

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

# 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

Inhaltsverzeichnis .....	I
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis .....	III
<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

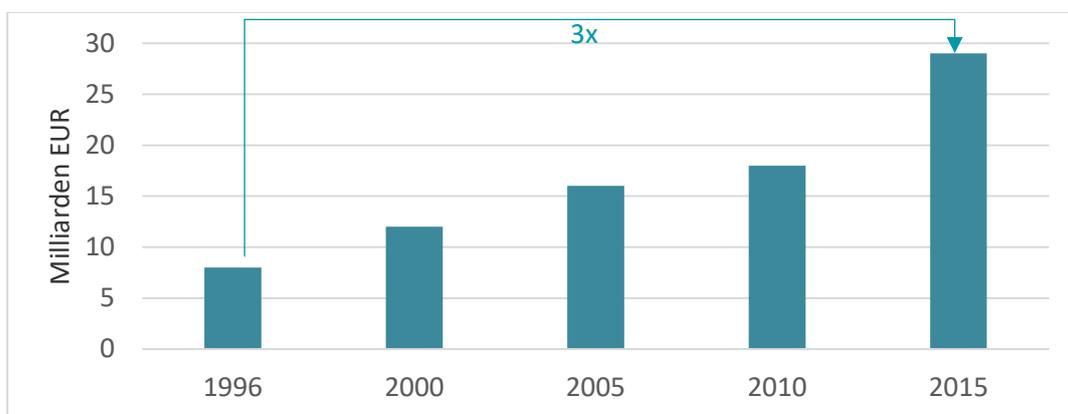
---

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

# 1 Einleitung

Der Fahrzeugkunde entwickelt stetig höhere Ansprüche an Automatisierung, Sicherheit und Umweltschutz sowie an die Vernetzung der Fahrzeuge. Darüber hinaus verschärft der Gesetzgeber zunehmend die Abgas- und Sicherheitsbestimmungen. Gleichzeitig haben die Elektrik und Elektronik (E/E) der Fahrzeuge einen großen Fortschritt in den letzten Jahren gemacht. Rechenleistung und Speicherkapazität verzeichnen nach dem nach wie vor gültigen Mooreschen Gesetz ein exponentielles Wachstum. Daher erzielt der zunehmende Einsatz von Elektrik und Elektronik im Fahrzeug eine Befriedigung der steigenden Ansprüche des Kunden an das zukünftige Fahrzeug. Bereits heute kann man eine Verdreifachung der Halbleiterverkäufe an die Fahrzeughersteller und Zulieferer in den letzten 20 Jahren beobachten. [EU17]



**Abbildung 1:** Verkauf von Halbleitern an die Automobilbranche [MCK18]

Dies führt zu einem gänzlichen Umdenken der Automobilindustrie, da klassische Bereiche wie Antrieb, Fahrwerk und Karosserie bereits ein hohes Entwicklungsniveau hinsichtlich Vollständigkeit und Reife erreicht haben. Somit lösen die Elektrik und Software die bewährte Mechanik immer mehr von ihrer Rolle als Innovationsmotor ab. So wird voraussichtlich 2030 die Software bei einem durchschnittlichen Fahrzeug 30% seines Wertes ausmachen. [MCK18]

Getrieben durch die rasant wachsende Konsumelektronik werden immer mehr Funktionen über Software in das Fahrzeug gelangen. Zusätzlich bietet das Fahrzeug vermehrt die Möglichkeit, Daten mit der Umwelt auszutauschen. Dieses Innovationsfeld wird als Fahrzeug-Konnektivität bezeichnet und geht davon aus, dass eine nahtlose Verbindung aus dem Fahrzeug heraus mit der Umwelt möglich ist. Dies geht wiederum mit dem Angebot von ganz neuartigen Mobilitätskonzepten einher. Neue Mobilitätsdienstleistungen sollen den Kunden zukünftig einfacher durch seinen Alltag begleiten. Ferner entwickelt sich das Innovationsfeld der Fahrerassistenzsysteme vom hochautomatisierten Fahren zum autonomen Fahren. Dies wird durch die Elektromobilität noch komfortabler und umweltfreundlicher sein. Der Kunde erlebt durch die Steuerung der elektrischen Antriebe sowie der Batterie-Steuerung nicht nur ein ganz neuartiges

Fahrverhalten, sondern sieht dieses Innovationsfeld durch die vernetzte On-board und Off-board Ladeinfrastruktur als eine echte Alternative zum Verbrennungsmotor.

Daher setzten die Fahrzeughersteller schon frühzeitig strategisch auf die vier Innovationsfelder der Vernetzung, des Autonomen Fahrens, der Mobilitätsdienstleistungen sowie des elektrischen Fahrens.



**Abbildung 2:** CASE als Bestandteil der Unternehmensstrategie der Daimler AG [DAI17a]

Um diese Innovationsfelder im Fahrzeug zu realisieren, muss einerseits mit einer steigenden Komplexität des vernetzten E/E Gesamtsystems im Fahrzeug gerechnet werden. Dies hat vielstufige funktionale Wechselwirkungen und dynamische Abhängigkeiten, die trotz umfangreichen Wissens über Komponenten- oder Teilsystemverhalten nur schwer zu beherrschen und in Betrieb zu nehmen sind.

Andererseits bringen sie durch die steigende Vernetzung und Intelligenz des Fahrzeugs auch neue Möglichkeiten für eine höhere Transparenz und Effizienz im Herstellungsprozess. Kritische Zustände können so bereits frühzeitig in der Produktion des Fahrzeugs entdeckt und behoben werden, so dass der Kunde ein einwandfreies Fahrzeug ausgeliefert bekommt. Ferner kann über eine Vernetzung mit der Produktion automatisiert Software in das Fahrzeug geladen werden. Durch den Wegfall von zusätzlichen Inbetriebnahme-Testgeräten kann somit die Fahrzeugproduktion effizienter werden. Um die steigende Komplexität weiterhin für die Inbetriebnahme von zukünftigen Fahrzeugen beherrschen zu können, müssen daher neue Anforderungen an die E/E-Architektur sowie an die Software erfüllt werden. [PIS16]

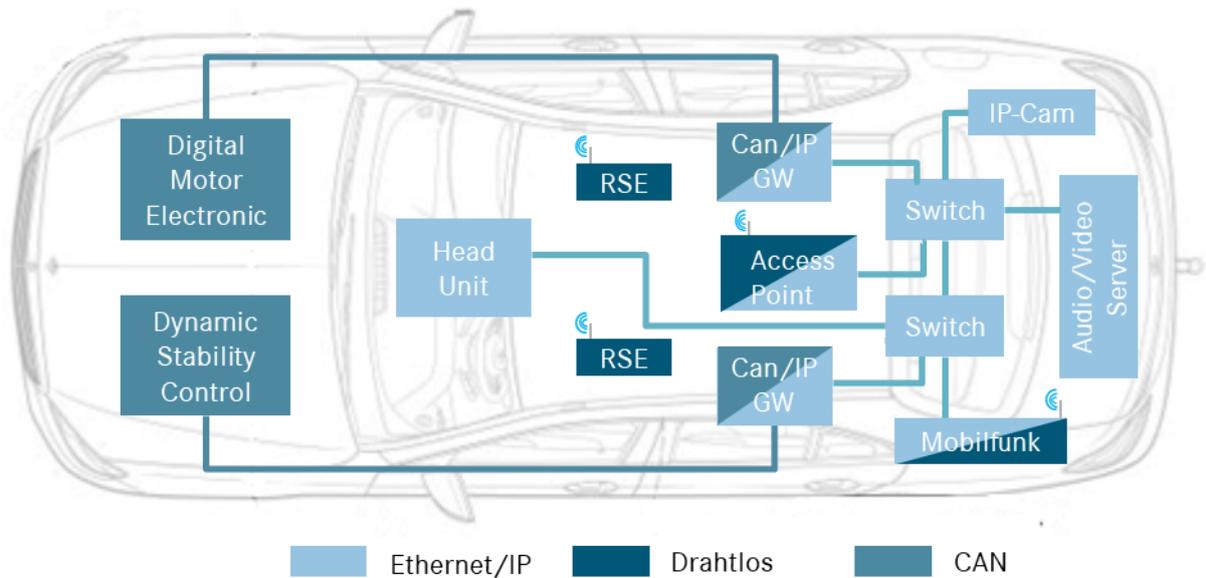
## 2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Umgebung wird in der Literatur häufig als die Car2X-Strategie bezeichnet. In Anlehnung an diese Strategie wird nachfolgend der Stand der Technik aus Forschung und Industrie für die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktion dargelegt. Zunächst wird auf die elektrischen und elektronischen Komponenten innerhalb der Fahrzeugarchitektur eingegangen, um dort den Einfluss der fahrzeugtechnischen Entwicklung auf die Vernetzung darzustellen. Die darauf aufbauende Softwarestrategie und ihre Aktualisierungsmechanismen werden dann im Kontext der Vernetzung auf die fahrzeugtechnische Inbetriebnahme angewendet. Anschließend wird der Wissensstand über die heutige Inbetriebnahme vermittelt und die Inbetriebnahme abschließend in die Fahrzeugproduktion eingeordnet.

### 2.1 E/E-Architektur

Im Hinblick auf die Konnektivität, Automatisierung der Fahrzeuge wie auch der Elektromobilität wird das Fahrzeug von morgen intelligenter sowie auch vernetzter als heute sein. Jedoch wird sich dafür nicht wie in der Vergangenheit die Anzahl der Steuergeräte im Fahrzeug erhöhen. Weitere Leistungssteigerungen von Elektrik und Elektronik werden stattdessen über eine höhere Integration innerhalb der Steuergeräte erreicht [PIS16]. Dadurch verändert sich nicht nur die Leistungsstärke einiger Steuergeräte, es wird sich auch grundlegend die E/E-Architektur verändern. So führt einerseits der erhöhte Bedarf an Rechenleistung für neue Aufgaben zum Einzug von Mikroprozessoren in die Steuergeräte. Andererseits ergänzen sie somit auch immer mehr die bisher im Automobilbereich eingesetzten Mikrocontroller. Im Zusammenschluss mit mehreren Mikrocontrollern und auch einem Mikroprozessor ergibt sich dann ein Hochleistungssteuergerät.

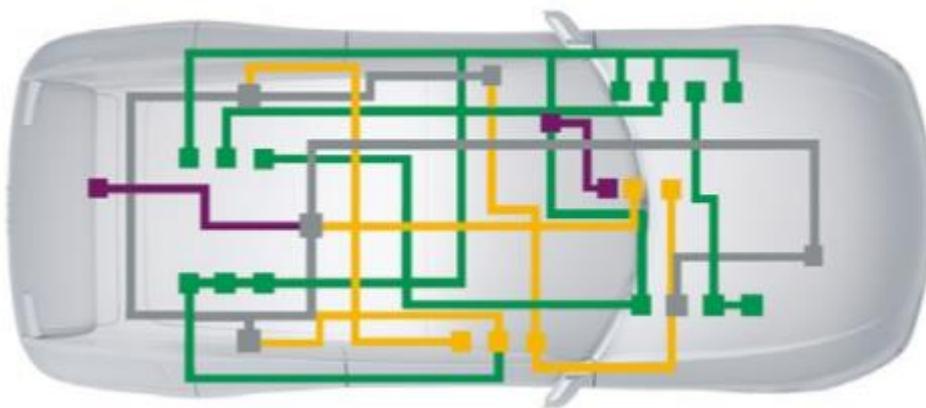
Diese Hochleistungssteuergeräte werden in Domänen- und Zentralserverarchitekturen des Fahrzeugs eingebunden und bewirken somit eine Umstrukturierung der E/E-Architektur. Dies gilt genauso für den Einsatz vom weit verbreiteten Ethernet Standard im Fahrzeugnetz für eine höhere Datenübertragung, wie man in Abbildung 3 erkennen kann. Die damit verbundene Verwendung vom Internet Protokoll erleichtert den Anschluss des Fahrzeugs an das globale Internet. So beruhen viele IT-Anwendungen wie Smartphones, IoT Devices etc. bereits auf diesem Standard und können folglich leichter mit dem Fahrzeug interagieren. [STE08a], [SCH17], [ZIM14a]



**Abbildung 3:** Unterschiedliche IP-Teilnehmer im Fahrzeug [STE08a]

Mit dem Trend von leistungsstarken Steuergeräten und einer fortgeschrittenen Vernetzungstechnologie im und außerhalb des Fahrzeugs, wird auch immer mehr auf eine stärkere Entkopplung einzelner Steuergeräte Wert gelegt. Änderungen eines einzelnen Steuergeräts sollen möglichst geringfügig das restliche System beeinflussen.

Allerdings lässt sich dieser Anspruch mit den konventionellen E/E-Architekturen der letzten Jahre nicht umsetzen. In der Literatur wird diese Architektur als steuengeräteorientiert bezeichnet und ist in der folgenden Abbildung dargestellt. [OER19], [LAN18]



**Abbildung 4:** Vereinfachte Darstellung einer steuengeräteorientierten E/E-Architektur [OER19]

Bei der steuengeräteorientierten Architektur sind die einzelnen Steuergeräte nur nach ihrer zugeordneten Funktion entwickelt und danach optimiert. Ihre Peripherie wie Aktoren und Sensoren ist ihnen fest zugeordnet.

Weitere Daten erhalten die Steuergeräte aus dem Fahrzeugnetzwerk, das über eine Kommunikationsmatrix genau die Kommunikationskanäle zwischen den Steuergeräten beschreibt.

Bei einer Änderung der Kommunikation zwischen den Steuergeräten bedarf es einer aufwendigen Anpassung der Kommunikationsmatrix, wie auch der Software aller zugehörigen Steuergeräte.

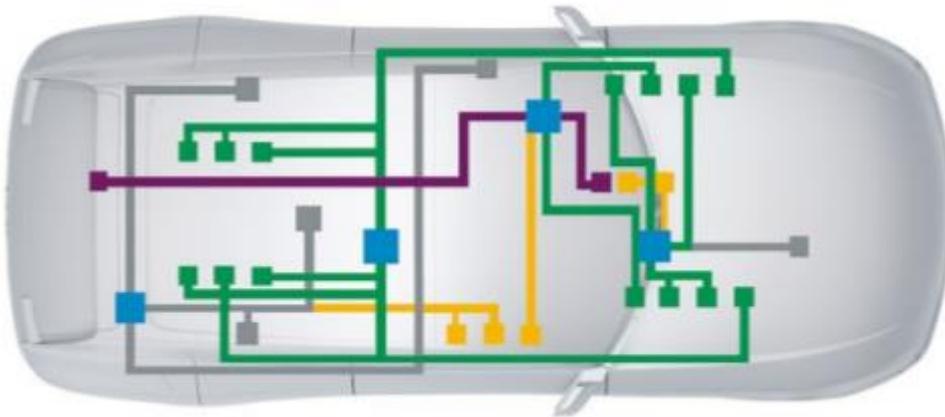
Da allerdings bei der Entwicklung der Steuergeräte bedingt durch die organisatorische Unabhängigkeit von anderen Projekten auch unterschiedliche Entwicklungsmethoden angewendet werden, ist eine übergreifende Änderung umso schwieriger. [TRA17]

Als Lösung dieser Problematik hat man die Domaincontroller-Architektur forciert. Dabei bringt man verschiedene Steuergeräte, Aktoren und Sensoren in einer Domäne zusammen. [SCH17]

Ziel ist bei der Domänenbildung, dass stark vernetzte Steuergeräte in einer Domäne zusammenhängen. Folgende Domänen haben sich laut [WOL18] etabliert:

- Antriebsstrang: Motorsteuerung, Abgasnachbehandlung, Getriebesteuerung, Elektromotoren und Hybridsteuerung
- Energiespeicher: Batteriesystem, Leistungselektronik, Laderegulierung
- Fahrsicherheit: Fahrdynamikregelung, ABS, ESP, Airbag, Adaptive Cruise Control, Abstandssensoren, Spurhalteassistenten
- Komfort: Lenkassistenten, Klimaanlage, Fensterheber, Zentralverriegelung, Spiegelverstellung
- Infotainment: Radio, DVD, Navigationssystem, Rückfahrkamera, WLAN/Internet, Konnektivität zu mobilen Endgeräten und anderen Fahrzeugen
- Erweiterte Dienste der künftigen Digitalisierung

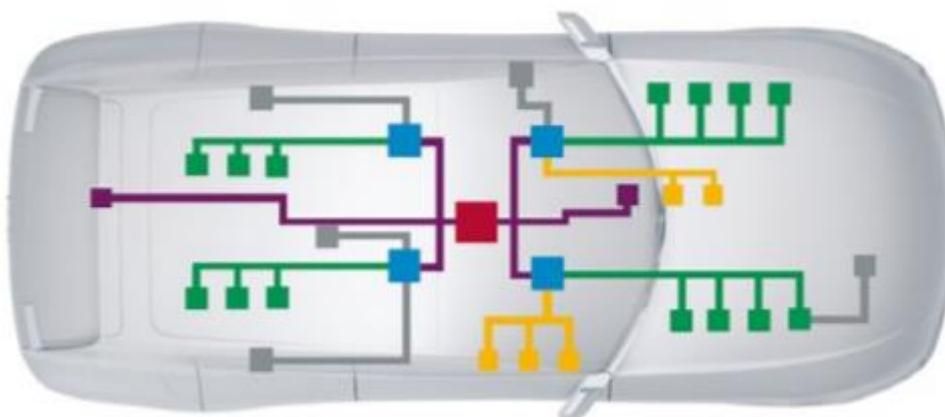
In der Domäne übernimmt ein leistungsstarker Controller die Steuerung der nachgelagerten Steuergeräte (vgl. blaues Element in Abbildung 5). Die Aktoren und Sensoren sind möglichst direkt an diesem Controller angeschlossen, so dass Anpassungen an den Funktionen innerhalb einer Domäne flexibel und leicht über den Controller umgesetzt werden können.



**Abbildung 5:** Vereinfachte Darstellung einer Domaincontroller E/E-Architektur [OER19]

Allerdings stößt auch diese Architektur bei ganz neuen Anwendungsfällen wie dem hochautomatisierten Fahren an seine Grenzen, denn dabei ist eine Kommunikation mit allen Domänen notwendig. Ergo betreffen auch Weiterentwicklungen immer das gesamte Fahrzeug. [SCH17]

Um dies zu ermöglichen, hat sich der Ansatz der Zentralrechnerarchitektur etabliert. Bei dieser Weiterentwicklung liegen die Domänen in einem zentralen Hochleistungssteuergesetz zusammen.



**Abbildung 6:** Vereinfachte Darstellung einer Zentralrechner E/E-Architektur [OER19]

In Abbildung 6 ist das Zentralsteuergerät rot gekennzeichnet. Mittels leistungsstarken Mikroprozessoren kann es die gesamte Fahrzeugfunktionalität abbilden. Vorteilhaft bei diesem System ist nun der ganzheitliche Entwicklungsansatz. Anstelle von einzelnen Steuergeräteprojekten wird nun eine gesamte Architektur entwickelt. Ebenso steht nun an erster Stelle, das gesamte System zu optimieren. [TRA17]

Genauso wird auch die Anbindung der Aktoren und Sensoren an das Zentralsteuergerät festgelegt, denn als ein weiterer Unterschied zu der Domänenarchitektur sind diese in ihrer konventionellen Form nicht mehr an dieses Steuergerät anbindbar. Die Mikroprozessoren sind nicht für eine Kommunikation auf I/O-Ebene geeignet. [OER19]

Dementsprechend existieren hierfür zwei Lösungswege. Zum einen können Aktoren und Sensoren mit mehr Intelligenz ausgestattet werden, so dass sie ihre mechatronischen Signale für den Mikroprozessor abstrahieren können und somit direkt am Zentralsteuergerät angeschlossen werden. Ihre Funktion bleibt allerdings dabei, gewisse Messwerte bereitzustellen oder physikalische Größen einzustellen. [OER19]

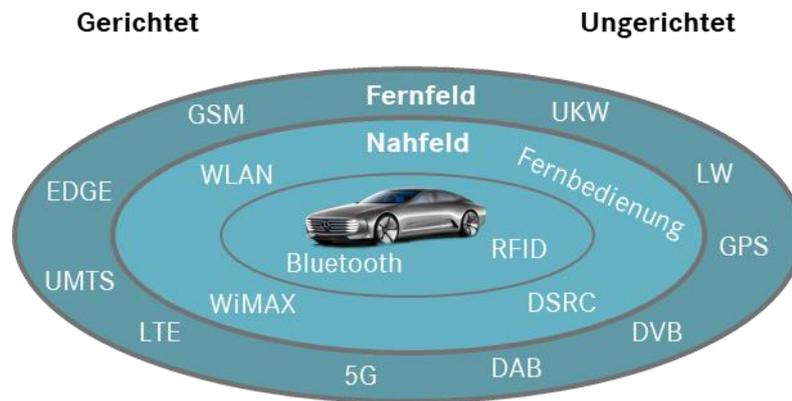
Zum anderen kann bei preiswerten Sensoren oder Aktoren auf eine Aufrüstung verzichtet werden, da diese mit erhöhten Kosten einhergeht. Stattdessen können die konventionellen Sensoren und Aktoren mit den Integrationsknoten verbunden werden. Diese in Abbildung 6 in blau dargestellten Steuergeräte dienen als Gateway zwischen der mechatronischen Schicht und der abstrahierten Schicht des Zentralsteuergeräts.

Somit kann auf beiden Wegen eine modulare und funktional erweiterbare E/E-Architektur entstehen. [OER19] Diese E/E-Architektur ist aber nicht nur auf das Fahrzeug beschränkt. Durch die zunehmende Vernetzung mit der Umgebung ist es ferner möglich, dass das Fahrzeug mit seiner Umwelt interagieren kann. Dies wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

## 2.2 Konnektivität

Mit dem Einzug einer umfassenden E/E-Architektur nimmt auch die Bedeutung der Vernetzung mit der Umgebung des Fahrzeugs in den letzten Jahren stark zu. In der Vergangenheit haben üblicherweise Infotainment Systeme von der Vernetzung zu mobilen Geräten sowie Infrastrukturen außerhalb des Fahrzeugs Gebrauch gemacht. Es kommen aber zunehmend Anwender aus den Fahrerassistenzsystemen und auch Mobilitätsdienstleister hinzu. [CAM17], [ROE14]

Um eine drahtlose Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Infrastruktur außerhalb des Fahrzeugs zu ermöglichen, sind bereits heute viele Vernetzungstechnologien im Fahrzeug etabliert. Zwar gibt es noch andere Übertragungsmedien wie Schall. Diese Übertragungsmedien werden allerdings auf Grund ihrer starken Beeinflussung durch die Umwelt nur ungern für eine Datenübertragung verwendet [WIN17]. Eine Gesamtübersicht in Abbildung 7 zeigt die bisher wichtigsten Vernetzungstechnologien in der Fahrzeugtechnik [PIS16]. Im Folgenden sind einige Vernetzungstechnologien exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 7:** Übersicht der verschiedenen Vernetzungstechnologien [KRA08], [PIS16]

In der Abbildung 7 ist zwischen Fernfeld und Nahfeld unterschieden. Im Nahfeld befinden sich Technologien, die bis zu einer Übertragungsdistanz von 50 Metern begrenzt sind. Im sehr nahen Fahrzeugbereich gehört Bluetooth zu den prominentesten Vertretern. Es wird größtenteils für einen Datenaustausch innerhalb des Fahrzeugs verwendet. Ein größeres Abdeckungsgebiet im Nahfeld weist WLAN auf. Darüber hinaus fängt das Fernfeld an. Eine übliche gerichtete Kommunikation im Fernfeld ist hierbei der Mobilfunk. [KRA08]

Bei einer gerichteten Kommunikation existiert eine bidirektionale Verbindung zwischen zwei oder mehreren Teilnehmern. Demgegenüber bedeutet eine ungerichtete Kommunikation eine unidirektionale Verbindung, wie beispielsweise eine Radio-Frequency Identification (RFID) Übertragung für das Freischalten von Fahrzeugen bei Mobilitätsdienstleistungen im Nahfeld. Ungerichtete Verbindungen im Fernfeld sind Radio- und Bildübertragungen sowie das Global Positioning System (GPS). Da dies für eine gezielte Datenübertragung nicht zielführend ist, wird diese Art der Kommunikation an dieser Stelle nur zur Vollständigkeit genannt. (vgl. Darstellung im Anhang) [KRA08]

Alle hier genannten unterschiedlichen Vernetzungstechnologien haben jedoch die Antenne gemein. Sie gilt als ein wichtiges Element zur drahtlosen Vernetzung des Fahrzeugs mit der Umgebung und dient als Verbindungsglied zwischen den elektromagnetischen Wellen im freien Raum und den leitungsgebundenen Signalen im Fahrzeug oder auf der Gegenseite.

