeit bei der Entstehung dieser Arbeit.

Böblingen, 10.09.2021

## Kurzfassung

Die Industrie befindet sich zurzeit weltweit in einem epochalen Umbruch. Der stetig wachsende Kostendruck fordert die Unternehmen zunehmend, sämtliche Stufen der Wertschöpfungskette zu optimieren. Zu diesem Zweck werden moderne Informations- und Kommunikationstechniken eingesetzt.

Im Automobilbau stellt sich dabei korrespondierend zu immer intelligenter werdenden Fahrzeugen die Aufgabe, das Produkt immer enger mit der Produktion zu vernetzen. Derzeit werden externe Inbetriebnahme-Testgeräte über ein Kabel mit der Diagnose-schnittstelle im Fahrzeug verbunden, um Steuergeräte im Fahrzeug zu konfigurieren, einzustellen und zu prüfen. Allerdings sind diese Inbetriebnahme-Testgeräte heutzutage in ihrer Nutzung stark eingeschränkt und arbeitsaufwendig.

Die vorliegende Arbeit leistet einen wissenschaftlichen Beitrag zu einem neuartigen Ansatz, der unter Anwendung von innovativen Vernetzungstechnologien in Verbindung mit optimierten IT-Ansätzen eine kabellose Kommunikation mit dem Fahrzeug ermöglicht. Zunächst wird dazu eine geeignete Vernetzungstechnologie ausgewählt und analysiert. Mithilfe dieser werden anschließend mehrere Ansätze für ein innovatives Inbetriebnahmesystem entwickelt und diese in die Prozesslandschaft der Fahrzeugmontage überführt. Somit kann gezeigt werden, dass die kabellose Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktionsinfrastruktur einen wichtigen Baustein zur effizienzsteigernden Optimierung der Wertschöpfung in der Produktion darstellt.

## **Abstract**

The industry is currently going worldwide through a major change. To overcome the steadily growing cost pressure and increasing global competition, the aim is to optimize all stages of the value chain. Therefore, modern information and communication technologies are being used for this purpose.

As in the automotive industry vehicles become more and more intelligent, the task is to connect the product more closely with production. External commissioning test devices are currently connected to the vehicular on-board diagnostics interface via a cable in order to configure, adjust and test control units in the vehicle. However, the usage of those commissioning test devices is currently limited and labour-intensive.

The present dissertation makes a scientific contribution to a novel approach that enables wireless communication with the vehicle, using innovative networking technologies in connection with optimized IT approaches. First, a suitable networking technology is selected and analyzed. With help of this contribution, several approaches for an innovative commissioning system are then developed and transferred to the process landscape of automotive assembly. Thus, it can be shown that the wireless connection of the vehicle with the production infrastructure is an important component for the efficient optimization of value creation in production.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik in Forschung und Industrie .....</b>	<b>3</b>
2.1 E/E-Architektur .....	3
2.2 Konnektivität .....	7
2.2.1 Fahrzeugantenne .....	8
2.2.2 Wireless Local Area Network .....	10
2.2.3 Mobilfunk .....	12
2.2.4 Sicherheit .....	17
2.3 Software .....	20
2.3.1 Service-orientierte Architekturen .....	21
2.3.2 Drahtlose Software-Aktualisierung .....	22
2.4 Inbetriebnahme .....	24
2.4.1 Entwicklung der Inbetriebnahme .....	25
2.4.2 Inbetriebnahme in der Fahrzeugproduktion .....	26
2.4.3 Einordnung in die Fahrzeugproduktion .....	28
<b>3 Forschungsfrage und Vorgehensweise .....</b>	<b>32</b>
<b>4 Analyse der Vernetzungstechnologien .....</b>	<b>34</b>
4.1 Randbedingungen in der Montage .....	34
4.2 Vergleich der Vernetzungstechnologien .....	36
4.2.1 Vorgehen bei der Nutzwertanalyse .....	36
4.2.2 Bewertungskriterien .....	37
4.2.3 Bewertung der Alternativen .....	39
4.2.4 Summierung und Auswahl .....	44
4.3 Detaillierte Bewertung von WLAN .....	45
4.3.1 Breite der Kanäle .....	46
4.3.2 Modulationsverfahren .....	48
4.3.3 Anzahl der gleichzeitigen Datenströme .....	51
4.4 Validierung der Datenrate .....	53
4.4.1 Richtungsabhängigkeit des Fahrzeugs .....	53
4.4.2 Abstandsabhängigkeit des Fahrzeugs .....	56
4.4.3 Vergleich der Leistungsparameter .....	58
4.5 Zusammenfassung des Kapitels .....	59

