

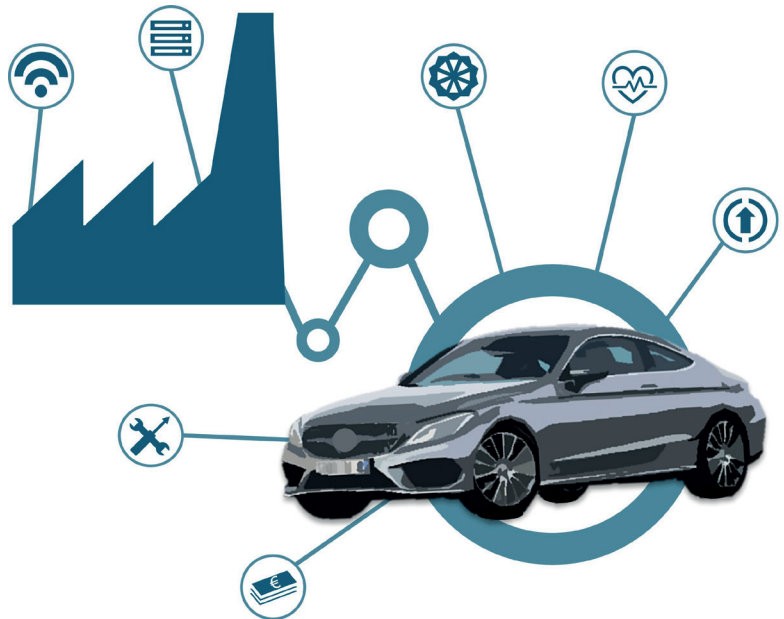
# Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

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 <sup>-1</sup> | Elektrische Feldstärke                                |
| $f_{bit}$             | sek <sup>-1</sup> | Bitrate   |
| $f_{Data}$            | sek <sup>-1</sup> | Bandbreite  |
| $\vec{H}$             | A m <sup>-1</sup> | 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                              |