### 2.2.1 Fahrzeugantenne

Insbesondere im Fahrzeug haben sich die Anwendungen der Antenne deutlich gesteigert. Vor wenigen Jahrzehnten beschränkte sich die Anwendung der Antennen im Fahrzeug auf das Empfangen von Radiosignalen. In heutigen Fahrzeugen befinden sich weitaus mehr Anwendungen für die Antennen. Sie reichen von Telefonsignalen über WLAN bis hin zu Bluetooth (vgl. Abbildung 7).

Das Grundprinzip einer Antenne ist der Aufbau eines elektrischen sowie eines magnetischen Feldes um einen stromdurchflossenen elektrischen Leiter. Die Ausbreitung

der dadurch hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen ist mit einem Energietransport verbunden.

Die entsprechende Strahlungsleistung  $\vec{S}$  kann mit dem komplexen Poynting-Vektor mit der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  und der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  beschrieben werden. [GUS19]

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H} \quad (1)$$

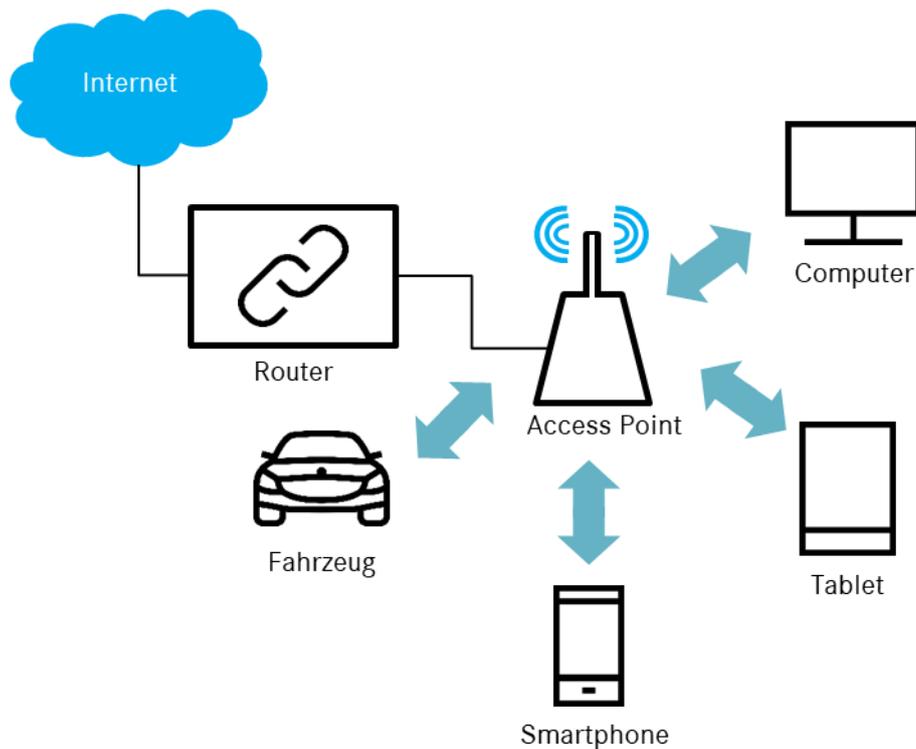
Die Aufgabe einer Antenne ist es, den Energiefluss ausgehend von der Strahlungsleistung einer Freiraumwelle in das elektromagnetische Feld einer Leitungswelle und umgekehrt zu ermöglichen. [BAE13]

Im Gegensatz zur idealisierten Stabantenne haben sich für die Datenübertragung im Fahrzeug kurze lineare Antennen in unterschiedlichen Ausprägungen etabliert. Abhängig vom Anwendungsfall werden die Antennen in einer kompakten Bauweise in den Steuergeräten oder aber auf gedruckten Strukturen in Dachelementen untergebracht. Es eignen sich aber auch externe Karosserieteile aus Kunststoff wie beispielsweise Außenspiegelgehäuse. Da jedoch dort das Fahrzeugdesign den Bauraum sehr stark vorgibt, ist auch die Gestaltung der Antenne eine große Herausforderung. Insbesondere durch neue Mobilfunkstandards der 4. und 5. Generation muss die Antenne ein breites Frequenzspektrum abdecken. [PIS16]

Bei der drahtlosen Vernetzung des Fahrzeugnetzwerks mit der zugehörigen Gegenseite ist es wichtig, die verbreiteten Vernetzungstechnologien LTE, WLAN sowie 5G zu unterstützen. Sie stellen eine Übertragung von Daten mit hoher Qualität und Bandbreite flächendeckend sicher und werden im Folgenden näher beschrieben. [TRA17], [SUN15], [KLJ16]

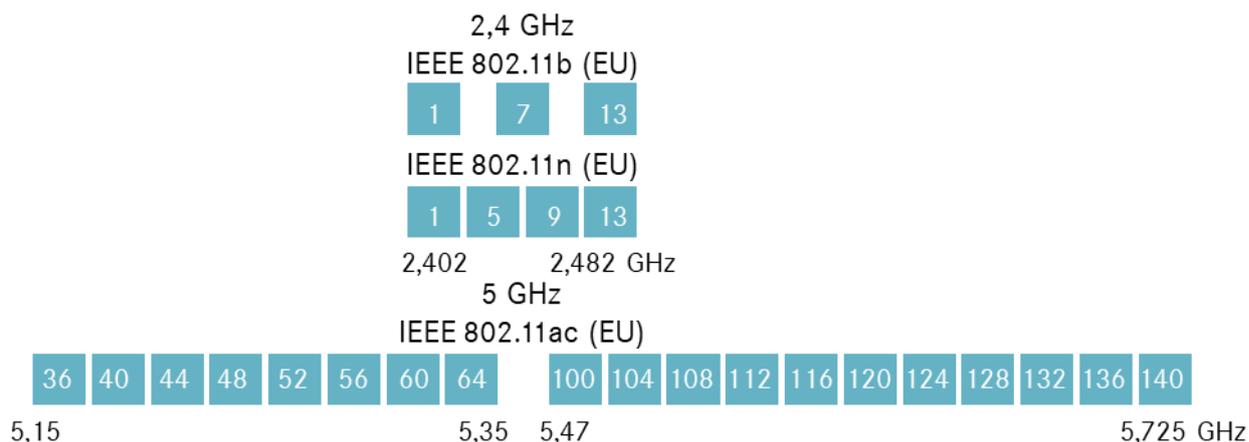
### 2.2.2 Wireless Local Area Network

Zunächst wird an dieser Stelle das Wireless Local Area Network (WLAN) beschrieben, welches zum gerichteten Nahfeld gehört. Üblicherweise ist es so aufgebaut, dass ein Access Point das WLAN bereitstellt. Wie in Abbildung 8 zu erkennen, ist der Access Point wiederum mit einem Router verbunden, der den Zugriff zum Internet ermöglicht. Im WLAN befinden sich einzelne Endgeräte, die somit drahtlos miteinander oder mit dem Internet kommunizieren können.



**Abbildung 8:** Funktionsweise eines WLAN [TEK13]

Auf der physikalischen Schicht befindet sich WLAN als ein lizenzfreier Standard nach 802.11b und 802.11g im ISM Band (Industrial, Scientific and Medical Band) bei 2,402 bis 2,482 GHz. Nach 802.11ac befindet sich WLAN zweigeteilt im UNII Band (Unlicensed National Information Infrastructure) bei 5,150 bis 5,350 GHz sowie 5,470 bis 5,725 GHz in Europa. Dabei ist die Reichweite von dem 5 GHz Band etwas geringer als im 2,4 GHz Band. Da auch andere Sender wie Mikrowellen sich im ISM-Band befinden, ist nach 802.11b/g die maximale Sendeleistung auf 100 mW für WLAN begrenzt. Zudem können bei 802.11b, wie in Abbildung 9 dargestellt, nur drei Kanäle lokal gleichzeitig betrieben werden, da bei einer Kanalbreite von mindestens 22 MHz noch ein Frequenzabstand von 5 MHz hinzukommt. [TEK13]



**Abbildung 9:** WLAN Frequenzen für das 2,4 GHz und 5 GHz Band [TEK13]

Der neuere Standard 802.11n erweitert das 2,4 GHz Band noch um einen weiteren Kanal unter Reduzierung der Kanalbreite auf 20 MHz. Somit wird das 2,4 GHz Band optimal ausgenutzt. Allerdings verwenden Access Points bei einem Parallelbetrieb mit Endgeräten des alten Standards die Kanäle 1, 7 und 13 in Europa. Beim 5 GHz Band nach 802.11ac ist die zur Verfügung stehende Bandbreite dagegen viel breiter. Dadurch können bereits 19 Kanäle überlappungsfrei betrieben werden.

Im Betrieb von WLAN werden in der Media Access Control Schicht die Endgeräte zunächst erkannt und identifiziert. Im Infrastruktur-Modus werden Endgeräte in einem Netzwerk von dem Access Point eingebunden und koordiniert. Zu den Aufgaben des Access Points gehören einerseits das kontinuierlichen Senden von Management-Paketen, den sogenannten Beacons, um die Teilnehmer über den Netzwerkstatus zu informieren. Andererseits leitet der Access Point auch Internet Protocol Pakete (IP) der Endgeräte über Ethernet oder Digital Subscriber Line (DSL) weiter. [GES09]

Bei flächendeckenden Netzwerken wird das WLAN in mehrere Zellen aufgeteilt. Die Endgeräte müssen beim Wechsel in ein anderes WLAN im gleichen Netzwerk einen Handover durchlaufen. Da allerdings das Endgerät diesen Wechsel steuert, kommt es insbesondere bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten des Endgeräts zu Verzögerungen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist der Wechsel seltener und damit kaum bemerkbar. Abhilfe sollen dennoch neue Protokolle wie das Light-Weight Access Point Protokoll schaffen, welches einen Wechsel aus dem Access Point steuert. [KRA08]

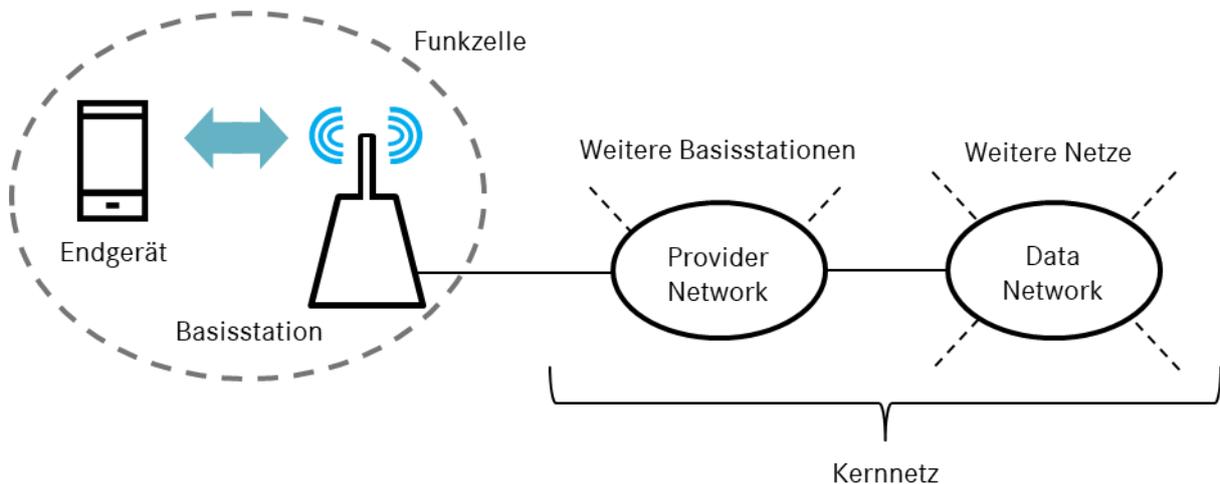
WLAN wurde in den letzten Jahren immer populärer als drahtloser Zugang zum Internet, da die Bandbreite enorm gestiegen ist und die Kosten für die WLAN-Antennen stetig sinken. Die Wi-Fi Alliance zertifiziert fortlaufend neue Standards, um der steigenden Nachfrage der Nutzer nach Bandbreite nachzukommen. So ist ebenfalls die Einführung von IEEE 802.11ax als Wi-Fi 6 geplant. Dieser neue Standard ermöglicht prinzipiell höhere Datenraten durch bessere Modulationsverfahren. Ebenso stellt der Standard eine bedarfsgerechte Nutzung der Kanäle über die sogenannten Resource

Units bereit. Dazu muss allerdings Wifi 6 bei allen Endgeräten eines Access Points umgesetzt sein. [KOM20]

Dennoch ist WLAN immer noch mit seiner Flächenabdeckung lokal begrenzt und mit Infrastrukturkosten verbunden, allerdings werden im Gegensatz zu dem Mobilfunkstandard keine Verbindungs- und Datenkosten fällig. Demgegenüber werden diese Kosten immer geringer, sodass auch der Mobilfunk als zukünftige Strategie für einen sicheren Datenaustausch in Gebäuden und in der Produktion betrachtet werden kann.

### 2.2.3 Mobilfunk

Anders als WLAN deckt der Mobilfunk das Fernfeld ab. Für den Transport von Informationen ist dazu ein großflächiges Gebiet mit aneinandergrenzenden Funkzellen ausgestattet. Jede Funkzelle verfügt über eine Trägerfrequenz, auf der mehrere Funkzugänge für Endgeräte ermöglicht werden. Die Funkzugänge laufen von den Funkzellen dann in einer Basisstation zusammen. Kontrollstationen organisieren die Send- und Empfangsressourcen der Basisstationen.



**Abbildung 10:** Funktionsweise eines Mobilfunks, vgl. [SIE14]

Die Basisstationen sind über das Kernnetz verbunden, so dass sie darüber auch Zugang zu weiteren Mobilfunknetzen sowie dem Internet haben. Durch die stetige Weiterentwicklung des Mobilfunks werden neue Generationen fortlaufend aufgebaut, während die alten Generationen weiterbetrieben werden.

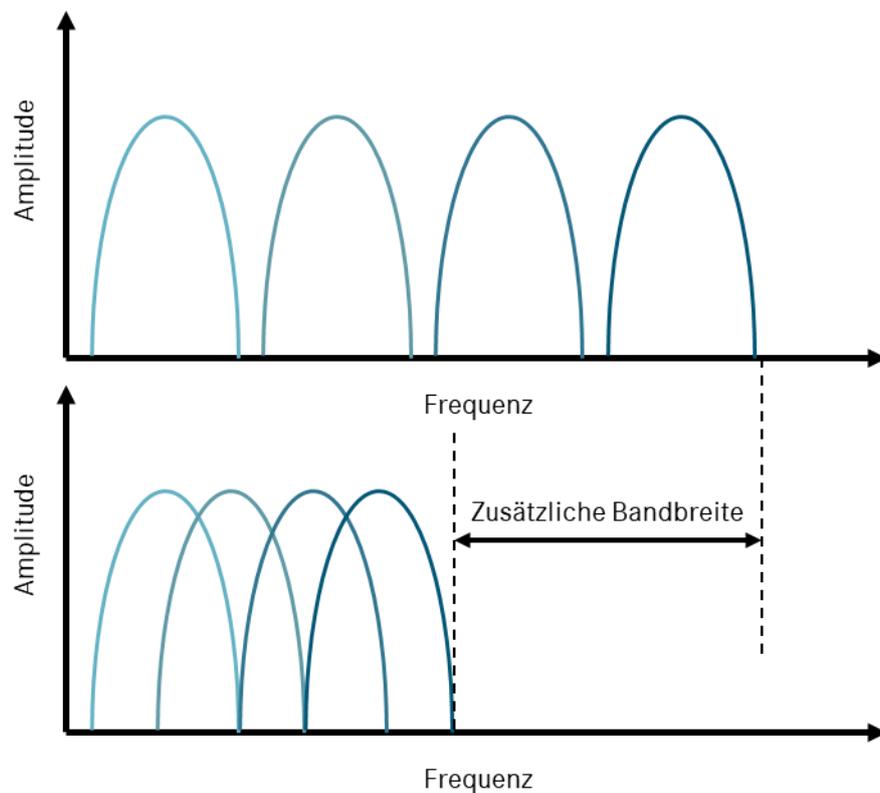
Seit Beginn des Mobilfunks in den 1980er steht eine Erhöhung der übertragbaren Nutzinformationen, also des eigentlichen Datenverkehrs, die Anwender über Sprache und Daten übermitteln, durchweg im Entwicklungsfokus. Mit Einführung der 2. Generation erfolgte neben der Übertragung der Nutzinformation auch die Übertragung von Steuerungsinformationen des Netzwerkes. Somit kann die Funkzelle über die Steuerung die benötigte Kapazität zur Übertragung der Daten je nach Bedarf dem Endgerät zur Verfügung stellen. Da diese bedarfsgerechte Aufteilung im Hinblick auf die Nach-

frage nach immer mehr Bandbreite wichtiger wird, wird in der 3. Generation auf neuartige Modulationsverfahren zurückgegriffen, die die Endgeräte mit einer noch höheren Bandbreite versorgen sollen. [QUA18]

## LTE

Die 4. Generation löste die 3. Generation im Jahr 2009 in Deutschland ab. Auch Long Term Evolution (LTE) genannt, verspricht sie eine höhere Datenrate bei einer geringeren Latenz. Dies geschieht durch die Weiterentwicklung der Modulationsverfahren und durch eine verbesserte Synchronisierung der Antennen. [SAU18a]

Mit dem Einsatz eines neuen Modulationsverfahrens namens Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) kann das Frequenzspektrum für den Nutzdatenverkehr besser ausgenutzt werden, da die Funkzugänge auf der Trägerfrequenz näher zusammenrücken. Wie in Abbildung 11 zu sehen, ermöglicht der dadurch geschaffene Platz zusätzliche Bandbreite zur Übertragung. [QUA18]



**Abbildung 11:** Vorteil des Orthogonal Frequency Division Multiplex Verfahrens [SAU15]

Allerdings ist das Funksignal dadurch viel empfindlicher gegenüber Störungen aus der Umgebung. Daher ist die Kontrolle des Signals über eine verbesserte Antennensynchronisation die zentrale Herausforderung. Dies wird über den MIMO (Multiple Input and Multiple Output) Standard koordiniert. Das bedeutet, dass ein Kanal mehrere Eingänge und Ausgänge besitzen kann. Somit werden die Datenrate, Zellabdeckung und die Frequenzkapazität erhöht. Die Antennenmodule besitzen  $N \times M$  Signalwege von

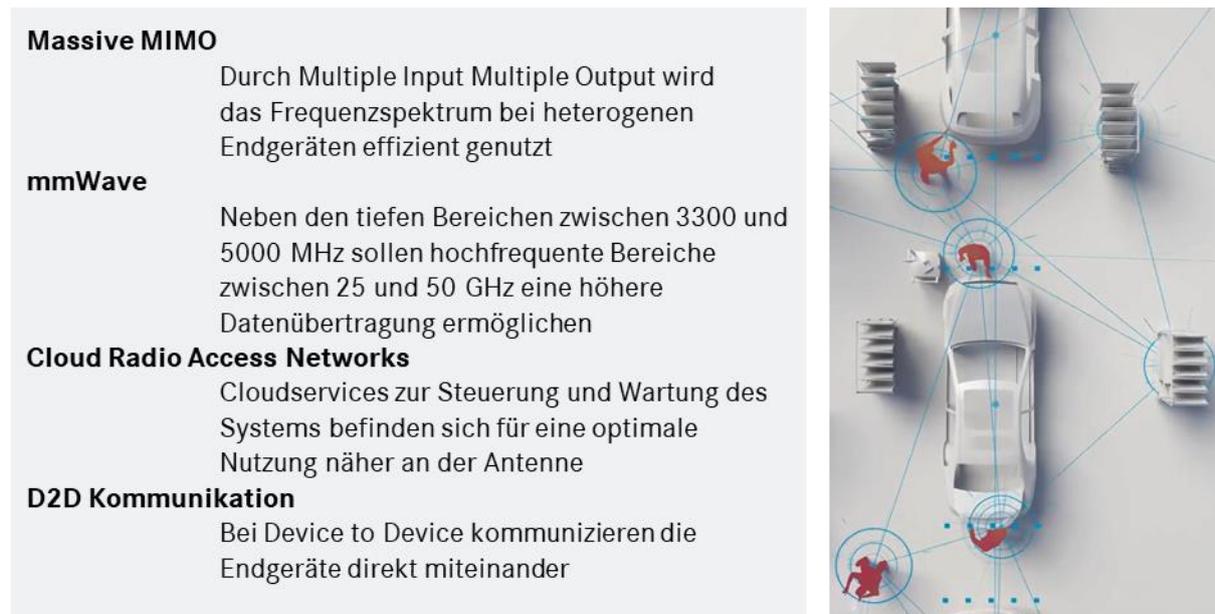
den Senderantennen zu den Empfängerantennen. Die Signale sind dabei durch verschiedene Phasen, Amplituden oder Wellenformen zu unterscheiden. Durch das Zusammenlegen der Sende- und Empfängerantenne kann somit ein besserer Rückschluss auf die Signalqualität geführt werden. Dieses Verfahren wird im Rahmen der nächsten Generation noch weiter ausgebaut. [WER17a]

## **5G**

Mit dem Trend des Einzugs einer wachsenden Intelligenz in Alltagsgeräten, wie Mobiltelefonen, Waschmaschinen, Kühlschränken etc., werden auch die Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur anspruchsvoller. Die fünfte Generation des Mobilfunks soll diesen Anforderungen gerecht werden. Dabei sollen der übermittelte Datendurchsatz, die Datengröße und die Verfügbarkeit für eine wachsende Anzahl an Anwender stark steigen. Mit der Anzahl der Anwender soll sich auch das Nutzungsverhalten zunehmend ändern. [ARY18]

Die 5G Technologie soll zudem Anwendung in intelligenten Verkehrs-, Transport- und Kommunikationssystemen finden. Dazu soll sie eine Lösung zu dem Trend der größeren und dichteren Datenmengen im Mobilfunknetz und des Anstiegs der teils kostengünstigen Mobilfunkgeräten bei höherer Umweltfreundlichkeit bereitstellen. Auf der anderen Seite soll es auch sicherheitskritische Anwendungen bedienen können und damit mit Echtzeitfähigkeit zurechtkommen. In einer dritten Anforderung werden virtuelle und Cloudbasierte Anwendungen immer beliebter, die auch die 5. Generation zunehmend unterstützen soll. [ARY18]

Um 5G zu ermöglichen, bedarf es viele fortschrittliche Technologien, die erst durch die aktuelle Forschung und Entwicklung ergründet werden konnten. Auf diese Technologien soll im Folgenden näher eingegangen werden. Ein Überblick über diese Technologien ist zunächst in Abbildung 12 zu sehen.