---

<b>5</b>	<b>Entwicklung des Inbetriebnahmesystems .....</b>	<b>61</b>
5.1	Aktuelles Inbetriebnahmesystem .....	61
5.2	Impulse für ein neuartiges Inbetriebnahmesystem .....	65
5.3	Cloudgesteuerter Ansatz .....	68
5.3.1	Automotive Ethernet .....	68
5.3.2	Diagnostics over Internet Protocol .....	69
5.3.3	Umsetzung .....	71
5.4	Fahrzeuggesteuerter Ansatz .....	73
5.4.1	Service-orientierte Architekturen für die Inbetriebnahme .....	74
5.4.2	Umsetzung .....	77
5.5	Validierung der Ansätze .....	79
5.5.1	Bandbreite .....	80
5.5.2	Latenz .....	81
5.6	Zusammenfassung des Kapitels .....	85
<b>6</b>	<b>Gestaltung des Inbetriebnahmeprozesses .....</b>	<b>87</b>
6.1	Heutiger Inbetriebnahmeprozess .....	87
6.2	Ableiten neuer Inbetriebnahmeprozesse .....	91
6.3	Ablaufgesteuerte Inbetriebnahme .....	92
6.4	Prozessgesteuerte Inbetriebnahme .....	94
6.4.1	Konzept .....	95
6.4.2	Umsetzung .....	99
6.5	Erprobung der Prozesse .....	101
6.5.1	Beschreibung des Türsteuergeräts .....	101
6.5.2	Ermittlung und Vergleich der Zeitanteile .....	103
6.6	Kombinierter Inbetriebnahmeprozess .....	107
6.7	Zusammenfassung des Kapitels .....	109
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>110</b>
7.1	Zusammenfassung .....	110
7.2	Ausblick .....	112
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>XV</b>

## Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\vec{E}$	$V\ m^{-1}$	Elektrische Feldstärke
$f_{bit}$	$sek^{-1}$	Bitrate
$f_{Data}$	$sek^{-1}$	Bandbreite
$\vec{H}$	$A\ m^{-1}$	Magnetische Feldstärke
$k_{Transport}$	-	Transportfaktor für CAN
$L_P$	dB	Leistungspegel
$n_{Data}$	-	Anzahl der Nutzdaten
$n_{Header+Trailer}$	-	Anzahl der Daten im Paketkopf und -ende
$P$	W	Signalleistung
$P_0$	W	Bezugssignalleistung
$\vec{S}$	W	Strahlungsleistung
$T_{Antwort,erf}$	sek	Erforderliche Antwortzeit
$T_{Antwort,ges}$	sek	Gesamte Antwortzeit
$T_{Antwort,WLAN}$	sek	Antwortzeit von WLAN
$T_D$	sek	Periodendauer
$T_{Frame}$	sek	Übertragungsdauer des Datenpakets
$T_{Frame,CAN}$	sek	Übertragungsdauer eines CAN Pakets
$T_{Frame,UDP/IPv6}$	sek	Übertragungsdauer eines Ethernet UDP Pakets über IPv6
$T_{Latenz,CAN}$	sek	Latenz von CAN
$T_{Latenz,Ethernet}$	sek	Latenz von Ethernet
$T_{Latenz,ges}$	sek	Gesamtlatenz
$T_{Latenz,WLAN}$	sek	Latenz von WLAN
$T_{Switch}$	sek	Verzögerungszeit durch einen Switch
$T_{Warte,M}$	sek	Wartezeit bei der Paketübertragung

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
5G	Fünfte Generation des Mobilfunks
ABS	Antiblockiersystem
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
ASAM	Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems
CAN	Controller Area Network
CASE	Strategie zur Umsetzung von Connectivity, Autonomous, Shared Services, Electric Driving
D2D	Device To Device
DAB	Digital Audio Broadcasting
DoIP	Diagnostics over Internet Protocol
DSL	Digital Subscriber Line
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVB	Digital Video Broadcasting
ECU	Electronic Control Unit
E/E	Elektrik/Elektronik
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HMI	Human Machine Interfaces
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
ICMP	Internet Control Message Protocol
IMEI	International Mobile Equipment Identity
ISM Band	Industrial, Scientific and Medical Band
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol

---

LIN	Local Interconnect Network
LTE	Long Term Evolution
LW	Langwellenrundfunk
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
mmWave	Millimeterwellen
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MU-MIMO	Multi User Multiple Input and Multiple Output
RFID	Radio Frequency Identification
OBD	On Board Diagnose
ODX	Open Diagnostic Data Exchange
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OSI	Open Systems Interconnection
OTA	Over The Air
PDU	Protocol Data Unit
PKI	Public-Key-Infrastruktur
PSK	Pre-Shared-Key
QAM	Quadratur-Amplituden-Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying Modulation
REST	Representational State Transfer
RPC	Remote Procedure Call
RSE	Rear Seat Entertainment
SIM	Subscriber Identity Module
SISO	Single Input and Single Output
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SOA	Service-orientierte Architekturen
SOAP	Simple Object Access Protocol
SOME/IP	Standard Scalable service-Oriented MiddlewarE over IP
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Transport Layer Security
TTL	Time To Live

UDP	User Datagram Protocol
UDS	Unified Diagnostics Service
UKW	Ultrakurzwellen
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNII Band	Unlicensed National Information Infrastructure
VCI	Vehicle Communication Interface
VPN	Virtual Private Network
WEP	Wired Equivalent Privacy
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WSA	Werkschlussabnahme