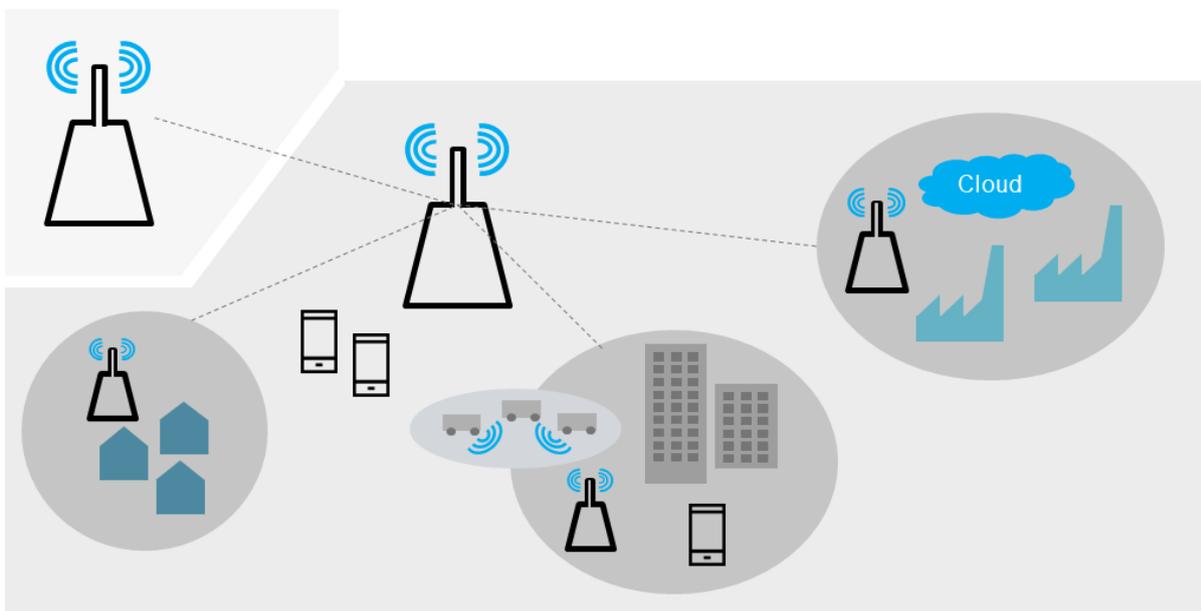


**Abbildung 12:** 5G zeichnet sich durch diese Technologien aus [ARY18], [DAI18]

Im Rahmen von Massive MIMO wird der Multiple-Input Multiple-Output nochmals erweitert. Somit soll eine noch bessere Koordination der Antennen zu einer effizienteren Nutzung des Frequenzspektrums führen. Darüber hinaus wird dieser Standard ebenfalls bei der mmWave verwendet, denn heutige Mobilfrequenzen befinden sich im  $\mu$ -Wellenlängenspektrum und teilen sich nur ein schmales Band zwischen 700 MHz und 2700 MHz (vgl. Übersicht im Anhang). Mit der 5. Generation können Millimeterwellen dagegen ein Frequenzband von 25 bis 50 GHz bereitstellen. Diese Wellen haben einerseits einen viel höheren Datendurchsatz, andererseits stellen sie jedoch den Betreiber vor ganz neuen Herausforderungen. Durch die kürzere Wellenlänge sind mmWaves auch anfälliger für Umgebungseinflüsse. Massive MIMO stellt da Abhilfe bereit, indem es durch neue Strategien wie Beamforming die Welle aktiv so verändern kann, dass die Interferenzen auf kurzer Distanz gering ausfallen. Daher haben die Millimeterwellen in Verbindung mit Massive MIMO ein hohes Potenzial ein breites Frequenzspektrum mit einer sehr hohen Effizienz und damit einem hohen Datendurchsatz für das zukünftige 5G Netz zu erzielen. [ARY18]

Darüber hinaus stellt die Device To Device Kommunikation (D2D) eine Schlüsseltechnologie für ein erfolgreiches Betreiben eines 5G Netzes dar. Dazu können mobile Endgeräte in einem kleinen Netzwerk direkt miteinander kommunizieren, ohne mit dem Hauptnetzwerk im lizenzierten Mobilfunk zu interagieren. Dies soll nicht nur eine hohe Flexibilität ermöglichen, sondern weiterhin zu einem geringen Energieverbrauch und einer effizienten Nutzung des Frequenzbandes beitragen. Bis zur Umsetzung müssen allerdings die Herausforderungen zur Vermeidung von Interferenzen und das Verhalten bei zeitkritischen Anwendungen geklärt werden. [ARY18]

Sind diese Herausforderungen überwunden, kann das 5G Netzwerk vollumfänglich in einem Ultradense Heterogeneous Network operieren, denn die Stärke von der 5. Generation liegt in seiner Vielseitigkeit, wie man in der Abbildung 13 erkennen kann.



**Abbildung 13:** Aufbau eines 5G Netzwerks [GRU19]

So kann es in viele kleine Zellen (Femtozelle, Piko- zelle, Mikro- zelle), in D2D Kommunikation und in Makrozellen aufgeteilt werden (vgl. Abbildung 13). Die leistungsstarken Makrozellen bedienen dabei großflächige Gebiete. Die kleinen leistungsschwächeren Zellen sollen kleine Gebiete dicht abdecken und einen hohen Datenverkehr wie an Flughäfen, Einkaufszentren und Bahnhöfen ermöglichen. Ebenfalls können sie industriell genutzte Gebiete wie Produktionen abdecken, denn Mikro- und Piko- zellen weisen eine Reichweite von wenigen hundert Metern auf. Femto- zellen beschränken sich lediglich auf den Innenraumgebrauch. Unterstützt wird diese Skalierung durch Cloud- services, die die Koordination und Wartung des Netzwerkes in unmittelbarer Nähe der Antenne durchführen können. Durch die unterschiedlichen Zellgrößen kann auf dieser Weise ein Gebiet optimal auf seinen Datenverkehr angepasst werden, so dass das 5G Netz bei einer optimalen und effizienten Netzauslastung betrieben werden kann. [ARY18]

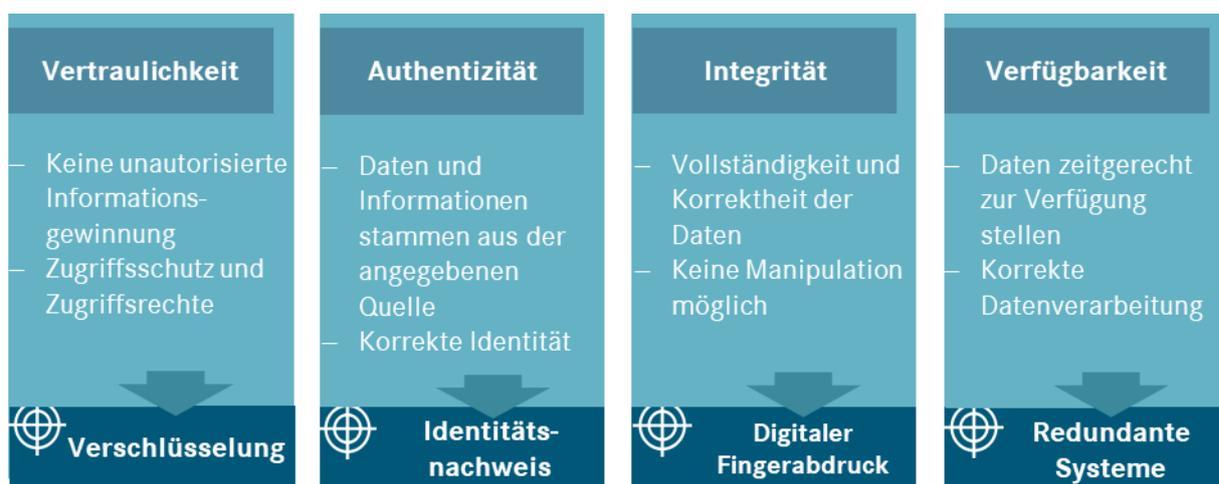
Zusammengefasst wird die 5. Generation des Mobilfunknetzes eine höhere Dichte von mobilen Endgeräten abdecken können und somit eine effiziente Ausnutzung des Frequenzspektrums ermöglichen. Damit sollen zukünftig die öffentliche Mobilkommunikation und die drahtlose Vernetzung über WLAN weiter zusammenwachsen.

## 2.2.4 Sicherheit

Mittels der Fahrzeugkonnektivität und der damit einhergehenden Vernetzung des Fahrzeugs mit dem Internet entstehen ganz neue Möglichkeiten mit anderen Teilnehmern Daten auszutauschen. Jedoch birgt der Datenaustausch mit Fremden auch die Gefahr des Missbrauchs. Insbesondere das Fahrzeug mit seiner sicherheitskritischen Fahrfunktion stellt ein hohes Risiko dar.

Dementsprechend ist die IT-Sicherheit besonders bei der Konnektivität umso wichtiger. Nach dem Gesetz des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik werden vorwiegend die Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit von Informationen als Schutzziele für die Sicherheit von IT-Systemen genannt. Darüber hinaus hat sich auch die Authentizität als weiteres Ziel etabliert. [BED10]

In Abbildung 14 sind die Schutzziele der IT-Sicherheit gezeigt. Zu jedem Ziel lässt sich auch eine wesentliche Maßnahme definieren. Im Folgenden soll nun stärker auf die Ziele und ihre Maßnahmen im Zusammenhang mit der Fahrzeugkonnektivität weiter eingegangen werden.



**Abbildung 14:** Erweiterte Schutzziele sowie geläufige Maßnahmen der IT-Sicherheit [BSI09]

Zunächst wird auf die Vertraulichkeit stärker eingegangen. Bei der Vertraulichkeit wird sichergestellt, dass keine unautorisierte Stelle Zugriff sowohl auf die Daten als auch auf die Kommunikation erhält. Dies wird einerseits durch eine Festlegung sowie einer Kontrolle zulässiger Informationsflüsse zwischen den Teilnehmern des Systems erreicht. Andererseits erreicht man ebenfalls einen Zugriffsschutz durch eine Verschlüsselung der Daten. [BED10]

Die Verschlüsselung bezeichnet Verfahren und Algorithmen, die Daten mit Hilfe von digitalen Schlüsseln geeignet transformieren, sodass unautorisierte Teilnehmer ohne den korrekten Schlüssel nicht in der Lage sind, die Daten sinnvoll zu interpretieren. Dabei kann im Wesentlichen zwischen der symmetrischen und der asymmetrischen Verschlüsselung unterschieden werden. Bei der symmetrischen Verschlüsselung wird ein Klartext mittels eines Schlüssels über einen mathematischen Zusammenhang in einen

nichtlesbaren Text verwandelt. Da beim symmetrischen Verfahren bei der Entschlüsselung der gleiche Schlüssel verwendet wird, unterscheidet es sich von der asymmetrischen Verschlüsselung. Bei diesem Verfahren wird ein Schlüsselpaar verwendet, das mathematisch sehr stark zusammenhängend ist. Der öffentliche Schlüssel dient zur Verschlüsselung des Klartexts. Demgegenüber darf die Entschlüsselung nur mit dem privaten Schlüssel erfolgen und muss folglich vom Besitzer des Schlüsselpaares geheim gehalten werden. [WEN18]

Da durch die Konnektivität das Fahrzeug mit Anwendungen im Internet kommuniziert, ist eine verschlüsselte Kommunikation auf jeden Fall notwendig. Darüber hinaus ist es auch wichtig, dass das Fahrzeug seine Kommunikationsteilnehmer kennt und ihr Zugriffsrecht einstufen kann. Doch dafür muss es auch wissen, ob der Teilnehmer auch wirklich der ist, den er vorzugeben scheint. Somit kommt der Authentizität ebenfalls einer wichtigen Bedeutung zu, denn zusätzlich zu dem Zugriffsschutz muss sichergestellt werden, dass die Identität eines Benutzers oder eines angeschlossenen Systems korrekt ist.

Im WLAN wurde in der Vergangenheit das Authentifizierungsverfahren Wired Equivalent Privacy (WEP) verwendet. Das Pre-Shared-Key (PSK) Verfahren basiert auf einem Schlüsselaustausch zwischen Endgerät und Access Point, damit die Identität des Endgeräts nachgewiesen werden kann. Der Schlüssel ist zuvor frei wählbar und muss vor der Kommunikation dem Endgerät bekannt sein. Da das WEP Verfahren dort sicherheitstechnische Schwächen aufweist, wird es nun von dem weitaus sicheren und neueren Wi-Fi Protected Access (WPA) Verfahren sowie WPA2 abgelöst. Darüber hinaus bieten die neuen Verfahren auch zertifikatbasierte Authentifizierungsmechanismen an. [MIT05]

Bei der Authentifizierung mit Zertifikaten wird ein individueller Schlüssel verwendet. Dazu muss sich das Endgerät zunächst über das Zertifikat authentifizieren und bei einer erfolgreichen Authentifizierung wird der Schlüssel berechnet. Zwar ist der Einsatz von Zertifikaten mit einem höheren Verwaltungsaufwand verbunden, da eine zusätzliche Infrastruktur für die Ausstellung und Verteilung von Zertifikaten benötigt wird. Aber es hat auch den Vorteil, dass bei Bekanntgabe des individuellen Schlüssels nicht alle Schlüssel im Netzwerk ausgetauscht werden müssen. [WEN18]

Dieser zentrale Ansatz für die Authentifizierung ist im Mobilfunk bereits stärker ausgeprägt. So erhält jedes Endgerät eine eindeutige International Mobile Equipment Identity (IMEI), welche in der nahezu fälschungssicheren Subscriber Identity Module (SIM) Karte in dem Endgerät hinterlegt ist. Bei Einwahl des Endgeräts in das Mobilfunknetz, prüft das zentrale Kernnetz, ob das Endgerät die korrekte Identität vorweist. Somit liegt die Administration der Identitäten stets im Kernnetz. [SAU18b]

Ein weiteres Schutzziel ist die Integrität. Sie bedeutet sowohl die Korrektheit der Daten als auch die korrekte Funktionsweise des Systems. Die Korrektheit ist dadurch gegeben, wenn die Daten den bezeichneten Sachverhalt unverfälscht wiedergeben. Im Rahmen der Daten- und Systemintegrität sollen Daten im Laufe der Verarbeitung oder

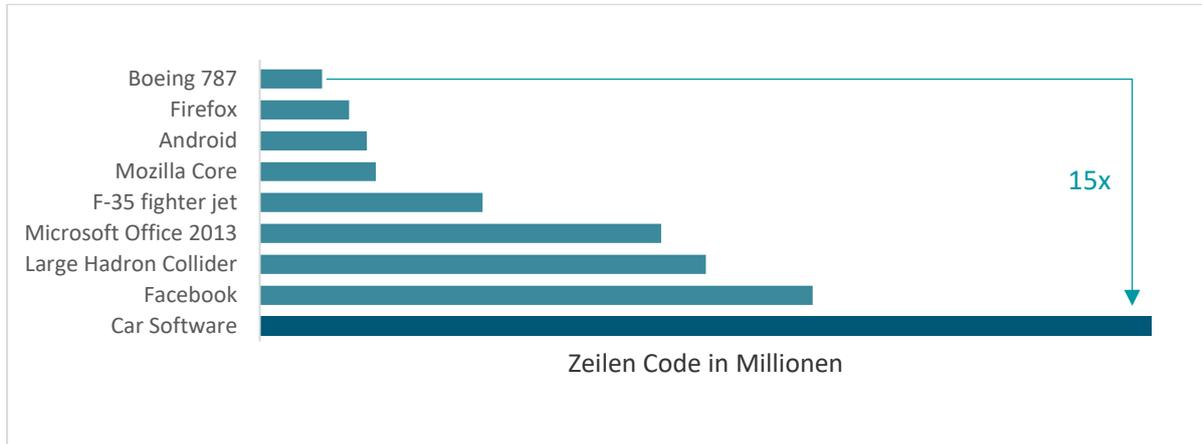
Übertragung nicht beschädigt oder durch Nichtberechtigte unbefugt verändert werden können. Dies betrifft ebenfalls die Manipulation von Metadaten wie Erstellungsdatum und Zugriffsrechte. Um durchgeführte Datenveränderungen zu erkennen, bedient man sich an einer Art digitalen Fingerabdruck. Im einfachen Fall wird bei der Versendung der Verschlüsselungsinformation die Prüfsumme der Datenpakete angehängt. Da dieser Mechanismus beim WEP Authentifizierungsverfahren bei WLAN große Sicherheitslücken aufweist, werden für die Datenintegrität vorzugweise sogenannte kryptographischen Hashfunktionen wie beim neueren WPA Standard verwendet. [BED10], [REI12]

Neben der Korrektheit der Daten ist auch die Vollständigkeit der Daten sowie des Systems sicherzustellen, so dass das System die Daten zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung stellen kann. Die Verfügbarkeit bedeutet zudem, dass die Datenverarbeitung im System inhaltlich korrekt verläuft. Um eine Erhöhung der Verfügbarkeit zu erzielen, ist der Einsatz redundanter Systeme die richtige Wahl. Im Rahmen der Konnektivität können hier die Anzahl der Access Points im WLAN oder die Anzahl der Basisstation im Mobilfunk erhöht werden. [WEN18]

Die zuvor vorgestellten Schutzziele der Sicherheit sind wichtige Faktoren, die eine einwandfreie Funktion des Systems sicherstellen sollen. Nur so kann die Fahrzeugvernetzung sicher eingesetzt werden und neue Funktionen einen hohen Kundennutzen bringen. Neben der Konnektivität zeigen auch neue Softwareansätze neue Potenziale im Fahrzeug. Sie werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

## 2.3 Software

Analog zur Vernetzung gibt es auch in der Software-Entwicklung für Fahrzeuge große Herausforderungen. Schon heute besitzt ein Fahrzeug eines Premium-Herstellers bis zu 100 Millionen Zeilen Software-Code. Das sind 15-mal mehr Zeilen als bei einem modernen Passagierflugzeug wie die Boeing 787. [VIS19]



**Abbildung 15:** Komplexität der Fahrzeugsoftware in der Premium Klasse [VIS19]

Um diese immense Komplexität in der Software-Entwicklung auch zukünftig bei einer zunehmenden Funktionserweiterung im Fahrzeug beherrschen zu können, bedarf es ein Umdenken.

Dies wird einerseits durch die immer stärkere Trennung von Software und Hardware begünstigt. Dadurch können Softwarebausteine unabhängig von den Steuergeräten wiederverwendet werden. Schon heute ermöglicht AUTOSAR, als eine Initiative der Autohersteller, die Entkopplung von dem Steuergerät mit seinem Betriebssystem und der eigentlichen Anwendung. Bisher konnten die Fahrzeughersteller ein Steuergerät nur zusammen mit dem Betriebssystem und der Anwendung von einem Lieferanten beziehen. Allerdings können sich niedrige Einkaufspreise nur erzielen, wenn Hardware und Software von unterschiedlichen Lieferanten eingekauft werden können. Der Fahrzeughersteller übernimmt dann die Integration und kann ferner noch eigene, besondere Funktionen hinzufügen. Das Wissen dazu bleibt in seinem Haus. In der Computerbranche ist die Trennung von Hardware, Betriebssystem und Anwendung bereits flächendeckend etabliert. Für jeder dieser Komponenten gibt es spezialisierte Lieferanten, sodass der Anwender sein System frei zusammenstellen kann. [AUT20], [BOR14]

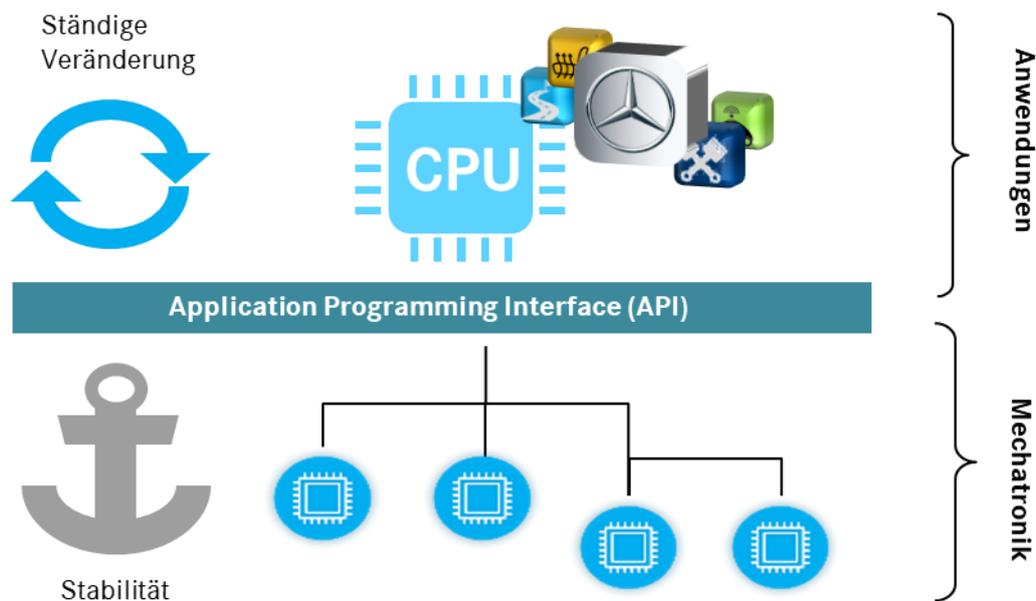
Andererseits wird das Umdenken auch durch die steigende Leistungsfähigkeit von den Steuergeräten unterstützt, da sich die Software-Entwicklung weniger an der begrenzten Rechenressource des Fahrzeugs anpassen muss, sondern sich voll und ganz auf die Funktionalität des Fahrzeugs konzentrieren kann. Dies wird zunehmend noch dadurch verstärkt, dass das Fahrzeug Zugang zu seiner Umgebung über das Internet

hat. Dadurch können bestimmte ressourcenintensive Rechenoperationen an leistungsstarke Cloud-Server ausgelagert werden.

Um dieses neue Umdenken umzusetzen, setzt die Fahrzeugentwicklung zukünftig vermehrt auf die Einführung von Service-orientierten Architekturen. [OER19] Dieser für den Automotive Bereich neuer Entwicklungsansatz wird im nächsten Absatz geschildert.

### 2.3.1 Service-orientierte Architekturen

Service-orientierte Architekturen (SOA) bieten abstrahierte Dienste (Services) für bestimmte Aufgaben im Fahrzeug über eine standardisierte Schnittstelle dem gesamten Fahrzeugsystem an. So erleichtert die Entkopplung einzelner Komponenten das Erproben von neuen Softwarefunktionalitäten, indem sich die Komplexität signifikant verringert. Ebenso können Softwarebausteine zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen und Generationen leichter wiederverwendet werden. [TRA17], [OER19], [SCH17]



**Abbildung 16:** Prinzipieller Aufbau einer Service-Orientierten Architektur [KEL20]

Somit ermöglicht dieser modulare und funktional erweiterbare Ansatz ganz neue Freiheitsgrade. Durch einen SOA Ansatz können die Anwendungen auch nach Markteinführung des Fahrzeugs ausgerollt werden. Durch die Abkapselung der Services kann dann die stabile Ebene der Mechatronik unabhängig von der sich kontinuierlich ändernde Ebene der Anwendungen bis zur Markteinführung betriebssicher entwickelt werden. Die für das Kundenerlebnis wichtigen Anwendungen werden dann einfach über eine Software-Aktualisierung verteilt. Insbesondere durch die Vernetzung des Fahrzeugs nach außen über eine drahtlose Verbindung zu einem Backend ist dies nun komfortabel möglich. [GRU20]

### 2.3.2 Drahtlose Software-Aktualisierung

Wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt, nimmt der Softwareumfang in modernen und intelligenten Fahrzeugen stark zu. Die Fahrzeugsoftware wird ständig weiterentwickelt, um Fehler zu beseitigen und die Funktionalität zu erweitern. Um diese sogenannten Software-Updates in das Fahrzeug zu bringen, wurden bisher kabelgebundene Lösungen im Automobilbereich verwendet.

Mit dem Einzug von drahtlosen Schnittstellen wie WLAN oder Mobilfunk entstehen nun neue Möglichkeiten Software-Updates Over The Air (OTA) durchzuführen.

Anhand des Ausrollprozesses soll nun diese neuartige Technologie der drahtlosen Software-Aktualisierung aufgezeigt werden. [STO14]

#### Erstellung des Software-Updates

Vor der Versorgung des Fahrzeugs mit dem Software-Update, muss eine komprimierte Form der Software-Aktualisierung erstellt werden. Dies wird im Backend durchgeführt. Um das gesamte Software-Update für die Übertragung so klein wie möglich zu halten, wird in einem Delta Generator nur der Software-Teil, der in der neuen Software dazugekommen ist („Delta“), bereitgestellt. [KHU16]

#### Auslieferung des Software-Updates

Nach der Erstellung des Delta Updates wird das Software-Update in einer Distributionsplattform des Fahrzeugherstellers bereitgestellt. Dort werden die unterschiedlichen Versionen des Software-Updates verwaltet. Doch bevor das Software-Update von dort an die Fahrzeuge verteilt wird, muss der Aktualisierungsvorgang von dem zuständigen Bereich für die Softwarevalidierung an einem Fahrzeug erprobt werden. Der Bereich gibt dann das Software-Update entweder für alle Fahrzeuge oder nur für bestimmte Märkte frei. Die Fahrzeuge, die im Rahmen der Freigabe von der Software-Aktualisierung betroffen sind, werden ebenfalls in der Distributionsplattform hinterlegt. Wenn sich nun diese Fahrzeuge über Mobilfunk oder WLAN mit der Plattform verbinden, überträgt die Plattform das Software-Update über ein Zentralsteuergerät in den Zwischenspeicher des Zielsteuergeräts im Fahrzeug. [STO14], [KLE12]

Insbesondere bei der Übertragung des Software-Updates gibt es viele Forschungsarbeiten, die sich mit einem sicheren Datenaustausch auseinandersetzen. Dazu werden Sicherheitsprotokolle vorgestellt, die Echtheit, Aktualität sowie Vertraulichkeit der Daten sicherstellen. Somit soll gewährleistet werden, dass kein Dritter Zugang zu den Daten und dem Fahrzeug hat. [NIL08], [IDR11], [KHU16]

Bei erfolgreicher Übertragung des Software-Updates in das Fahrzeug kann im nächsten Schritt die eigentliche Software-Aktualisierung beginnen.

## Durchführung der Software-Aktualisierung

Als letztes wird das Software-Update für die Software-Aktualisierung im Fahrzeug installiert. Zunächst überprüft das Zielsteuergerät, ob das Software-Update vollständig übertragen wurde und ob die Vorbedingungen für die Software-Aktualisierung gegeben sind, da für eine Aktualisierung das Steuergerät für eine gewisse Zeit nicht ansprechbar ist. Daher muss sichergestellt werden, dass das Steuergerät nicht während der Fahrt aktualisiert wird, um die Funktionsweise des Fahrzeugs nicht zu beeinträchtigen. Erst wenn alle Vorbedingungen erfüllt sind, beginnt das Steuergerät sich zu aktualisieren. [STO14]

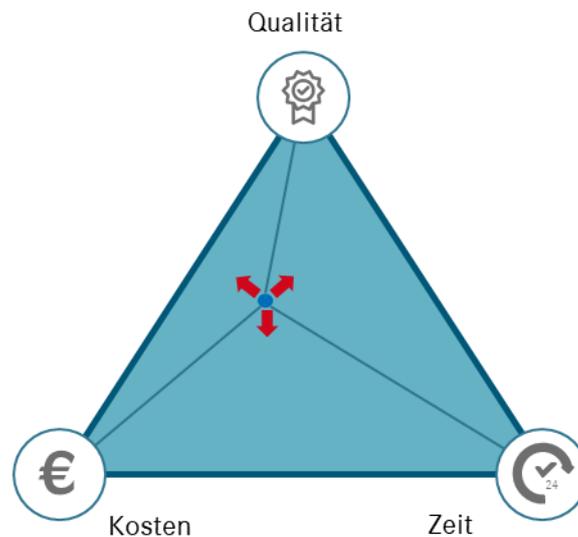
Eine Software-Aktualisierung aus einer zentralen Distributionsplattform hat mehrere Vorteile. Einerseits muss die Software nicht zuerst an einzelne Fahrzeugwerkstätten verteilt werden, die dann mit viel manueller Arbeit die Software kabelgebunden in das Fahrzeug bringen. Die Produkteinführungszeit der neuen Software-Versionen verkürzt sich damit signifikant. Andererseits ist der Kunde nicht jedes Mal aufgefordert bei einer Software-Aktualisierung die Werkstatt aufzusuchen. Somit ist dies eine Erleichterung für den Kunden und mit dem kontinuierlichen Ausrollen von neuen Funktionalitäten steigt sogar noch das Kundenerlebnis. [STO14]

Für Werkstätten und für den Kundennutzen bringt die drahtlose Software-Aktualisierung viele Vorteile. In dem vorgestellten Konzept von [STE18] wird der Nutzen ebenfalls während der Fahrzeugentwicklung und in der Fahrzeugproduktion gesehen. Insbesondere die auf Effizienz ausgerichtete Produktion würde von dem Wegfall des kabelgebundenen Prozesses profitieren. Ebenso kann eine zentrale Verteilung auch ein viel schnelleres Ausrollen von Softwareänderungen ermöglichen. Neben der Software-Aktualisierung gibt es darüber hinaus auch noch weitere Prozesse, die im Rahmen der Inbetriebnahme der Fahrzeugelektronik in der Produktion durchgeführt werden. Auf die Inbetriebnahme soll daher als nächstes eingegangen werden.

## 2.4 Inbetriebnahme

Auch die Fahrzeugproduktion ist mit einem immer intelligenteren und vernetzteren Produkt konfrontiert. Neben neuen Anforderungen beim Verbau der E/E-Architektur muss der Fahrzeughersteller auch die immer komplexer werdenden Softwarekomponenten im Fahrzeug korrekt installieren. Dies geschieht im Rahmen der Inbetriebnahme des Fahrzeugs.

Um dies bei einer hohen Fahrzeugstückzahl unter bestmöglicher Qualität und effizient zu bewerkstelligen, müssen Zeit, Kosten und Qualität, wie in Abbildung 17 dargestellt, laufend im Auge behalten werden. Nur so können neuartige Technologien sich wettbewerbstauglich auf dem Markt durchsetzen.



**Abbildung 17:** Gegenläufige Zielstellungen in der Fahrzeugproduktion

Um höchsten Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, werden umfangreiche Prüfungen im Rahmen der Inbetriebnahme durchgeführt. Durch eine anschließende Nacharbeit sollen identifizierte Mängel beseitigt werden. Allerdings ist eine Nacharbeit auch mit erhöhten Kosten verbunden, sodass der Fahrzeughersteller stets darauf achtet, die Produktionsprozesse ganzheitlich abzusichern. Gleiches gilt auch für die Zulieferer der Komponenten, die durchgehend Qualitätskontrollen in ihrer Prozesskette durchführen, denn eine frühzeitige Fehleridentifikation erspart umso mehr Nacharbeit. Beispielsweise sollte der Lieferant schon vorzeitig Defekte in Steuergeräten im Cockpit identifizieren. Ein Austausch dieser Steuergeräte verbunden mit einer Demontage des Cockpits ist mit viel Aufwand verbunden. [SCH18]

Jedoch lassen sich durch abgesicherte Prozesse nicht alle Prüfungen und Inbetriebnahmen von Komponenten gänzlich reduzieren. Bei einigen Systemen, wie bei emissionsrelevanten Komponenten, müssen gesetzliche Anforderungen im Rahmen der Werkschlussabnahme sichergestellt werden. [BOR14]

Dementsprechend ist eine effiziente Gestaltung der Inbetriebnahme der beste Kompromiss, um auch zukünftig Fahrzeuge mit modernen E/E-Systeme und Software unter hoher Qualität kostengünstig herstellen zu können.

#### **2.4.1 Entwicklung der Inbetriebnahme**

Die Entwicklung der Inbetriebnahme ist stark mit der Werkstattdiagnose der Fahrzeugelektronik verbunden, denn die Diagnose lässt sich zwischen der gesetzlich geforderten abgasrelevanten Diagnose und der erweiterten Diagnose unterscheiden. Dabei beschäftigt sich die abgasrelevante Diagnose mit der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte. Bei der erweiterten Diagnose versteht man die Untersuchung des Produkts zur Fehleranalyse sowie auch die Inbetriebnahme seitens des Herstellers. [ISO15031]

Von daher muss von Beginn der Entwicklung eines Fahrzeugs bis mehrere Jahre nach Produktionsende die Diagnose entwickelt und gepflegt werden. Dementsprechend ist auch die Entwicklung der Inbetriebnahme nicht einfach nach der Freigabe der Fahrzeugentwicklung beendet. Somit ist ein großer Kreis Beteiligter eingeschlossen, deren enge Zusammenarbeit eine hohe Anforderung an Aktualität und Qualität bei hohem Zeit- und Kostendruck voraussetzen.

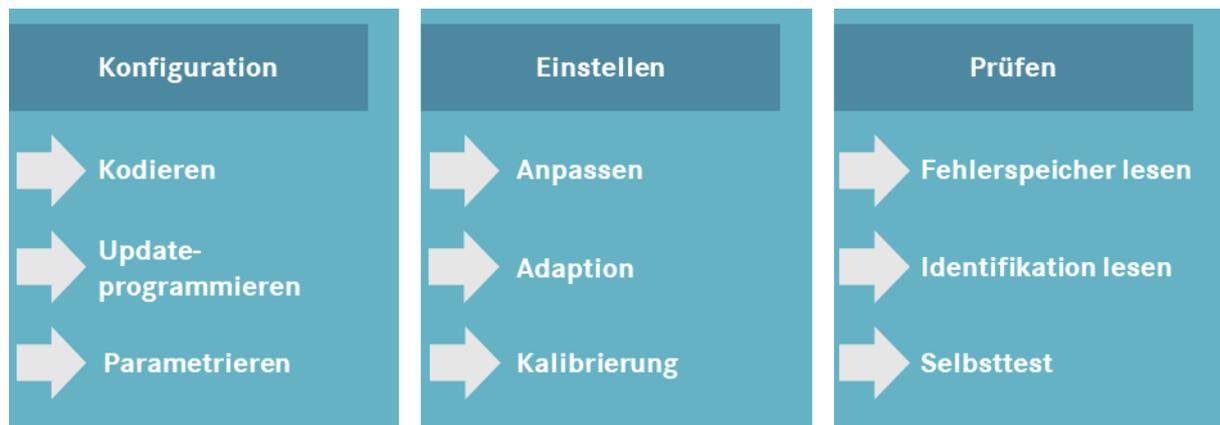
Der Entwicklungsprozess beginnt bei der Umsetzung der Diagnoseanforderungen, welche in dem Lastenheft für den Zulieferer des Steuergeräts definiert sind. In den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eines Steuergeräts müssen somit bereits Definition der Diagnosefunktionen, Bereitstellung von Testgeräten, Kommunikation mit dem Fahrzeug, Freigabe und Verteilung der Software festgelegt werden. [SCH16]

Das Festlegen der systembezogenen Diagnose erfolgt durch den Systementwickler bei dem Fahrzeughersteller in Zusammenarbeit mit dem Zulieferer sowie den Diagnoseentwicklern aus Entwicklung, Produktion und Service. Die Diagnoseentwickler definieren beim Fahrzeughersteller die Diagnose-Kommunikationsprotokolle, die Konfiguration der Diagnose-Softwarekomponenten, die Erstellung der Diagnose-Baureihenlastenhefte und die Festlegung der Rahmenbedingungen für die ODX-Daten [ISO22901]. Mittels Editoren kann die Diagnose-Datenbasis angepasst werden und der Entwicklung, Produktion und Service bereitgestellt werden. Anschließend werden die entwickelte Diagnose sowie die daraus ableitbare Inbetriebnahme auf Hardware-in-the-Loop-Prüfständen durch Fahrzeug-Integratoren überprüft. Wenn sich die Inbetriebnahme somit bewährt hat, folgt die Integration der Inbetriebnahme in den Produktionsbereich. Dazu wird die Inbetriebnahme im Rahmen der Prüfplanung auf die Inbetriebnahme-Testgeräte in die Produktion gebracht. Die Verantwortung der Durchführung und Dokumentation der Inbetriebnahmeabläufe liegt bei der Fahrzeugmontage und -produktion. Der daraus entstehende Umfang der Inbetriebnahme in der Fahrzeugproduktion wird im nächsten Kapitel näher erläutert. [REI14]

### 2.4.2 Inbetriebnahme in der Fahrzeugproduktion

Der eingangs genannte Trend, dass der Anteil der Elektronik in modernen Fahrzeugen stetig zunimmt, ist ebenfalls in der Produktion stark bemerkbar, da hier die elektrischen Komponenten in Betrieb genommen werden. Da dies vor der Übergabe zum Kunden mit höchsten qualitativen Ansprüchen wirtschaftlich umgesetzt werden muss, bedarf die Inbetriebnahme in der Produktion einer vorzeitigen strukturierten Planung in Hinblick auf Kosten. [REI14]

Die wirtschaftliche Betrachtung ist besonders durch den steigenden Kostendruck bei elektronischen Komponenten in den Fokus gerückt. Da die Kosten der Halbleiterspeicher immer niedriger werden, werden die Steuergeräte heutzutage erst am Fahrzeug konfiguriert. Somit wird strategisch eine späte Variantenbildung erreicht und damit eine viel kleinere Teilebereitstellung durch die Logistik in der Produktion ermöglicht. Dies äußert sich wiederum in Kosteneinsparungen. Darüber hinaus schrumpft ebenfalls der Bereitstellungsraum am Montageband, da der Werker weniger Varianten verbauen muss. [REI14]



**Abbildung 18:** Arten der Inbetriebnahme in der Produktion [REI14]

In der Produktion werden laut Stand der Technik drei Arten der Konfiguration unterschieden. Beim Kodieren werden bestimmte Softwareschalter gesetzt, damit bestimmte Anwendungen je nach Kundenwunsch oder landesspezifischer Vorgabe aktiviert oder deaktiviert werden. Beim Parametrieren werden bestimmte Parameterlisten, Kennfelder etc. in das Steuergerät geladen. Beim Updateprogrammieren (ugs. Flashen) werden ganze oder Teile einer Anwendung in das Steuergerät geladen. Dieser Teil der Inbetriebnahme dauert meist deutlich länger als das Kodieren und wird daher entweder mit Taktbezug über mehrere Stationen im Band oder durch eine Kommissionierungsprogrammierung neben dem Band durchgeführt. Wenn kein Taktbezug besteht, werden die Steuergeräte weit vor der Montagelinie im Lager oder nach der Montage über den Kundendienst programmiert. [ZIM14b]

Neben der Konfiguration von Steuergeräten werden im Rahmen der Inbetriebnahme in der Produktion die elektronischen Systeme eingestellt. Beim Einstellen unterscheidet man ferner drei weitere Arten. Das Anpassen beschreibt das Einschreiben von

Justagewerten und Daten in das Steuergerät. Beispielsweise muss bei Fahrzeugen mit Niveauregelung die tatsächliche Niveaulage der Karosserie mittels einer Messung dem Steuergerät mitgeteilt werden.

Eine weitere Art des Einstellens von Steuergeräten ist die Adaption. Die Adaption initialisiert Aktoren auf eine klar definierte Position. Ein gutes Beispiel repräsentiert an dieser Stelle der Lernlauf der Drosselklappen des Luftstroms der Klimaanlage. Nach dem Verbau der Drosselklappen kennt das Klimasteuergerät nicht den tatsächlichen Verfahrensweg der Drosselklappen. Über den Lernlauf werden die Drosselklappen auf ihre Maximalstellung geöffnet sowie anschließend geschlossen. Somit wird ihr tatsächlicher Verfahrensweg ermittelt und in das Steuergerät programmiert. Bei der Kalibrierung werden wie bei den anderen Einstellungen über eine Diagnosefunktion Messwerte auf die zugeordnete Referenzgröße abgeglichen. Bei dieser Art der Einstellung der Steuergeräte wird beispielsweise der Geber für das Tankniveau auf eine exakt bemessene Kraftstoffmenge eingestellt, so dass das Kombiinstrument die korrekte Kraftstoffmenge anzeigen kann. [REI14]

Als letzter Teil der Inbetriebnahme von Fahrzeugen in der Produktion werden mehrere Prüfungen durchgeführt. Dies soll vermeiden, dass Fehler bei der Montage der elektrischen Systeme bei dem Kunden auftauchen. Als Grundvoraussetzung muss das jeweilige Steuergerät zunächst über das Inbetriebnahme-Testgerät oder ein anderes Ereignis wie das Einschalten der Zündung in einen prüfenden Zustand versetzt werden. Anschließend liest das Steuergerät selbst die Messwerte aus und interpretiert sie. Zum Beispiel wird die Kennzeichenbeleuchtung nach ihrem Verbau über eine Diagnosesequenz eingeschaltet. Das Steuergerät ermittelt danach mit einer On-Board-Messung den Stromfluss. Falls der Stromfluss innerhalb eines definierten Rahmens liegt, kann die Prüfung als erfolgreich interpretiert werden. Falls es nicht der Fall ist, wird der Fehler in den Fehlerspeicher des Steuergeräts eingetragen.

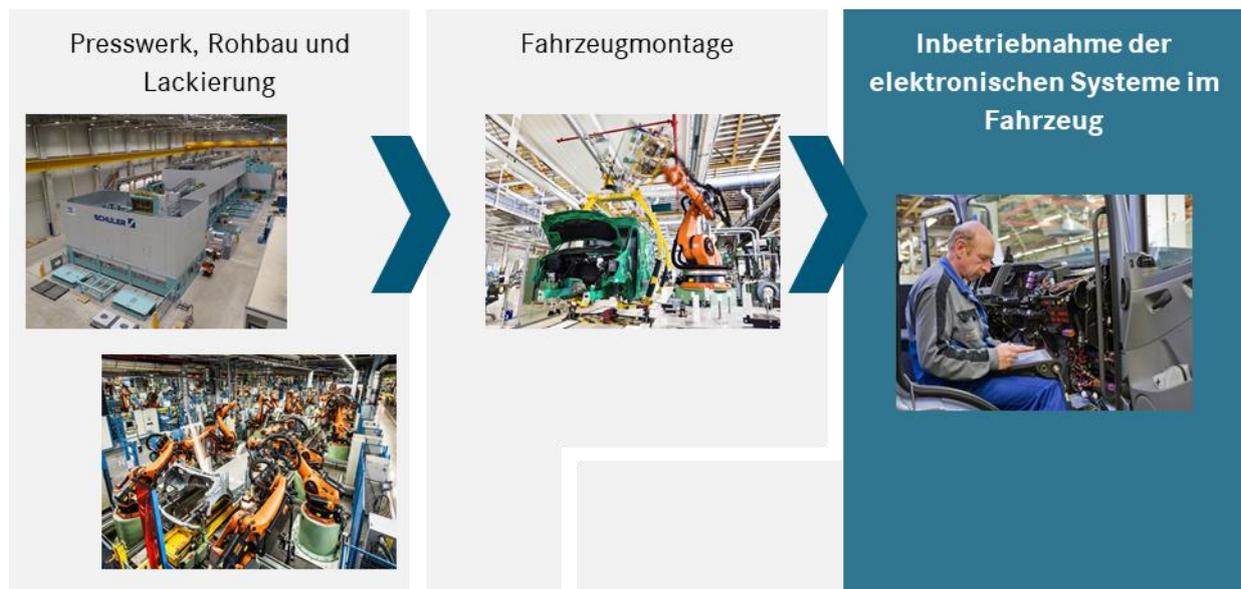
Das regelmäßige Auslesen von Identifikationen ist auch Teil der Prüfung. Hierbei wird geprüft, ob die richtige Steuergerätevariante im Fahrzeug verbaut ist. Obwohl eine Variantenbildung sehr spät erfolgt, kann man einige hardwaretechnische Unterschiede nicht softwareseitig umgehen. Im Rahmen dieser Prüfung wird meist auch ein grundsätzliches Ansprechen der Steuergeräte sichergestellt. [REI14]

Eine aufwändigere Prüfung seitens des Steuergeräts nennt man Selbsttest. Dazu werden mehrere Schritte im Steuergerät hintereinander durchgeführt. Anschließend wird das Ergebnis der Prüfungen im Fehlerspeicher des Steuergeräts dokumentiert. Das Inbetriebnahme-Testgerät kann die Fehler nun über eine Diagnosesequenz auslesen und an die Produktion kommunizieren. Die identifizierten Fehler müssen während der Produktion durch Nacharbeiten am Fahrzeug behoben werden, sodass nach der vollständigen Inbetriebnahme des Fahrzeugs alle Fehler aus dem Fehlerspeicher entfernt sein müssen. [REI14]

Die zuvor dargestellten komplexen Operationen der Inbetriebnahme werden parallel zum Fahrzeugaufbau in der Produktion durchgeführt. Damit dies gelingt, ist eine genaue Synchronisation mit dem Produktionsprozess notwendig. Daher soll als nächstes die Inbetriebnahme in den Produktionsprozess eingeordnet werden.

### 2.4.3 Einordnung in die Fahrzeugproduktion

Um die Inbetriebnahme in die bestehende Fahrzeugproduktion einzuordnen, wird der Gesamtprozess der Fahrzeugproduktion im Folgenden transparent gemacht. Die Fahrzeugproduktion lässt sich auf Grund ihrer hohen Komplexität in vier Produktionsgewerke unterteilen. [HUB16]



**Abbildung 19:** Übersicht der Fahrzeugproduktion [DAI15a]

Zur Vollständigkeit werden die Gewerke Presswerk, Rohbau sowie Lackierung im Folgenden nur kurz näher erläutert. Es ist jedoch vorab anzumerken, dass sie keinen großen Anteil beim Aufbau und bei der Inbetriebnahme von E/E-Systemen haben.

Anschließend wird auf die Fahrzeugmontage einschließlich des Einfahrbereichs näher eingegangen. Dort findet der überwiegende Umfang der Inbetriebnahme statt.

Zu Beginn der Fahrzeugproduktion formt das Presswerk Stahlbleche zu Blechteilen für die Fahrzeugkarosse um. Anschließend werden die Blechteile im Rohbau zu einer Karosse gefügt. In dem sehr stark automatisierten Produktionsprozess werden die Teile meist über spezielle Spann- und Klemmvorrichtungen ausgerichtet, sodass durch Anwendung verschiedener Fügeverfahren die Karosse gefügt werden kann. [KRO09]

Im darauffolgenden Schritt beginnt die Oberflächenbehandlung. Zunächst trägt die Lackiererei eine Grundierung meist über das Tauchprinzip auf die Karosse auf. Anschließend erfolgt das Auftragen unterschiedlicher Lack- und Schutzschichten sowie das Versiegeln von Hohlräumen. Nach der Lackiererei gelangen die Karossen in einen

Sortierpuffer, in dem die Montagereihenfolge für die anschließende Fahrzeugmontage vorbereitet wird. [KRO09]

In der Montage befindet sich der größte Umfang der Inbetriebnahme des Fahrzeugs, da dort auch die elektrischen und elektronischen Komponenten in die Karosse eingebaut sowie erstmalig im Verbund unter elektrischer Spannung gesetzt werden. Daher wird im Folgenden auf die Montage stärker eingegangen.

Die Montage lässt sich nach [KRA00] im Wesentlichen in folgende Abschnitte unterteilen.

- Inneneinbau
- Fahrwerk
- Einfahrbereich
- Wagenfertigstellung

Allerdings findet der überwiegende Teil der Montagetätigkeiten in den Abschnitten Inneneinbau sowie Fahrwerk statt. In den Abschnitten Einfahrbereich und Wagenfertigung befinden sich überwiegend Einstell- und Kontrollarbeiten, sowie Reinigungs-, Austausch- und Nacharbeiten. Diese Abschnitte gehören zur Hauptlinie. Zusätzlich gibt es auch mehrere Nebenlinien, die eine Vormontage von Baugruppen wie Cockpit oder Türen abbilden. Da die Baugruppen schließlich in dem Fahrzeug verbaut werden, fließen auch die Nebenlinien in die Hauptlinie.

Um die aufzubauenden Fahrzeuge in den Abschnitten bewegen zu können, sind entlang mehrerer Montagebänder verschiedenen Arten von Stetigförderer installiert. Sie orientieren sich an der Taktzeit, die üblicherweise in einer Fahrzeugmontage bei 70 bis 120 Sekunden liegt. [GRI18]

Im ersten Abschnitt des Inneneinbaus werden überwiegend Montagetätigkeiten im Fahrzeuginnenraum durchgeführt. Wichtige Komponenten für die E/E-Architektur wie der elektrische Kabelsatz, das Infotainment-, Fahrsicherheits- sowie Komfortsysteme werden in diesem Abschnitt verbaut. Darüber hinaus gehören ebenfalls Brems- und Kraftstoffleitungen, Schiebedach, Fenster, Innenverkleidung sowie Innenausstattung zu den Montageumfängen. [KRA00]

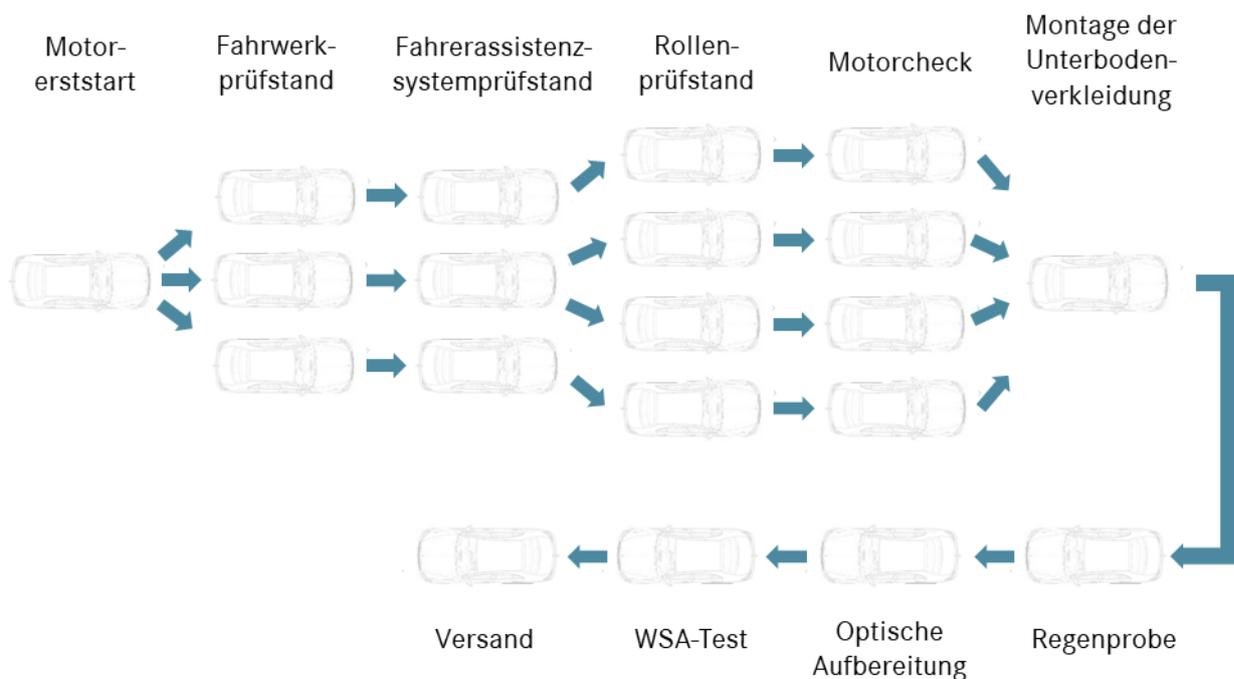
Aber auch Montagetätigkeiten am Fahrzeugboden werden in diesem Abschnitt ausgeführt. Dazu ermöglichen Hängefördertechniken und Gruben die Arbeiten unter dem Fahrzeug. Nebenlinien dieses Abschnitts sind die Cockpit- und Türenvormontage, die darauf im Fahrzeug verbaut werden. Gegen Ende des Inneneinbaus beginnt im Rahmen der Inbetriebnahme die Konfiguration und Prüfung der bis dahin verbauten elektrischen und elektronischen Komponenten. Dafür werden die Inbetriebnahme-Testgeräte mit der OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs verbunden. Damit die Inbetriebnahme prozesssicher durchlaufen werden kann und auch die Fahrzeugbatterie nicht zu stark entladen wird, unterstützt meist eine zusätzliche Ladetechnik das Bordnetz. [KRA00]

Im darauffolgenden Abschnitt des Fahrwerks wird in der sogenannten „Hochzeit“ der parallel aufgebaute Rahmen mit den Aggregaten wie Motor, Vorder- und Hinterachse, Tank sowie Gelenkwelle mit der Karosse gefügt und meist automatisiert verschraubt. Anschließend erfolgt der Verbau der Aggregate und die Montage des Frontmoduls, Kühlmoduls sowie der Räder.

Weitere Montageumfänge beinhalten Vorder- und Rücksitze, Heckmodul sowie Lenkrad und die Betankung des Fahrzeugs mit dem Kraftstoff sowie mit den Betriebsflüssigkeiten wie Kühlmittel, Bremsflüssigkeit etc. Bei den Betriebsflüssigkeiten wird das System zuerst evakuiert und anschließend auf Leckagen überprüft. Erst danach erfolgt die Befüllung mit dem entsprechenden Medium. [DAN17]

Da nun der Aufbauzustand des Fahrzeugs nahezu dem Zielzustand entspricht, werden über das Inbetriebnahme-Testgerät weitere Inbetriebnahmen der elektrischen und elektronischen Komponenten durchgeführt. Wenn diese im Abschnitt des Fahrwerks erfolgreich durchgeführt sind, beginnt der Motorerstart. Eine Qualitätssicherung stellt ferner fest, ob das Fahrzeug für den anschließenden Einfahrbereich in Ordnung ist oder in die Nacharbeit geschickt werden muss.

Im Einfahrbereich werden schwerpunktmäßig Prüf- und Einstellarbeiten durchgeführt. Über die Prüfungen werden zudem gesetzliche Vorgaben abgesichert. Da diese auf speziellen Prüfständen durchgeführt werden, auf denen das Fahrzeug länger als die Taktzeit verweilt, fächert man die Hauptlinie in mehrere parallelen Linien mit Prüfständen auf. In Abbildung 20 ist eine mögliche Gestaltung des Einfahrbereichs und der anschließenden Wagenfertigstellung dargestellt. [MUE18]



**Abbildung 20:** Übersicht des Einfahrbereichs und der Wagenfertigstellung vgl. [MUE18]

Als erstes wird auf dem Fahrwerkstand die Fahrwerkgeometrie des Fahrzeugs vermessen und das Fahrwerk eingestellt. Parallel dazu übernimmt das Inbetriebnahme-Testgerät die Koordination der mechanischen Einstellung der Scheinwerfer. In einem weiteren Schritt findet die Kalibrierung der Sensoren für die Fahrerassistenzsysteme statt. Anschließend wird das Fahrzeug auf den nächsten Prüfstand gefahren.

Auf dem Rollenprüfstand wird das Fahrzeug nach einem Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil verfahren, so dass das Inbetriebnahme-Testgerät die Funktion des Motors und des Bremssystems prüfen kann. Über die Getriebeadaptation werden unter anderem Parameter zur Optimierung des Schaltkomforts eingelernt. Insbesondere motospezifische Inbetriebnahmen werden bis zum anschließenden Motorcheck durchgeführt. [KRA00]

Abhängig vom Prüfergebnis wird das Fahrzeug anschließend entweder in die Wagenfertigstellung oder in die Nacharbeit überführt. In der Nacharbeit wird dann der Fehler korrigiert und das Fahrzeug durchläuft erneut den Einfahrbereich.

In der Wagenfertigstellung erfolgen noch kleinere Justierumfänge an den Türen sowie weitere kleinere Tätigkeiten, wie die Anbringung der Unterbodenverkleidung. In dem Beregnungstunnel erfolgt ferner eine Untersuchung auf Undichtigkeiten. Zudem wird das Fahrzeug mittels Wasch- und Poliervorgängen optisch aufbereitet. Anschließend findet die letzte Prüfung der elektronischen und elektrischen Komponenten über das Inbetriebnahme-Testgerät statt. Im Werkschlussabnahme (WSA) Test wird geprüft, ob keine Fehler in den Steuergerätespeichern hinterlegt sind und ob das Fahrzeug einen definierten Strom bei der Abschaltung aller nicht notwendigen elektrischen Verbrauchern einhalten kann. Der sogenannte Ruhestrom ist ein wichtiger Indikator, ob das Fahrzeug nach einer langen Standzeit weiterhin betriebsbereit ist. Eine externe Ladetechnik lädt zudem die Batterie für den Transport. Zum Schluss sorgt eine letzte Konservierung dafür, dass das Fahrzeug mit einer Schutzfolie und Schaumpolster keine Schäden im anschließenden Versandprozess annehmen kann. [KRA00]

Der Versandprozess beschreibt schließlich die Auslieferung an den Fahrzeugkunden. Im Zuge der Globalisierung der Automobilindustrie und dem Eintritt in neue Märkte bieten Fahrzeughersteller weltweit ihre Fahrzeuge zum Verkauf an. Dementsprechend kann auch der Versandweg zum Kunden zeitlich sehr lange sein. Besonders bei Übersee-transporten kann die Transportzeit viele Tage, aber auch mehrere Wochen betragen. Durch den Einsatz eines softwarebasierten Transportmodus im Fahrzeug werden unnötige Energieverbräuche abgeschaltet, sowie nicht benötigte Fahrzeugfunktionalitäten deaktiviert. Somit wird sichergestellt, dass der Kunde trotz des langen Auslieferungsprozesses ein qualitatives hochwertiges Fahrzeug erhält. [DAN17]

### 3 Forschungsfrage und Vorgehensweise

In dem Stand der Technik wurden die Entwicklungsrichtungen neuer E/E-Architekturen sowie ihre Komplexität hinsichtlich ihrer Vernetzung aufgezeigt. Insbesondere die Konnektivität des Fahrzeugs als eine disruptive Technologie birgt ganz neue Potenziale, das Fahrzeug mit einer externen Infrastruktur zu verbinden. Zudem ermöglicht die Abstrahierung der Software einen neuen modularen Aufbau sowie drahtlosen Aktualisierungsprozess, der bereits beim Kunden ohne einen Besuch in der Werkstatt eingesetzt werden kann.

Die demgegenüber dargestellte Inbetriebnahme in der Produktion von neuen E/E-Architekturen ist mit langen Entwicklungsprozessen sowie kabelgebundenen Inbetriebnahme-Testgeräten verbunden. Dies wird bisher durch die zuvor dargestellten großen Umfänge der Inbetriebnahme gerechtfertigt. Zudem hat der Einblick in die Fahrzeugproduktion auch die komplexe Produktionsumgebung mit unterschiedlichen Vorbedingungen hervorgehoben.

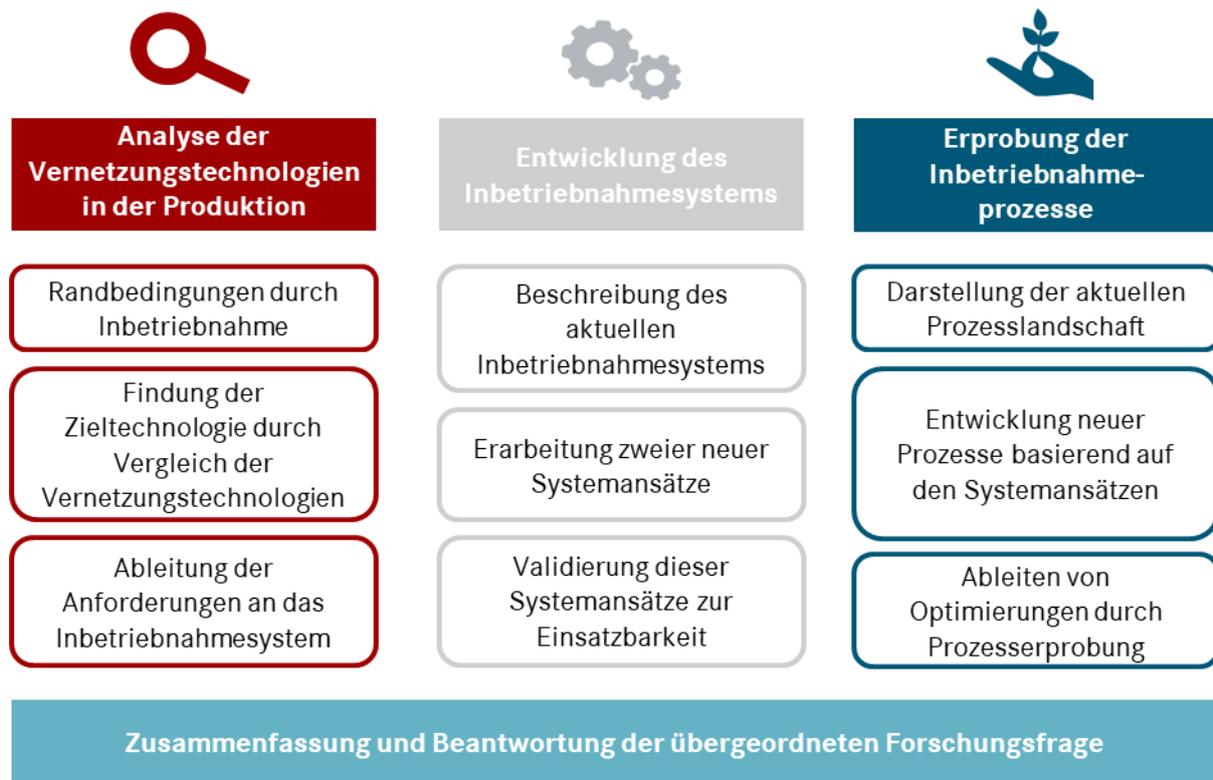
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dementsprechend die Forschungsfrage, inwieweit sich moderne Fahrzeuge mit der Produktion drahtlos vernetzen lassen, beantwortet werden. Hinsichtlich der Forschungsfrage sollen neue Möglichkeiten für eine zukunftsfähige Inbetriebnahme unter Anwendung von neuartigen IT-Ansätzen sowie mit optimierten Prozessen in der Fahrzeugmontage, ergründet werden.

Die übergeordnete Forschungsfrage kann in folgenden konkretisierten Fragestellungen präzisiert werden, welche einen entsprechenden Lösungsweg vorgeben:

- Welche Zieltechnologie kann zur drahtlosen physikalischen Übertragung der Daten eingesetzt werden? Welche Erkenntnisse lassen sich davon für das Inbetriebnahmesystem ableiten?
- Wie kann das zukünftige Inbetriebnahmesystem ausgelegt werden? Welche modernen IT-Protokolle werden verwendet?
- Wie kann die Prozesslandschaft in der Montage davon profitieren? Wie kann eine höhere Wertschöpfung erreicht werden?

Um diese Fragen zu beantworten, bedarf es eines systematischen Vorgehens zur Lösungsfindung. Ausgehend von der physikalischen Verbindung zwischen Fahrzeug und Produktion über den systemrelevanten Transport der Daten bis zur prozessualen Anwendung lassen sich drei grundsätzliche Bereiche definieren: Vernetzung, Inbetriebnahmesystem und -prozess.

Da diese Bereiche stark voneinander abhängig sind, wird die strukturierte Vorgehensweise in Abbildung 21 dieser Arbeit zu Grunde gelegt.



**Abbildung 21:** Vorgehensweise in dieser Arbeit

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung werden in Kapitel 4 aktuelle Herausforderungen für die Vernetzung in der Produktion identifiziert. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden zukunftsweisende Vernetzungstechnologien analytisch verglichen, so dass aus den erarbeiteten Varianten eine Zieltechnologie zur optimalen physikalischen Übermittlung der Daten ausgewählt werden kann. Daraus erfolgt eine Ableitung der Erkenntnisse für ein innovatives Inbetriebnahmesystem.

In Kapitel 5 erfolgt die Beschreibung des aktuellen Inbetriebnahmesystems und anschließend die Ableitung von zwei innovativen Systemansätzen. Der erste Ansatz geht von einer Virtualisierung des aktuellen Systems als Anwendung in einer Cloud aus. Beim zweiten Ansatz erfolgt die Integration des Inbetriebnahmesystems unter Anwendung neuer IT-Protokolle nahezu vollständig in das Fahrzeug. In einer anschließenden Analyse werden beide Ansätze auf ihre Umsetzbarkeit geprüft und vervollständigt.

In Kapitel 6 werden diese Systemansätze in eine montageübliche Prozesslandschaft überführt. Dazu werden neue Prozesse entwickelt, die zur Erprobung der entwickelten Vernetzung sowie Systemansätze dienen. Zum Schluss erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung der Arbeit, und die erzielten Ergebnisse werden vor dem Hintergrund der Forschungsfrage kritisch reflektiert.

## 4 Analyse der Vernetzungstechnologien

Um ein vollvernetztes Fahrzeug in der Produktion drahtlos in Betrieb nehmen zu können, sind sehr hohe Anforderungen an die fahrzeugseitigen sowie infrastrukturellen Systeme gestellt. So ist eine stabile Luftschnittstelle elementar für eine erfolgreiche Inbetriebnahme. Um dies fahrzeugseitig als auch produktionsseitig sicherzustellen, sollen zunächst die herrschenden Randbedingungen für eine drahtlose Vernetzung in der Produktion vorgestellt werden. Anschließend soll aus den drei Vernetzungstechnologien WLAN, 5G und LTE eine Zieltechnologie mittels einer Bewertung hinsichtlich der Produktionsumgebung gefunden werden. Die aus der Zieltechnologie abgeleiteten Erkenntnisse werden im darauffolgenden Kapitel zur Entwicklung eines neuen Inbetriebnahmesystems verwendet.

### 4.1 Randbedingungen in der Montage

Anders als der konventionelle Einsatz von drahtlosen Vernetzungstechnologien im Privathaushalt sind industrielle Anwendungen komplexen und strengeren Randbedingungen ausgesetzt. Die Fahrzeuginbetriebnahme in der Produktion stellt dabei keine Ausnahme dar. Deswegen werden im Folgenden die Randbedingungen für eine dortige Vernetzung zusammengefasst.

#### Umgebungseinflüsse auf Funkwellen

Da WLAN oder Mobilfunk über elektromagnetische Funkwellen übertragen wird, können Umgebungseinflüsse das Signal verschlechtern.

Ein besonderes Risiko in einer produktionstechnischen Umgebung für elektromagnetische Wellen stellen metallische Hindernisse mit einer allgemein hohen Leitfähigkeit dar. Insbesondere in einer Fahrzeugproduktion mit großen Karossen aus Blech und großen Anlagen zum Transport und Fügen von Bauteilen sind diese Hindernisse sehr präsent. [GUS19]

Ein weiterer Einfluss sind andere Funkwellen in einem benachbarten Kanal oder gar benachbarten Frequenzspektrum. Da in der Produktion viele Daten drahtlos übertragen werden, ist auch die Funkauslastung sehr hoch. So gibt es in der Montage beispielsweise WLAN Schraubschlüssel, Displays zur Anzeige der Fahrzeuginformationen und Prüfstände mit aktiver Kommunikation zur Prüftechnik.

#### Netzwerk

Zudem ist das Fahrzeug ständig in Bewegung und damit auch das mitgeführte Inbetriebnahme-Testgerät. Unabhängig, ob das Inbetriebnahmesystem im oder beim Fahrzeug ist, es hat immer einen Fahrzeugbezug und bewegt sich mit. Ein WLAN Access Point hat heute eine übliche Distanz zwischen 8 bis 32 Metern zu seinem Endgerät. Da die Hallen mehrere hundert Meter lang sein können, muss das Endgerät bei der Bewegung in der Halle zwangsläufig den Access Point wechseln.

Ferner ist das Netzwerk so konfiguriert, dass die IP Adressen dynamisch vergeben werden. Das hat den Hintergrund, dass nicht alle Endgeräte immer eine IP Adresse besitzen, sondern nur, wenn sie auch wirklich eine brauchen. Die Anzahl der IP Adressen ist in einem Subnetz auf 255 Stück begrenzt. Daher ist eine effiziente Nutzung notwendig, da ansonsten zu viele Subnetze benötigt werden. Umgekehrt heißt es aber auch, dass das Inbetriebnahme-Testgerät eine gewisse Zeit für die Anfrage nach einer IP Adresse benötigt. [GES09]

### **Prozessuale Einflüsse**

Neben den zuvor genannten technischen Einflüssen unterliegt eine getaktete Produktion auch prozessualen Randbedingungen. So sind die Arbeitsinhalte in Takten definiert und müssen zum Ende des Taktes abgeschlossen sein. Das gleiche gilt auch für die Vernetzung. Hier muss sichergestellt sein, dass zu einem bestimmten Arbeitsschritt eine gewisse Information drahtlos übermittelt worden ist. Das beinhaltet eine eingeplante Redundanz des Netzes, damit immer eine ausreichende Kapazität für die Nutzung sichergestellt ist.

Zudem ist die Bandstromversorgung je nach Anwendungsfall nicht durchgehend angeschaltet, denn aus prozessualen Vorgaben darf das Fahrzeug für bestimmte Arbeiten nicht unter Spannung stehen. Daher kann das Inbetriebnahmesystem nicht mit dem Fahrzeug interagieren und geht ebenso in einen Ruhemodus. Diese Ruhezeiten können sogar in Produktionspausen recht groß werden und müssen bei der Vernetzung ebenfalls bedacht werden.

### **Sicherheit**

Für Unternehmen ist die Sicherheit der drahtlosen Netze sehr bedeutend, denn ein hoher Sicherheitsstandard schützt vor fremdem Zugriff. Heutige industrielle WLAN sind üblicherweise mit einer WPA2 Verschlüsselung ausgestattet. Bei Mobilfunk besitzt das Endgerät eine SIM Karte, die sicherstellt, dass sich nur eindeutig bekannte Geräte in das Netz einwählen. Dementsprechend muss sich das Fahrzeug auch zukünftig über diese Verschlüsselungstechnologien sicher mit dem Produktionsnetzwerk verbinden können.

### **Kopplungsprozess**

Herkömmliche Endgeräte melden sich üblicherweise nur einmalig beim drahtlosen Netzwerk an und verbleiben dort auch. Bei der Fahrzeuginbetriebnahme hingegen muss jedes Fahrzeug über einen vereinfachten, jedoch ebenfalls sicheren Prozess bei dem Produktionsnetzwerk angemeldet und auch anschließend wieder entfernt werden. Dementsprechend gelten ganz andere Vorgehensweisen bei der Verwaltung der Endgeräte.

Zusammengefasst herrschen für die Konnektivität des Fahrzeuges in der Produktion ganz andere Rahmenbedingungen als bei konventionellen Endgeräten im Privathaushalt. Im Folgenden wird daher überprüft, welche Vernetzungstechnologie für die Ver-

netzung des Fahrzeugs mit der Produktion geeignet ist. Dazu werden die drei gängigsten drahtlosen Vernetzungstechnologien aus dem Stand der Technik systematisch analysiert und anschließend aus einer ausgewählten Zieltechnologie Erkenntnisse für das Inbetriebnahmesystem abgeleitet.

## 4.2 Vergleich der Vernetzungstechnologien

Als nächstes wird betrachtet, in wie weit man die Vernetzungstechnologien WLAN, 5G und LTE in die existierende Produktionsinfrastruktur für eine Vernetzung des Fahrzeugs integrieren kann. Die zuvor diskutierten Randbedingungen in der Produktion weisen auf mehrere Bewertungskriterien hin. Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren zur Multikriterienbewertung verschiedener, komplexer Technologiealternativen und eignet sich in diesem Kontext hervorragend als Entscheidungswerkzeug. Dabei können mehrere Bewertungskriterien zum Vergleich unterschiedlicher Lösungsvarianten herangezogen werden. Ein häufig verwendete Alternative zur Technologieauswahl stellt die Portfolioanalyse dar. Sie wird an dieser Stelle nicht verwendet, da sie nur als eine zweidimensionale Methodik jeweils nur zwei Bewertungskriterien gegenüberstellen kann. Bei der Nutzwertanalyse können jedoch durch ein strukturiertes Vorgehen, sowohl mehrere quantitative Kriterien als auch qualitative Kriterien objektiv in die Bewertung mit einbezogen werden. [GOT16]

### 4.2.1 Vorgehen bei der Nutzwertanalyse

Die genaue Vorgehensweise zur Durchführung einer Nutzwertanalyse ist im Folgenden erklärt.

1. Festlegung der Alternativen

Hierbei werden die drei Vernetzungstechnologien WLAN, 5G und LTE genannt.

2. Definition von Bewertungskriterien

Unter diesem Punkt sollen die Kriterien entwickelt werden. Sie richten sich nach der Einsetzbarkeit der Vernetzungstechnologie in der vorhandenen IT Infrastruktur und leiten sich teils aus den zuvor genannten Rahmenbedingungen in der Produktion ab.

3. Gewichtung der Bewertungskriterien

Anschließend werden die Kriterien mittels einem paarweisen Vergleich gewichtet, in wie weit sie bedeutend für den Anwendungsfall in der Produktion sind. Die Gewichtung erfolgt prozentual, sodass die Summe aller Einzelkriterien 100% ergibt.

4. Festlegung des Bewertungsmaßstabes

Nach der Literatur [GOT16] empfiehlt sich, einen fünfteiligen Bewertungsmaßstab anzuwenden. Dabei ist [5] „sehr gut“ und [1] entspricht „mangelhaft“.

## 5. Bewertung der Alternativen

Die Bewertung stellt den Kern der Nutzwertanalyse dar. Hierbei wird jede Vernetzungstechnologie mit jedem Kriterium bewertet. Danach wird die Bewertung mit der Gewichtung multipliziert, sodass sich die Wertungszahl ergibt.

## 6. Summierung und Auswahl

Durch die Summierung der Wertungszahlen ergibt sich die gewichtete Punktzahl pro Alternative. Die Alternative mit der höchsten Punktzahl entspricht den definierten Kriterien am besten.

Nachdem das Vorgehen bei dieser Nutzwertanalyse vorgestellt wurde, beschäftigt sich der nächste Teil damit, wie die Bewertungskriterien lauten.

### 4.2.2 Bewertungskriterien

Ein in der Literatur häufig genanntes Kriterium sind die Kosten, da sie den direkten wirtschaftlichen Bezug der Vernetzungstechnologie beschreiben. Zwar sind die echten Kosten gerade bei neuen Technologien wie 5G schwierig zu ermitteln, allerdings stellt die Nutzwertanalyse nur einen Vergleich der Technologien dar. Die Abschätzung fällt dadurch einiges leichter. [GOT16]

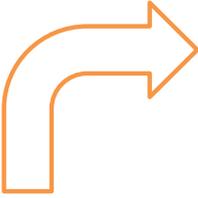
Die Reichweite stellt ein Kriterium für die abstandsbezogene Erreichbarkeit des Endgeräts dar. Jede Vernetzungstechnologie ist für eine bestimmte Reichweite prädestiniert. Diese kann man natürlich mit dem Einsatz von mehr Antennen vergrößern, allerdings gibt es Bereiche in der Produktion, die mehr wünschenswert als verpflichtend für eine Abdeckung sind. Bei diesen Flächen, wie zum Beispiel Flächen außerhalb der Produktionshalle, würde sich dementsprechend eher eine Technologie mit einer hohen Reichweite lohnen.

Das dritte Kriterium ist die Sicherheit. Bereits im Stand der Technik wurde auf die Sicherheit im Rahmen der Konnektivität hingewiesen, da sie besonders in der heutigen Zeit bei externen Bedrohungen, wie durch Cyberangriffe, sehr stark im Fokus steht. Jeder dieser Vernetzungstechnologien bringt ihren eigenen Sicherheitsmechanismus bezüglich Vertraulichkeit und Authentizität mit, welcher hier bewertet werden soll.

Mit der Verfügbarkeit, als ein weiteres sicherheitstechnisches Kriterium nach dem Stand der Technik, soll bewertet werden, ob es kurzfristige Alternativen im Netz gibt, falls Engpässe auftreten. Insbesondere bei hoch belasteten Netzen müssen kurzfristig Ersatzkapazitäten aktiviert werden.

Unter dem Kopplungsprozess soll verstanden werden, wie leicht neue Endgeräte in das drahtlose Netzwerk hinzugefügt werden können. Im Hinblick auf die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktion, muss ebenfalls sichergestellt werden, dass sich mehrere hundert Fahrzeuge täglich mit dem Produktionsnetz verbinden und anschließend wieder automatisiert trennen können. Ebenso muss die Handhabung einfach sein, da auch außerplanmäßige Inbetriebnahmen vorkommen können.

Das letzte Kriterium beinhaltet die Anfälligkeit für Störungen. Jede Vernetzungstechnologie verwendet eine andere Funkfrequenz. Die Störungen können somit unterschiedliche Auswirkungen auf die Echtzeitfähigkeit der Vernetzung und somit auch einen Einfluss auf die Auslegung des Inbetriebnahmesystems haben. Daher soll anhand dieses Kriterium die Anfälligkeit der Funkwelle auf Störungen bewerten werden.



	Kosten	Reichweite	Sicherheit	Kopplungsprozess	Verfügbarkeit	Störanfälligkeit	Häufigkeit	%
Kosten		1	1	1	1	1	5	27.3%
Reichweite	0		0	0	1	0	1	9.1%
Sicherheit	0	1		0	1	1	3	18.2%
Kopplungsprozess	0	0	0		1	1	2	13.6%
Verfügbarkeit	1	1	0	1		0	3	18.2%
Störanfälligkeit	0	1	0	1	0		2	13.6%
							Summe	100.0%

**Abbildung 22:** Paarweiser Vergleich in der Nutzwertanalyse

Diese sechs Kriterien werden nun im paarweisen Vergleich gewichtet. Die hellblauen Kästchen in Abbildung 22 zeigen den Wert 1, wenn das horizontale Kriterium über das vertikale Kriterium überwiegt. Bei dem Wert 0 ist es andersherum. Aus dieser Unterscheidung wird darauf die Gewichtung als Prozentsatz gebildet. Die Priorisierung stellt sich wie folgt zusammen und wird folgend näher erläutert.

1. Kosten
2. Sicherheit
3. Verfügbarkeit
4. Störanfälligkeit
5. Kopplungsprozess
6. Reichweite

Das Ergebnis der Gewichtung zeigt, dass an erster Stelle die Kosten stehen, denn eine Weiterentwicklung der Inbetriebnahme ist nur mit einem wirtschaftlichen Einsparpotenzial zu vereinbaren.

Mit der Priorität 2 ist die Sicherheit genannt. Wie mehrfach erwähnt, dürfen keine unberechtigten Endgeräte in das Produktionsnetzwerk gelangen und unautorisiert Zugang zum Datenverkehr haben.

Danach ist die Verfügbarkeit genannt. Sollte sich die Belastung des Netzes durch eine Umstrukturierung ändern, ist es notwendig, noch zusätzlich auf Ersatzressourcen zurückzugreifen zu können. Insbesondere bei einem systemrelevanten Anwendungsfall

wie der Inbetriebnahme der Fahrzeuge, muss dieser Punkt betrachtet werden. Als viert wichtigstes Kriterium ist die Störanfälligkeit identifiziert worden. Da die Produktion bereits durch Metallwände und Maschinen viele Hindernisse aufweist, sind besonders Funkwellen davon beeinträchtigt. Daher ist eine Technologie mit einer wenig beeinflussbaren Funkwelle vorteilhaft.

An vorletzter Stelle folgt der Kopplungsprozess, denn diese Herausforderung ist ebenso mit mehreren Fahrzeugen am Tag zu bewältigen. Dementsprechend sollte auch die Vernetzungstechnologie ein geeignetes Verfahren mit sich bringen. Als letztes Kriterium ist die Reichweite genannt. Große Abdeckungsreichweiten verringern die Anzahl der Antennen, führen aber auch zu einem zu schnell überlasteten Netz. Allerdings ist der Innenraum einer Produktion meist begrenzt.

### **4.2.3 Bewertung der Alternativen**

Nach der Priorisierung der Bewertungskriterien findet nun die eigentliche Bewertung statt. Einzelne Versuche und Literaturrecherchen sollen diese Bewertung untermauern.

#### **Kosten**

WLAN kann im Vergleich zu dem Mobilfunk die geringsten Kosten aufweisen. Dies liegt daran, dass diese Technologie bereits sehr im Gebäudesektor etabliert ist. Darüber hinaus ist die Frequenz unlizenziiert und lässt sich dementsprechend leicht skalieren. Demgegenüber steht der Mobilfunk, bei dem für hohe Kosten zuerst ein Frequenzband für das jeweilige Land des Produktionsstandortes erworben werden muss. Insbesondere 5G als neue Technologie weist derzeit noch hohe Kosten für den Kauf der Mobilfunkfrequenzen auf. Darüber hinaus ist der Mobilfunk noch nicht sehr stark für den Gebrauch in Gebäuden entwickelt. Dementsprechend sind die Kosten für Antennen und Netzwerktechnik noch sehr hoch. Ergo fällt die kostentechnische Bewertung so aus, dass WLAN als sehr gut, LTE als befriedigend und 5G, als neuste Technologie, noch als mangelhaft bewertet wird. [HAN19], [VOD20]

#### **Sicherheit**

Als nächstes Kriterium wird die Sicherheit betrachtet. Da der Mobilfunk eine lizenzierte Frequenz und darüber hinaus auch eine SIM Karte verwendet, ist die Identität jedes teilnehmenden Endgeräts sichergestellt. WLAN dagegen beruht auf einem unlizenziierten Frequenzkanal und jedes Endgerät hat darauf Zugriff. Dementsprechend ist auch die Bedrohung von ungewollten Teilnehmer vorhanden. Die Verschlüsselung über WPA2 ist allerdings dafür recht sicher. Dementsprechend wird WLAN mit befriedigend im Rahmen der Sicherheit bewertet. LTE bekommt eine gute Bewertung und 5G, als neuste Technologie und damit mit einer besseren Verschlüsselungstechnik als LTE, bekommt eine sehr gute Bewertung. [QUA18]

## Verfügbarkeit

Das Kriterium Verfügbarkeit betrachtet die Möglichkeit auf alternative Ressourcen im Falle einer Überlastung zu wechseln, denn es ist nie garantiert, wie sich die Belastung des drahtlosen Netzes entwickelt. Bei einem starken Anstieg des Datenaustauschs müssen Alternativen geschaffen werden. WLAN bietet dies unter Nutzung zweier Frequenzbänder bei 2,4 GHz und 5 GHz. Bei einem erhöhten Bedarf können einige Endgeräte zu dem anderen Frequenzband wechseln. Der Wechsel ist leider nur über eine umständliche Einstellung möglich und auch nicht alle Endgeräte unterstützen beide Frequenzbänder. Daher wird die Verfügbarkeit für WLAN nur mit gut bewertet. LTE hingegen hat bei einer gekauften Frequenzlizenz meist keine Alternativen, bzw. nur den Zukauf weiterer Frequenzen. Da dies mit hohen Kosten verbunden ist, wird das Kriterium mit befriedigend bewertet. 5G bietet dagegen die Nutzung von mmWaves. Dieses hohe Frequenzband stellt eine Alternative zu den Frequenzen bis 6 GHz dar. Da dieses Frequenzband zudem noch nicht sehr stark genutzt wird, sind die Frequenzen günstig oder sogar komplett frei nutzbar. Daher wird 5G hierbei mit gut bewertet. [VAE19]

## Störanfälligkeit

An vierter Stelle wird nun die Störanfälligkeit betrachtet. Da die Störanfälligkeit maßgeblich das Inbetriebnahmesystem bestimmt, werden zunächst Latenzversuche für die Vernetzungstechnologien WLAN, LTE sowie 5G durchgeführt.

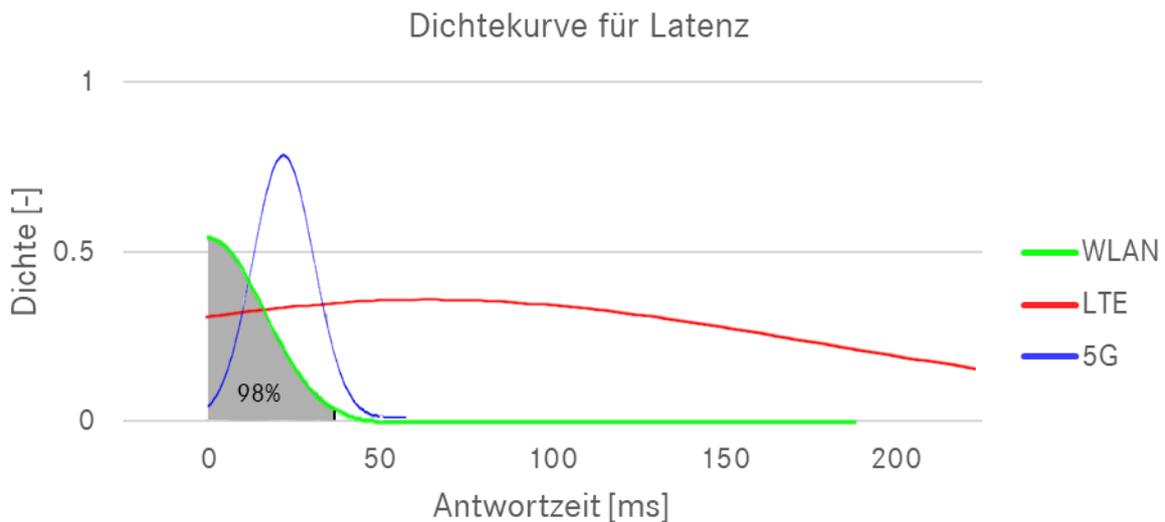
Mittels der Echtzeitfähigkeit kann bewertet werden, inwieweit das System im Fahrzeug eigenständig operieren muss. Bei einer hohen Echtzeitfähigkeit können Rechenkapazitäten leicht an einen Server in der Produktionsinfrastruktur ausgelagert werden. Ist dies nicht gegeben, muss das Fahrzeug alle kritischen Prozesse bei einer höheren systemseitigen Komplexität selbst durchführen. Als guter Richtwert bei der Messung bietet sich das Internet Control Message Protocol (ICMP v6) an.

Das ICMP ist eine IP-Implementierung und wird größtenteils für Steuerungsaufgaben verwendet. Eine Anwendung ist der ICMP Echo Request (PING). Mit Hilfe dieses Ping Befehls kann die IP-Kommunikation zwischen zwei Netzwerkteilnehmer überprüft werden. Dies erfolgt durch Aussenden eines ICMP Echo Request an einen gewünschten Teilnehmer. Wenn der Gegenteilnehmer die Anfrage mit einem ICMP Echo Reply (PONG) erwidert, so weiß der anfragende Knoten, dass der gewünschte Teilnehmer verfügbar ist. [WER17b]

Zusätzlich wird bei dieser Anwendung die Antwortzeit ermittelt. Dazu wird auf dem Endgerät zyklisch ein PING an das Gateway auf der Seite der Antenne geschickt und die Zeit bis zum Eintreffen der Antwort gemessen. Die daraus resultierende Antwortzeit lässt auf die Latenz schließen. Je schneller das System antwortet, desto echtzeitfähiger ist es und desto einfacher ist es, eine zeitkritische Diagnosekommunikation zu übertragen. Zwar arbeitet diese Anwendung etwas anders als die üblichen Verfahren zum Versenden von Daten, jedoch kann das ICMP Echo Request schon eine valide Aussage über die Echtzeitfähigkeit geben.

Die verwendete Infrastruktur ist dabei eine Versuchsumgebung, die einer sehr produktionsnahen Umgebung nach den eingangs genannten Rahmenbedingungen entspricht. Das Endgerät wird wie in einem realen Produktionsprozess bewegt und führt einen entsprechenden Antennenwechsel durch. Somit soll sichergestellt werden, dass der Versuch die realen Produktionsbedingungen widerspiegelt.

In der folgenden Darstellung ist die Dichtekurve der Antwortzeit für eine WLAN, LTE und 5G Infrastruktur für eine circa siebenstündige Beobachtungszeit dargestellt.



**Abbildung 23:** Verteilung der gemessenen Antwortzeit für die Vernetzungstechnologien

Es ist zu erkennen, dass sich die überwiegende Antwortzeit für WLAN unter 50 ms befindet. Der Durchschnitt liegt bei 11,58 ms. Ferner zeigt die Abbildung 23, dass 98% der Antwortzeiten sogar unter 30 ms liegen. Die maximale gemessene Antwortzeit liegt bei 190 ms.

Demgegenüber steht die gleiche Messung in einem produktionsnahen LTE-Netz. Es ist zu beobachten, dass sich die Antwortzeiten bis über 300 ms abfallend verteilen. Der Mittelwert ist im Vergleich zum WLAN bei 30,52 ms dreimal so hoch.

Als letztes sollte ein produktionsnahes 5G-Netz bessere Ergebnisse als Weiterentwicklung von LTE zeigen. Es ist zu erkennen, dass das 5G-Netz keine Ausfälle über 50 ms aufweist. Somit ist es deutlich besser als das LTE-Netz. Allerdings liegt die durchschnittliche Antwortzeit bei 20,12 ms und ist somit doppelt so hoch wie beim WLAN.

Zusammengefasst weist WLAN im Durchschnitt die geringste Antwortzeit auf. Dagegen ist die maximale Antwortzeit beim 5G-Netz deutlich kleiner als die maximale Antwortzeit bei WLAN. Das LTE-Netz zeigt sowohl im Durchschnitt als auch bei der maximalen Antwortzeit durchweg die höchsten Werte.

WLAN wird heute schon vielseitig in Gebäuden eingesetzt. Daher sind viele Herausforderungen, wie ein sich bewegendes Endgerät und ein damit verbundener Antennenwechsel, bereits innerhalb von Gebäuden gelöst. Aus der Messung gehen damit übereinstimmend auch geringe Antwortzeiten hervor. Daher wird die Echtzeitfähigkeit von WLAN mit sehr gut bewertet.

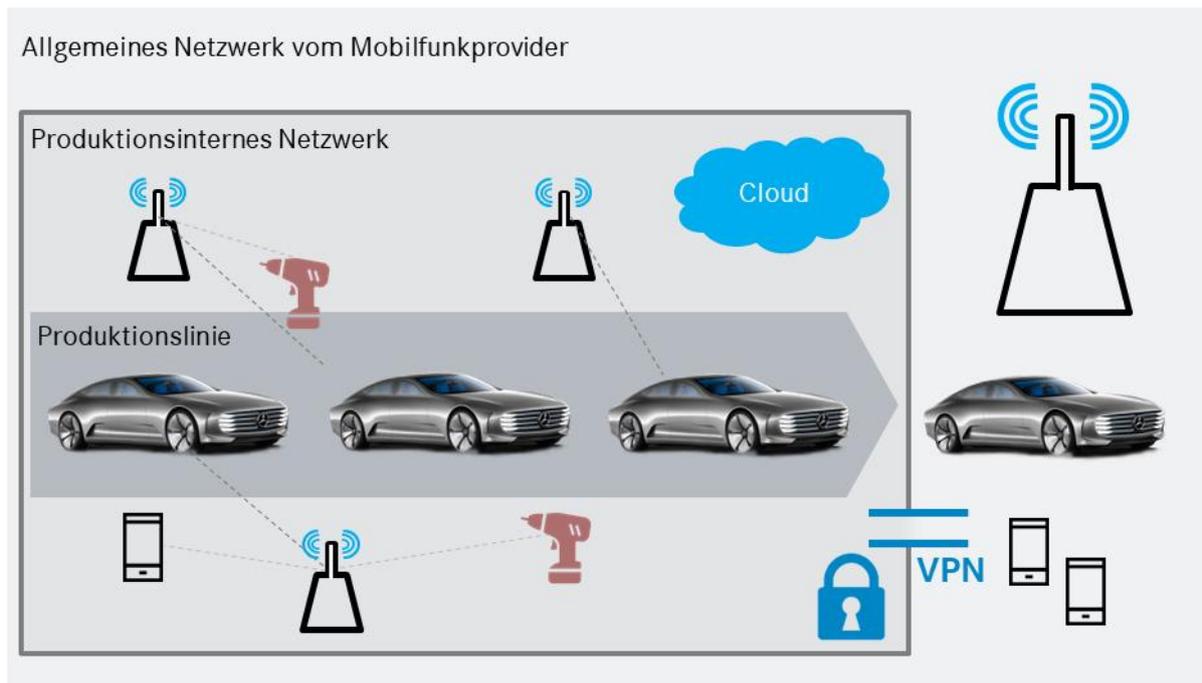
LTE ist nicht für den Gebäudegebrauch entwickelt worden, sondern größtenteils für große Funkzellen. Dies ist auch in der Messung zu beobachten, sodass LTE mit ausreichend im Rahmen der Echtzeitfähigkeit bewertet wird. 5G dagegen hat die Herausforderungen von LTE als Nachfolger überwunden und weist eine gute Echtzeitfähigkeit bei der Verwendung in der Produktionsumgebung auf. Daher wird es hierbei mit gut bewertet.

### **Kopplungsprozesses**

Nun folgt die Betrachtung des Kopplungsprozesses. Die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktion sieht vor, dass sich täglich mehrere hunderte Fahrzeuge mit dem Produktionsnetz automatisiert koppeln, dann eine Inbetriebnahme durchführen und sich anschließend wieder aus dem Netzwerk entkoppeln. Daher ist es wichtig, dass die Vernetzungstechnologien einen automatisierten Entkopplungs- und Kopplungsprozess bereitstellen. Im heutigen WLAN in der Produktion werden bereits viele Endgeräte über einen fest definierten Prozess gekoppelt. Dieser Prozess müsste für einen automatisierten Kopplungsprozess für die Fahrzeuge angepasst werden. LTE verfügt nach heutigen Recherchen keinen geeigneten Standard für eine automatisierte Kopplung und müsste dementsprechend eigenständig angepasst werden. Auf Grund der Eignung von 5G für IoT Systeme, deutet sich ein solches Verfahren an. Es ist aber noch nicht vollständig spezifiziert. Daher wird WLAN mit gut bewertet, da immer noch kleine Anpassungen für die Einsetzbarkeit erfolgen müssen. Die Bewertung von LTE sieht ausreichend und von 5G befriedigend vor. [YAN17]

## Reichweite

Als letztes Kriterium wird nun die Reichweite betrachtet. Diese ist in erster Linie von der verwendeten Frequenz abhängig. Da der Mobilfunk etwas niedrigere Frequenzen mit 700 MHz bis 2700 MHz verwendet als WLAN, welches im Bereich von 2400 MHz bis 5800 MHz liegt, kann der Mobilfunk größere Bereiche abdecken. Daher ist der Mobilfunk in diesem Kriterium WLAN klar überlegen. Insbesondere die Abdeckung von Außenbereichen mit dem Netzwerk von den klassischen Mobilfunkanbietern kann die nutzbare Fläche, wie in Abbildung 24 dargestellt, stark vergrößern. [QUA18]



**Abbildung 24:** Möglicher Aufbau eines Mobilfunknetz in der Produktion [DAI15b]

So können Endgeräte im Gebäude das produktionseigene Mobilfunknetzwerk nutzen. Außerhalb des Gebäudes können sie über das klassische Mobilfunknetz mit einem Virtual Private Network (VPN) eine Verbindung in das produktionseigene Netzwerk aufbauen. Da 5G dies noch intelligent mit einem weiteren zwar hohen Frequenzspektrum von 25 bis 50 GHz ohne Lizenzgebühren erweitert, wird es mit sehr gut bewertet. Darauf folgt LTE mit befriedigend und WLAN mit ausreichend. [QUA18]

Nach der Einzelbewertung werden nun die Wertungszahlen addiert und eine Auswahl getroffen.

#### 4.2.4 Summierung und Auswahl

Als letzten Schritt werden die Wertungszahlen aus der Gewichtung und der Bewertung berechnet sowie anschließend aufsummiert. Die Technologie mit der höchsten Punktzahl entspricht der gesuchten Zieltechnologie.

	Gewichtung	WLAN		LTE		5G	
		Bewertung	Wertungszahl	Bewertung	Wertungszahl	Bewertung	Wertungszahl
Kosten	0.27	5	1.36	3	0.82	1	0.27
Reichweite	0.09	2	0.18	3	0.27	5	0.45
Sicherheit	0.18	3	0.55	4	0.73	5	0.91
Kopplungsprozess	0.14	4	0.55	2	0.27	3	0.41
Verfügbarkeit	0.18	4	0.73	3	0.55	4	0.73
Störanfälligkeit	0.14	4	0.55	2	0.27	4	0.55
Wertigkeit			3.91		2.91		3.32
normierte Wertigkeit			1.00		0.74		0.85
Rangfolge			1		3		2

**Abbildung 25:** Bewertung der Alternativen in der Nutzwertanalyse

Führt man die Ergebnisse zusammen, zeigt sich WLAN als eine sehr vielversprechende Technologie für die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktionsinfrastruktur im Rahmen der Inbetriebnahme. Insbesondere durch die hohe Skalierbarkeit hat sich WLAN gegenüber den anderen Technologien durchgesetzt. Zwar bringt 5G als neue Vernetzungstechnologie auch neue Fähigkeiten mit, allerdings ist es mit dem Kauf von Mobilfunkfrequenzen verbunden. Da die Frequenzen für jedes Land eines Produktionsstandorts erworben werden müssen, geht die Technologie mit hohen Einstiegskosten einher. Da auch der Erwerb der Frequenzen für LTE gilt und es zudem der Vorgänger von 5G ist, geht aus der Nutzwertanalyse somit hervor, dass WLAN sich als geeignetere Technologie für die Vernetzung mit der Produktionsinfrastruktur gegenüber dem Mobilfunk erweist.

Daher wird im Folgenden WLAN als Zieltechnologie detaillierter untersucht, um ferner Aufschluss über die Einsetzbarkeit von WLAN in einer produktionstechnischen Umgebung zu geben. Anschließend werden daraus Rückschlüsse auf das zu entwickelnde Inbetriebnahmesystem und die Schnittstelle im Fahrzeug gezogen.

### 4.3 Detaillierte Bewertung von WLAN

Neben der Nutzbarkeit in einer produktionstechnischen Infrastruktur muss bei einer detaillierten Betrachtung der Zieltechnologie WLAN auf die übertragbare Datenrate eingegangen werden. Über die Datenrate lässt sich ermitteln, mit welcher Geschwindigkeit die Daten vom Server auf das Endgerät gelangen und zurück. Somit lässt sich auf die Zeit schließen, bis wann eine gewisse Anzahl an Datenpakete übertragen worden ist. Besonders in der Produktion ist eine bekannte Datenübertragungsrate wichtig, da somit sichergestellt werden kann, dass eine bestimmte Anzahl von Datenpakete an das Fahrzeug übertragen und daher das Fahrzeug innerhalb eines bestimmten Zeitfensters in Betrieb genommen werden kann. Ausgehend davon können in einem nächsten Schritt die Erkenntnisse für das Inbetriebnahmesystem abgeleitet werden.

WLAN ist größtenteils über den Standard IEEE 802.11 definiert [IEE09], [IEE13]. Genauso ist auch dort eine theoretisch erreichbare Datenrate hinterlegt, die von folgenden Leistungsparametern abhängig ist.

- Breite der Kanäle
- Modulationsverfahren
- Anzahl der gleichzeitigen Datenströme

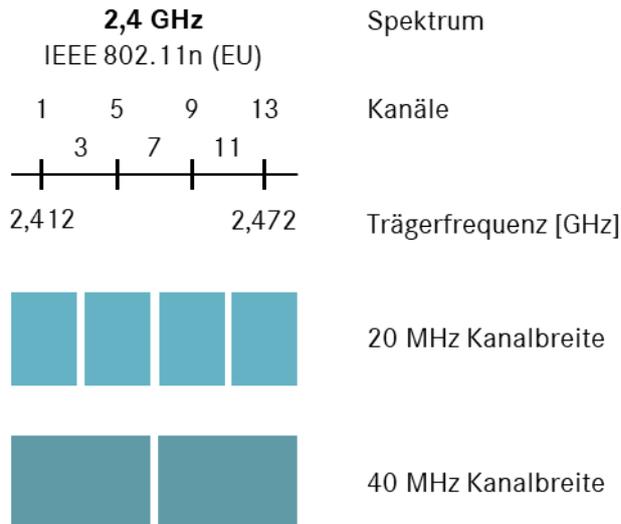
Diese Leistungsparameter haben einen entscheidenden Einfluss auf die Datenrate und müssen sowohl von dem Access Point als auch vom Endgerät eingehalten werden.

Nachfolgend wird auf diese Leistungsparameter in Bezug auf die theoretisch erreichbare Datenrate in der Produktion eingegangen. Aufschluss über die tatsächliche Datenrate unter den produktionsrealistischen Leistungsparametern bringt eine Messung im darauffolgenden Abschnitt, da die tatsächlichen Werte bis zu 30% kleiner ausfallen können. [KOM20]

### 4.3.1 Breite der Kanäle

Die Breite des Übertragungskanal ist direkt proportional zu der Datenrate, denn je breiter das Spektrum ist, desto mehr Datenpakete können übertragen werden. Nach IEEE 802.11 werden derzeit die Frequenzbänder 2,4 GHz und das 5 GHz für WLAN genutzt. Es existiert darüber hinaus noch das 60 GHz Band nach IEEE 802.11ad, welches aus erschweren Anwendungsgründen hier nicht weiter erläutert wird. [IEE09], [IEE12], [IEE13]

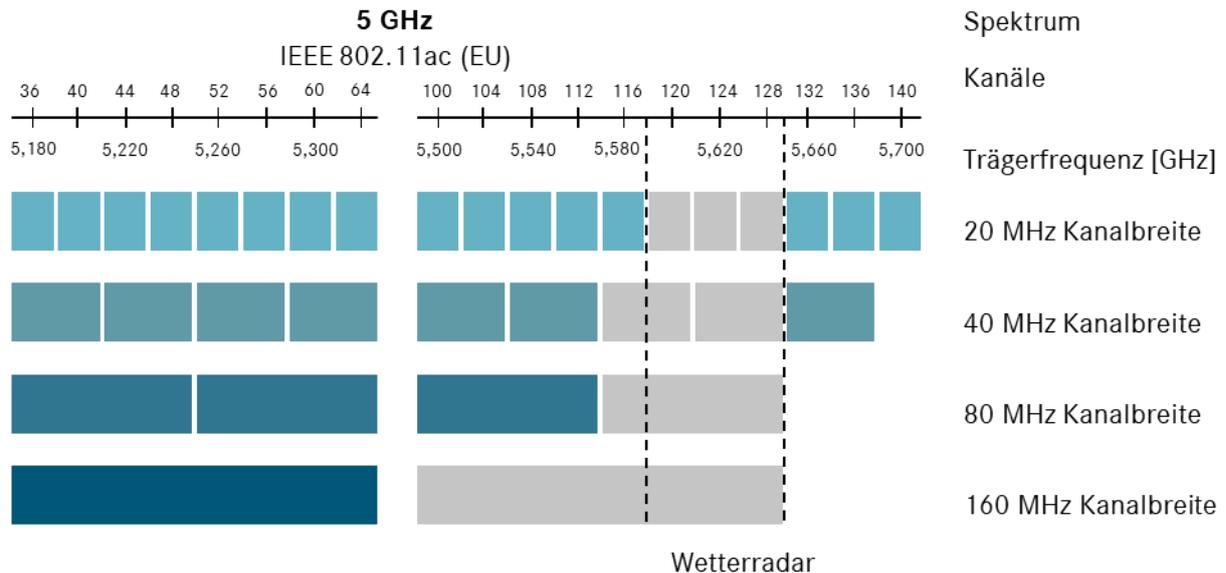
Zunächst sind die benutzbaren Kanäle für das 2,4 GHz Band folgend dargestellt.



**Abbildung 26:** Bandbreitennutzung im 2,4 GHz Band [TEK13]

In Abbildung 26 ist zu erkennen, dass bei einer gesamten Breite von 80 MHz nur vier überlappungsfreie 20 MHz Kanäle existieren. In den USA sind es sogar nach dem aktuellen Standard IEEE 802.11n nur drei. Dementsprechend kann es nur zwei 40 MHz Kanäle geben. 80 MHz Kanäle können schon gar nicht erst bei 2,4 GHz unterstützt werden.

Anders sieht das bei dem 5 GHz Band aus. Die folgende Darstellung zeigt die 19 verfügbaren 20 MHz Kanäle im 5 GHz Band.

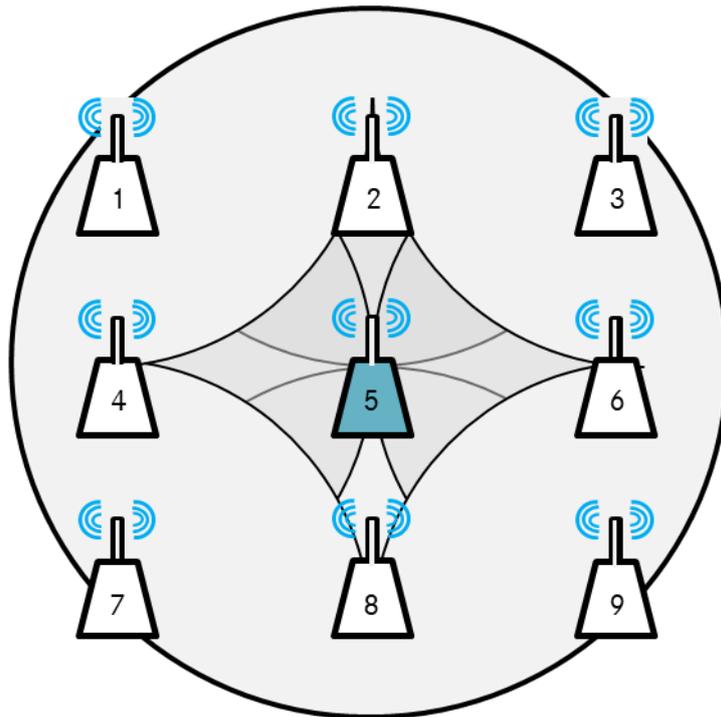


**Abbildung 27:** Bandbreitennutzung im 5 GHz Band [TEK13]

Da eine gesamte Bandbreite von 380 MHz im 5 GHz Band verfügbar ist, können somit auch viel breitere Kanäle als im 2,4 GHz Band gewählt werden. Wie man sehen kann, bietet der IEEE 802.11ac Standard sogar zwei 160 MHz Kanäle. Einerseits ermöglichen diese Kanäle natürlich einen sehr hohen Datendurchsatz. Andererseits gibt es in einem herkömmlichen Produktionsnetz viele WLAN-Nutzer, wie Logistiksysteme, Visualisierungssysteme und Mitarbeiterrechner, die bereits WLAN Kanäle in Anspruch nehmen. Sehr breite Frequenzkanäle würden daher zu viel Bandbreite einnehmen. Daher sind 160 MHz Kanäle schwierig umzusetzen, da ein solcher Kanal 50% des gesamten 5 GHz Spektrums einnehmen würde. [TEK13]

Schon realistischer wäre ein 80 MHz Kanal im 5 GHz Band. Allerdings ist hier noch anzumerken, dass sich einige Kanäle im Bereich des Weterradars befinden. Sollte der Access Point ein Weterradarsignal messen, ist er gezwungen, diesen Kanal für WLAN abzuschalten (graue Felder in Abbildung 27). Dementsprechend würden 25% der 80 MHz Kanäle wegfallen, wenn der Access Point ein Weterradarsignal registriert. Ergo müsste sich ein 80 MHz Kanal nun ein Drittel der gesamten verfügbaren Bandbreite im 5 GHz Band mit anderen Teilnehmern teilen. [TEK13]

Demgegenüber wäre die Nutzung der 40 MHz Kanäle ressourcenschonender, da man im besten Fall etwa 10 % und im Fall des Weterradars 15% der gesamten verfügbaren Bandbreite nutzen würde. Insbesondere bei einer äquidistanten Aufstellung der Access Points in einer Produktionshalle, würde ein Access Point unmittelbar acht weitere Access Points in seiner Umgebung sehen (vgl. Abbildung 28).



**Abbildung 28:** Aufteilung der Access Points in einer Produktionshalle

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass sich somit neun Access das gesamte 5 GHz Band teilen und somit für jeden Access Point 40 MHz zur Verfügung stehen. Dementsprechend sind 40 MHz Kanäle ein sehr guter Kompromiss zwischen maximaler Datenrate und einer überlappungsfreien Bandbreitenverteilung in einer Produktionshalle.

#### 4.3.2 Modulationsverfahren

Zur möglichst verlustfreien Übertragen von viele Informationen über einen Übertragungsweg ist die Signalübertragung ein wichtiges Anwendungsfeld in der Nachrichtentechnik. Um eine optimale Signalübertragung zu erreichen, werden Modulationsverfahren eingesetzt. Sie verwandeln Informationen und Daten in elektrische Signale, sodass Sender und Empfänger kommunizieren können. Bei einem einfachen Signal existieren der An- und Aus- Zustand. Dieser binäre Zustand kann mit Modulationsverfahren weiter ausgebaut werden. So ist es möglich durch Veränderung der Amplitude, Phase und Frequenz viel mehr Zustände zu erreichen. [TEK13]

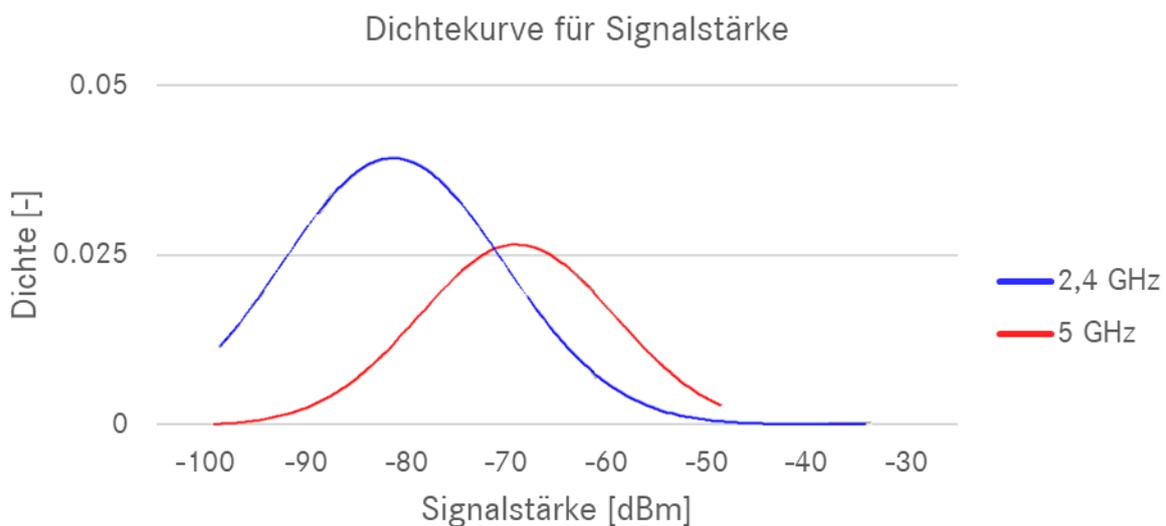
Im IEEE 802.11n Standard kann eine Modulation bis zu 64 Zustände erreichen. Die Bezeichnung lautet 64-QAM, da die Quadratur-Amplituden-Modulation das entsprechende Verfahren darstellt und 6 bit die maximale Anzahl von Zuständen in dieser Modulation beschreibt. Im neueren IEEE 802.11ac ist sogar eine Modulation von 256 Zuständen bei 5 GHz mittels 256-QAM möglich. Durch eine höhere Modulation kann ergo theoretisch auch eine höhere Datenrate erreicht werden (vgl. Tabelle 1). [NAT14]

Um nun das zu erwartende Modulationsverfahren in der Produktion zu ermitteln, müssen noch weitere Einflüsse aus der Umgebung betrachtet werden. Je mehr Zustände

verwendet werden, desto schwieriger ist die Auflösung der Zustände. Wie eingangs in den Rahmenbedingungen erwähnt, haben Hindernisse wie Wände und Blechteile in der Produktion einen großen Einfluss auf das Modulationsverfahren und ebenso auf die Datenrate. Ein guter Indikator für das eingesetzte Modulationsverfahren ist die Signalstärke, die einen Leistungspegel  $L_P$  in Relation des empfangenen Signals zu einer Bezugsleistung  $P_0$  setzt. Beträgt die Bezugsleistung 1 mW, wird der Leistungspegel in der Einheit dBm angegeben. [BAE13]

$$L_P = 10 \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) \text{ dB} \quad (2)$$

Je größer der Leistungspegel ist, desto qualitativ besser ist das Signal und mehr Daten können über ein besseres Modulationsverfahren übertragen werden. Um dies in der Produktionsinfrastruktur zu bewerten, wird nun der Leistungspegel in einer produktionsstechnischen Umgebung bei dem WLAN Standard IEEE 802.11n im 2,4 GHz Band und nach dem Standard 802.11ac im 5 GHz Band ermittelt. Es ergibt sich folgendes Dichtediagramm.



**Abbildung 29:** Verteilung der gemessenen Signalstärke im 2,4 und 5 GHz Band

Der Durchschnitt der Signalstärke der siebenstündigen Messung in der Produktionsinfrastruktur liegt im 5 GHz Band bei - 66,29 dBm. Im 2,4 GHz Band liegt der Durchschnitt der gemessenen Signalstärke bei - 76,0 dBm und ist somit deutlich geringer als beim 5 GHz Band.

Vergleicht man dies nun mit der vom IEEE 802.11 Standard veröffentlichten Modulationstabelle (vgl. Tabelle 1) bei 20 MHz Bandbreite im 2,4 GHz Band und 40 MHz Bandbreite im 5 GHz Band, ist zu erkennen, dass das im 2,4 GHz Band etablierte 64-QAM 5/6 Verfahren kaum in der Produktionsinfrastruktur zu erreichen ist. Bei der zuvor dargestellten gemessenen durchschnittlichen Signalstärke von -76 dBm wird im Schnitt nur das Quadraturphasenumtastung (QPSK) 3/4 Modulationsverfahren erreicht. [NAT14]

**Tabelle 1:** Signalstärke und Datenrate bei Modulationsverfahren nach IEEE 802.11 [NAT14]

Modulationsverfahren	2,4 GHz 802.11n		5 GHz 802.11ac	
	20 MHz Bandbreite		40 MHz Bandbreite	
	Signalstärke [dBm]		Signalstärke [dBm]	
BPSK 1/2	-82		-79	
QPSK 1/2	-79		-76	
QPSK 3/4	Mögliches Modulationsverfahren aufgrund Signalstärke	-77	-74	
16-QAM 1/2		-74	-71	
16-QAM 3/4		-70	-67	
64-QAM 2/3	 Höhere Datenrate	-66	-63	
64-QAM 3/4		-65	-62	
64-QAM 5/6		-64	-61	
256-QAM 3/4		N/A	-56	
256-QAM 5/6		N/A	-54	

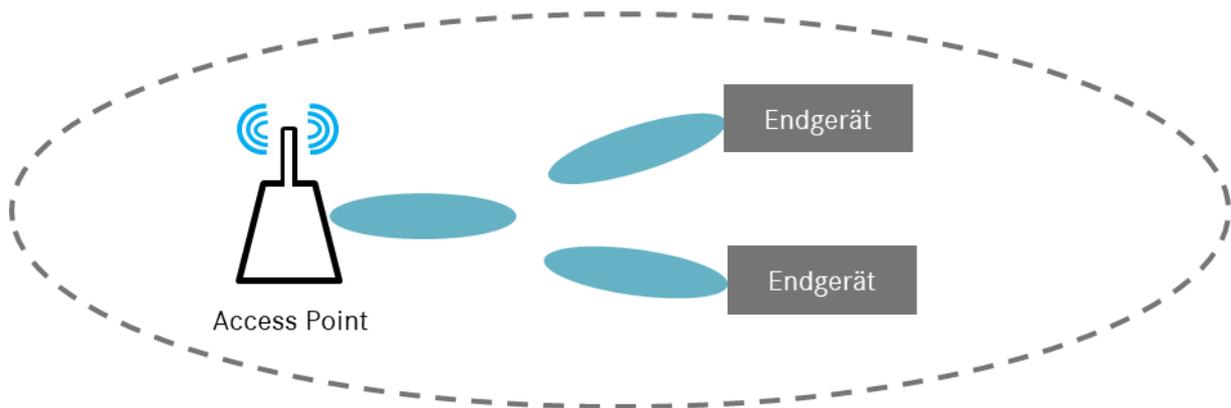
Auch beim 5 GHz Band ist zu erkennen, dass dort bei einer durchschnittlichen Signalstärke von -66,29 dBm das Modulationsverfahren 256-QAM mit der höchsten Datenrate in den wenigsten Fällen erreicht wird. Es ist stattdessen zu erwarten, dass das 16-QAM 3/4 Verfahren in der Produktionsinfrastruktur überwiegend angewendet wird.

Zusammengefasst sind die Umgebungsbedingungen in der Produktion nicht zu vernachlässigen, sodass sich bedingt durch das schlechtere Modulationsverfahren auch eine geringere maximal erreichbare Datenrate ergibt. Zwar bietet der neuere Standard 802.11ac im 5 GHz Band bessere Modulationsverfahren. Diese können aber auf Grund der schlechten Signalstärke im Produktionsnetz nicht erreicht werden. Tatsächlich sind die Modulationsverfahren im 2,4 GHz Band bei 20 MHz Bandbreite unter Produktionsbedingungen nahezu gleich wie im 5 GHz Band bei 40 MHz Bandbreite. Auch neue Modulationsverfahren wie 1024-QAM im zukünftigen 802.11ax Standard können überwiegend bedingt durch die niedrige Signalstärke im produktionstechnischen Bereich nicht erreicht werden [KOM20]. Allerdings sind dies nur die maximal erreichbaren Modulationsverfahren. Ein weiterer Leistungsparameter für die Datenrate ist die Anzahl der gleichzeitigen Datenströme.

### 4.3.3 Anzahl der gleichzeitigen Datenströme

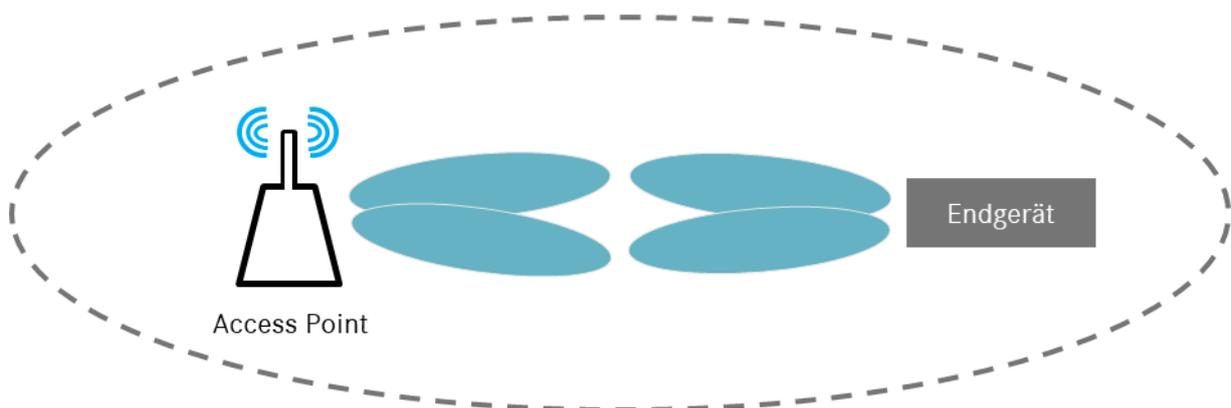
Neben einem besseren Modulationsverfahren können auch die Datenströme in einem Kanal mehrfach erfolgen, um den Datendurchsatz zu vergrößern. Die Verfahren dazu werden im Folgenden vorgestellt und auf eine Produktionsinfrastruktur bezogen. Zunächst wird auf das einfachste Verfahren eingegangen.

Ein einfacher Datenstrom wird durch das Single Input und Single Output (SISO) Verfahren dargestellt. Der Access Point sowie die Endgeräte kommunizieren über einen Datenstrom miteinander. Dementsprechend wird die Datenrate durch die Anzahl der Endgeräte geteilt.



**Abbildung 30:** Schematische Darstellung von SISO – Single Input, Single Output [AHM15]

Demgegenüber steht das Multiple Input und Multiple Output (MIMO) Verfahren. Das in Abbildung 31 dargestellte Prinzip verwendet anstatt einer Antenne pro Basisstation und Endgerät mehrere baugleiche Antennen.



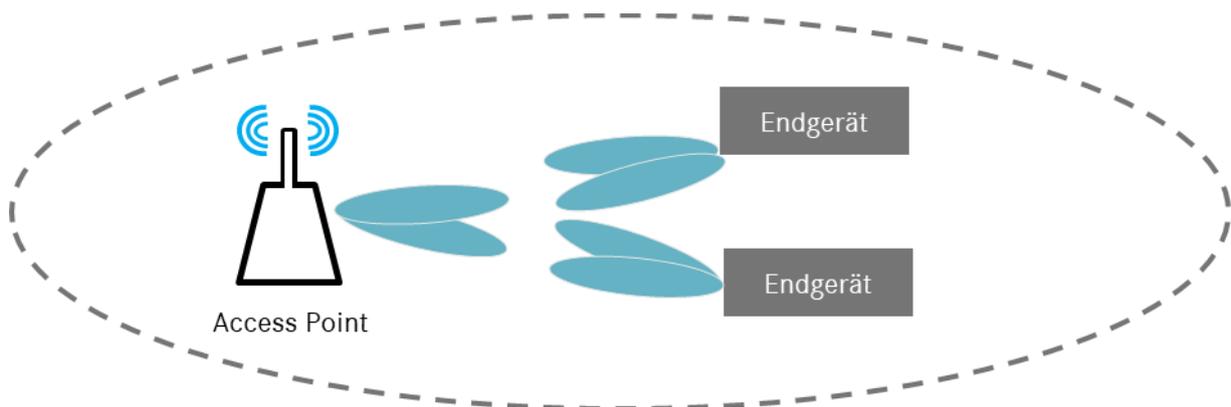
**Abbildung 31:** Schematische Darstellung von MIMO – Multiple Input, Multiple Output (mehrere Antennen, zwischen einer Basisstation und einem Endgerät) [AHM15]

Durch diesen Aufbau kann das gesamte System noch die räumliche Information als zusätzliche Dimension nutzen. Durch den räumlichen Versatz der Senderantennen können Funksignale gezielt in unterschiedliche Richtungen gesendet und auch durch

räumlich getrennte Empfangsantennen empfangen werden. Mittels der „Spatial Signature“ kann dann eine intelligente Datenverarbeitung auf der Empfängerseite wieder genau auf die Quelle zurückschließen. Dies ermöglicht theoretisch eine beliebig hochskalierbare Datenrate, indem die Anzahl der Antennen vergrößert wird. In der Praxis können bisher nur acht Antennen auf der Sender- und Empfangsseite eingesetzt werden. Das System nennt man dann 8x8 MIMO. [AHM15]

Das MIMO Verfahren kann somit mehrere Datenströme gleichzeitig in einem Kanal abbilden und somit die Datenrate zwischen Access Point und Endgeräte erhöhen. Es bleibt aber weiterhin der Bezug zwischen dem Access Point und einem Endgerät.

Die letzte Darstellung zeigt das Multi User Multiple Input und Multiple Output (MU-MIMO) Verfahren. Es ist eine Erweiterung des MIMO Verfahrens und ermöglicht dem Access Point, auf mehreren Antennen unterschiedliche Datenströme an unterschiedliche Endgeräte zu senden. Somit hebt es den Bezug zwischen dem Access Point und einem Endgerät auf. Leider ist es im aktuellen IEEE 802.11ac Standard nur für den Download spezifiziert und wird erst im IEEE 802.11ax für den Upload erscheinen. Zudem wird es in hindernisreichen Räumen nicht unterstützt, da es sehr störanfällig ist. [AHM15]



**Abbildung 32:** Schematische Darstellung von MU-MIMO Multi User Multiple Input, Multiple Output (mehrere Antennen, zwischen einer Basisstation und mehreren Endgeräten) [AHM15]

Daher ist davon auszugehen, dass das MU-MIMO Verfahren auf Grund seinen hohen Anforderungen an die unterbrechungsfreie Umgebung nicht in einer Produktionsumgebung eingesetzt werden kann. Folglich wird das MIMO Verfahren die höchste Datenrate in der Produktion erreichen, da zudem beim MU-MIMO alle Endgeräte in der Produktion umgestellt werden müssten und dies bedingt durch die Diversität der Endgeräte schwierig umsetzbar ist. Dementsprechend wird die Datenübertragung über einen einfachen Datenstrom (SISO Verfahren) und über das MIMO Verfahren in der anschließenden Validierung ferner untersucht. [AHM15]

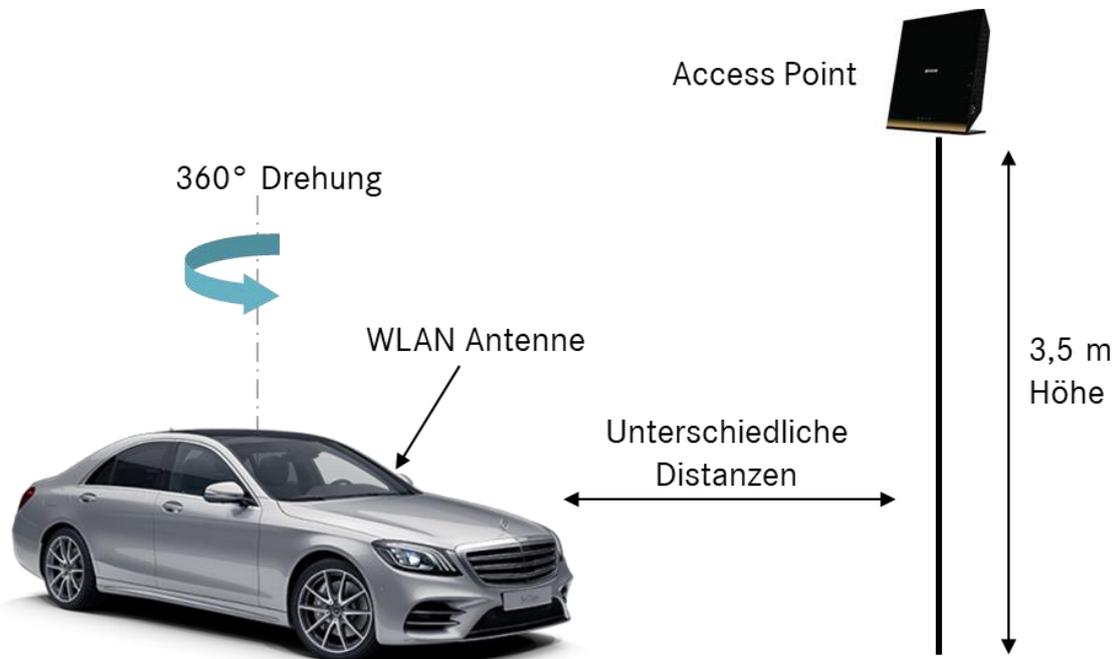
## 4.4 Validierung der Datenrate

Im vorherigen Kapitel wurden unterschiedliche Leistungsparameter für eine maximale Datenrate für das 2,4 GHz und das 5 GHz Band von WLAN in der Produktion identifiziert. Um nun die tatsächliche Datenrate zu ermitteln, müssen die Leistungsparameter angewendet werden. Eine Fahrzeugantenne kann allerdings derzeit nicht flächendeckend erprobt werden, da sie derzeit in der Produktion nicht zur Verfügung steht. Daher wird die Datenrate in einer produktionstechnischen Umgebung mit zwei Versuchen an einer modernen WLAN Fahrzeugantenne validiert. So lässt sich ermitteln, welche Datenrate bei den unterschiedlichen Leistungsparametern tatsächlich fahrzeugseitig erreicht werden kann. In einem ersten Versuch wird dazu die Richtungsabhängigkeit des Fahrzeugs zum Access Point untersucht. Je nachdem wie das Fahrzeug zum Access Point gedreht steht, können in der Realität unterschiedliche Datenraten auftreten. Auf diesen Messergebnissen aufbauend, zeigt der anschließende Versuch die Datenrate in Abhängigkeit der Distanz zwischen Access Point und Fahrzeug, sodass zum Schluss die tatsächlichen Datenraten bei verschiedenen Leistungsparametern gegenübergestellt werden können.

### 4.4.1 Richtungsabhängigkeit des Fahrzeugs

Um zunächst die Richtungsabhängigkeit der WLAN-Antenne im Fahrzeug zu untersuchen, wird der Access Point Netgear R6300v2 mit einem iPerf-Server ausgestattet. Dieser iPerf –Server kann im Zusammenspiel mit einem Fahrzeugerprobungscomputer auf der Fahrzeugseite den Datenverkehr künstlich erzeugen und diesen Datenverkehr in Richtung des Fahrzeugs messen. Dieser Erprobungscomputer basiert auf der im Fahrzeug verwendeten Vernetzungsarchitektur und ist ebenso kompatibel mit den Fahrzeugantennen für WLAN. Für den Versuch wird dieser Erprobungscomputer an die linke interne Fahrzeugantenne einer Mercedes Benz S-Klasse von 2019 angeschlossen. Da das Fahrzeug überwiegend symmetrisch ist, kann ebenfalls auf die gleichen Eigenschaften der Antenne auf der rechten Seite geschlossen werden.

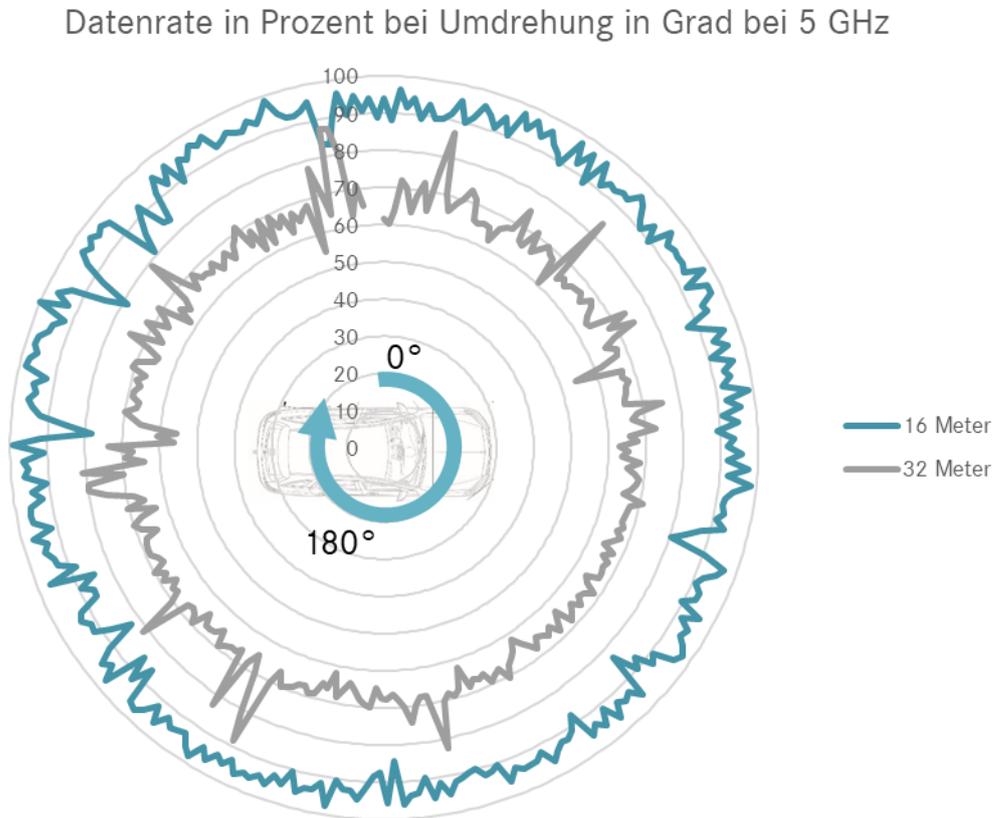
Der Access Point wird an einem beweglichen Stativ in einer Höhe von 3,5 Metern angebracht. Ferner wird die Distanz vom Access Point zum Fahrzeug zwischen 16 m und 32 m variiert. Diese Distanzen, wie bereits im Kapitel „Randbedingungen in der Montage“ genannt, spiegeln eine übliche Distanz zwischen einem Endgerät und einem Accesspoint in der Produktion wider.



**Abbildung 33:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [DAI17b]

Zur Messung der Richtungsabhängigkeit des WLAN Signals, wird das Fahrzeug während des Versuchs um 360° gedreht. Eine spezielle Drehplattform, auf der das Fahrzeug steht, nimmt dabei stetig die Gradzahl der Rotation auf. Eine Umdrehung dauert im Durchschnitt vier Minuten. Für den Versuch wird der Datenverkehr so eingerichtet, dass Pakete von dem Accesspoint zum Erprobungscomputer im Fahrzeug gesendet werden. Für diesen Versuch werden das Frequenzband 2,4 GHz sowie 5 GHz vermessen.

Die aufgezeichneten Datenraten sind in der folgenden Abbildung für das 5 GHz Frequenzband bei den zwei unterschiedlichen Distanzen dargestellt. Die Datenrate ist dabei in prozentualer Abhängigkeit von der maximalen gemessenen Datenrate bei 16 Metern für eine bessere Vergleichbarkeit dargestellt.

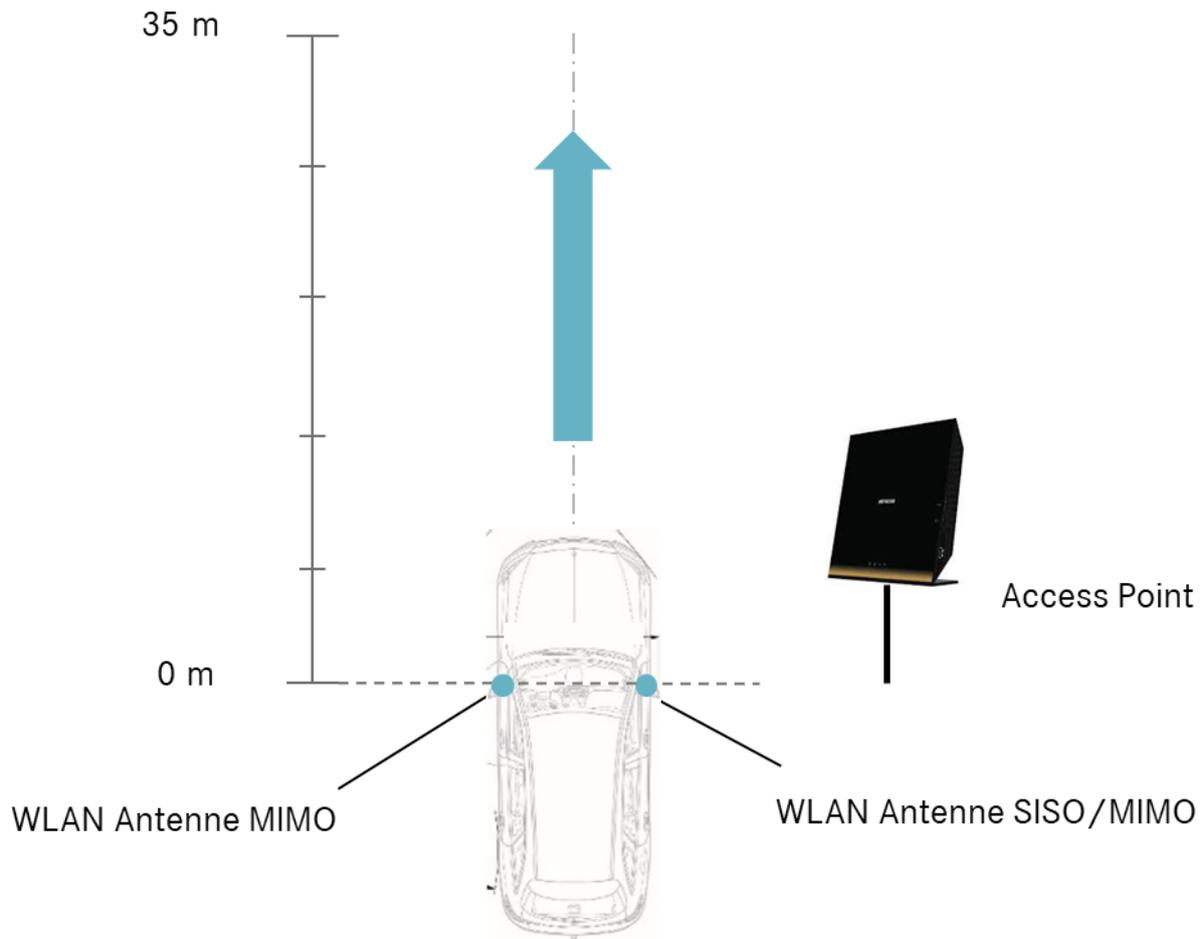


**Abbildung 34:** Messtechnische Untersuchung bei 360°-Messung im 5 GHz Band

Aus der Messung mit zwei verschiedenen Abständen im WLAN 5 GHz Band geht hervor, dass nur vereinzelte kurze Ausreißer der Datenrate vorzufinden sind. Allerdings sind diese Ausreißer mit einem zu geringen Ausschlag behaftet, sodass man ihnen keine große Bedeutung zurechnen kann. Auch die Abtastrate des Messsystems liegt in einem angemessenen Bereich von einer Sekunde pro Grad. Dementsprechend ist es unkritisch, in welchem Winkel das Fahrzeug zum Access Point positioniert ist. Mit dieser Erkenntnis wird nun der Abstand zwischen Access Point und Fahrzeug näher untersucht.

#### 4.4.2 Abstandsabhängigkeit des Fahrzeugs

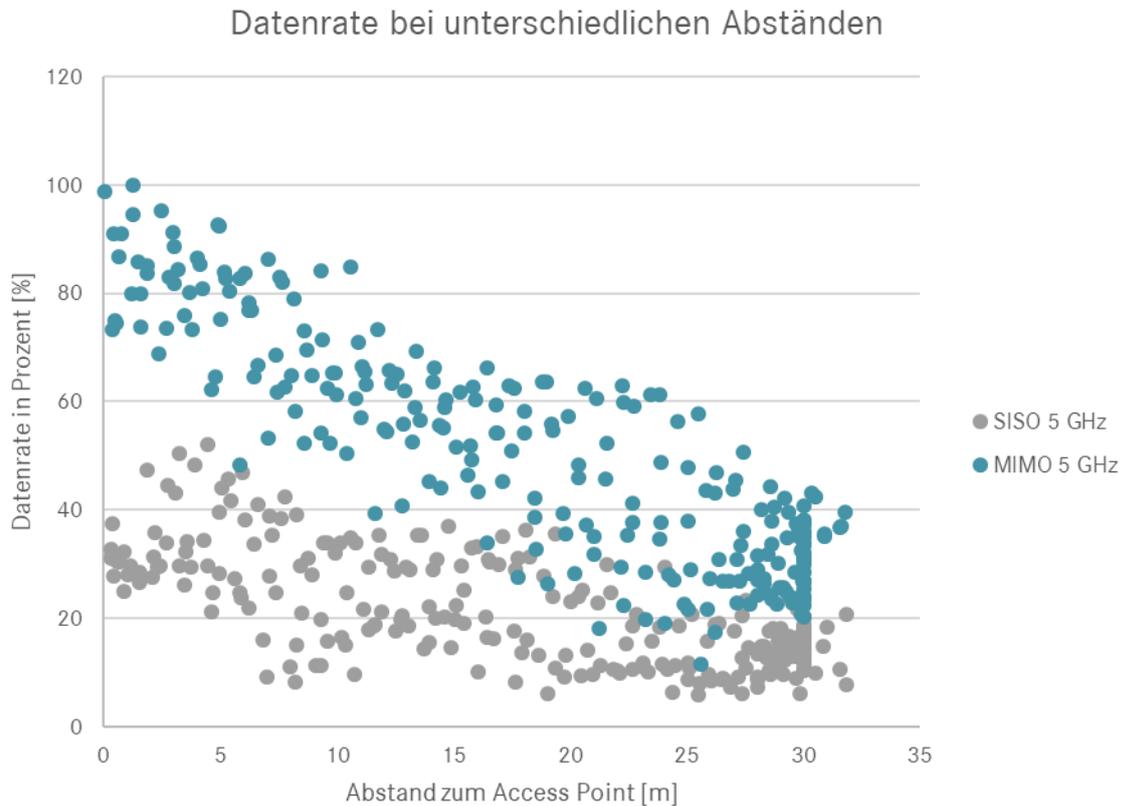
Bei der Messung der Datenrate in Abhängigkeit zum Abstand zwischen Fahrzeug und Access Point wird ein neuer Messaufbau gewählt. Unter Verwendung des Erprobungscomputers und der WLAN Antennen im gleichen Fahrzeug sowie des gleichen Access Points, wird das Fahrzeug 35 Meter vom Access Point wegbewegt. Auch diese Distanzen orientieren sich am üblichen Abstand zwischen Access Point und Endgerät in der Produktion. Eine genaue Versuchsbeschreibung befindet sich in Abbildung 35.



**Abbildung 35:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [DAI17b]

Die Messung der Datenrate erfolgt ebenso über das iPerf Verfahren wie im vorherigen Versuch. Da nun von keiner Richtungsabhängigkeit auszugehen ist, hat die Änderung des Ausrichtungswinkels des Fahrzeugs zum Access Point kaum Einfluss auf die Datenrate. Da zudem eine weitestgehend Symmetrie im Fahrzeug vorzufinden ist, kann ebenfalls auch die gegenüberliegende Antenne verwendet und somit auch das MIMO Verfahren getestet werden.

Aus dem zuvor beschriebenen Kompromiss zwischen hoher Datenrate und überlappungsfreier Bandbreitenverteilung, ist eine Bandbreite von 40 MHz zu empfehlen. Die daraus resultierenden Datenraten sind in der Abbildung 36 entlang der Distanz zwischen Access Point und Fahrzeug jeweils für SISO und 2x2 MIMO im 5 GHz Band aufgezeigt. Auch hier ist für einen vereinfachten Vergleich die gemessene Datenrate auf die maximale gemessene Datenrate vom MIMO Verfahren prozentual normiert.



**Abbildung 36:** Messtechnische Untersuchung bei Abstandsmessung im 5 GHz Band

In dem Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass das MIMO Verfahren bei kleineren Distanzen doppelt so hohe Datenraten wie das SISO Verfahren aufweist. Jedoch nimmt die Datenrate von MIMO mit zunehmenden Abstand deutlich ab und nähert sich dem Niveau von SISO ab 25 Metern. Die Datenrate des SISO Verfahrens ändert sich nur geringfügig bei zunehmenden Abstand. Mit diesem Wissen lassen sich nun die Leistungsparameter vergleichen.

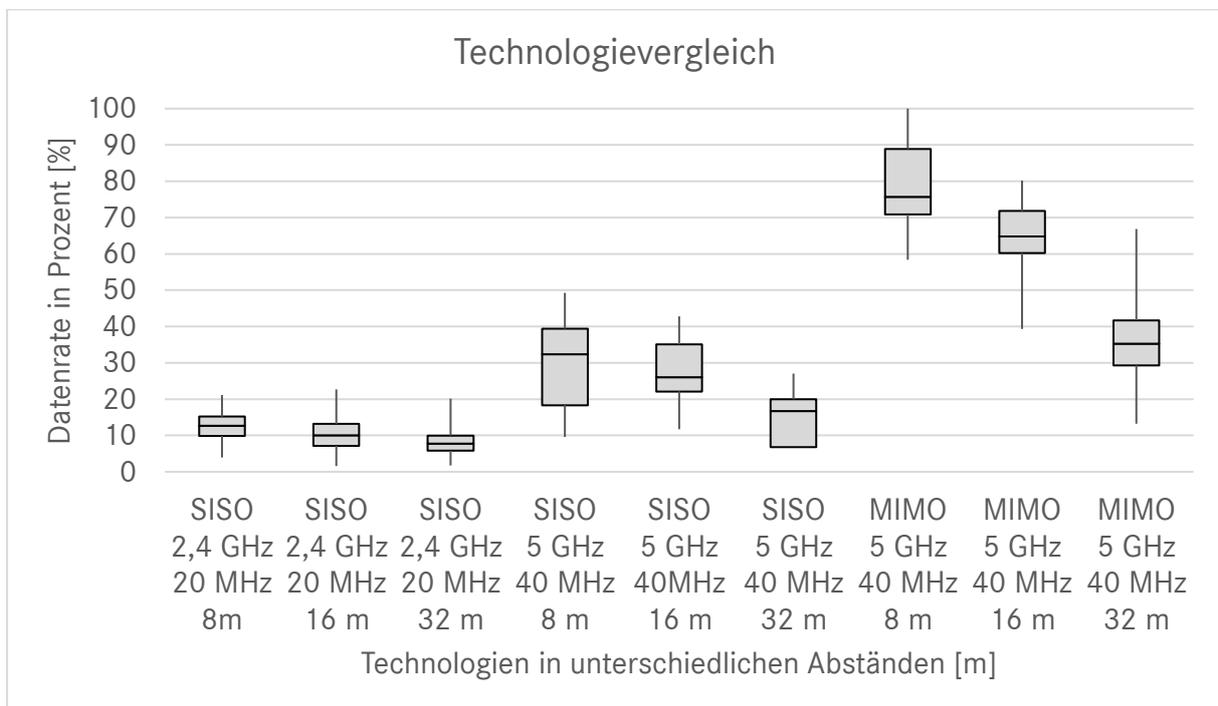
#### 4.4.3 Vergleich der Leistungsparameter

Die im vorherigen Kapitel genannten Leistungsparameter Kanalbreite, Anzahl der Datenströme und Modulationsverfahren für eine hohe Datenrate werden nun gezielt mit der dazu gemessenen Datenrate verglichen. Bezüglich der Kanalbreite wird bedingt durch das kleinere 2,4 GHz Band eine Bandbreite von 20 MHz und im größeren 5 GHz Band eine Bandbreite von 40 MHz angenommen. Die 40 MHz Bandbreite hat sich als optimaler Kompromiss zwischen einer hohen Datenrate und einer überlappungsfreien Bandbreitenverteilung in einer Produktionshalle herausgestellt.

Des Weiteren wird zwischen einem einfachen Datenstrom im SISO Verfahren und einem mehrfachen Datenstrom im MIMO Verfahren zwischen Endgerät und Access Point unterschieden. Dazu wird das SISO Verfahren für das 2,4 GHz Band und das 5 GHz Band angewendet. Das MIMO Verfahren kommt bei dieser Messung im 5 GHz Band zum Einsatz.

Da in Bezug auf die Modulationsverfahren in einer produktionstechnischen Umgebung nicht das beste Verfahren erreicht werden kann, wird in der Messung der Abstand zwischen Endgerät und Access Point variiert, sodass sich mit zunehmender Entfernung das Modulationsverfahren verschlechtert und somit die Datenrate reduziert wird.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung gezeigt. Sie stehen in prozentualer Abhängigkeit zu der höchsten gemessenen Datenrate.



**Abbildung 37:** Vergleich der Datenrate bei unterschiedlichen Leistungsparametern

Aus den beobachteten Messwerten in Abbildung 37 lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten. Die Datenrate beim SISO Verfahren im 2,4 GHz Band ist nur halb so groß wie die Datenrate im 5 GHz Band. Das liegt überwiegend an der doppelt so großen Bandbreite im 5 GHz Band. Zudem ist zu beobachten, dass im 2,4 GHz Band kleinere Veränderungen der Datenrate bei zunehmender Distanz als im 5 GHz Band vorzufinden sind. Wenn man allerdings zusätzlich noch MIMO aktiviert, ist bei kleinen Distanzen eine Verdreifachung der Datenrate gegenüber der SISO Messung im 5 GHz Band zu beobachten. Allerdings lässt die Datenrate bei größeren Distanzen stärker als bei SISO nach. Sie nähert sich bei größeren Distanzen dem SISO Niveau vom 5 GHz Band. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das MIMO Verfahren bei optimaler Verbindungsqualität wie bei kleinen Distanzen sehr gut arbeiten kann. Bei zunehmender Distanz nimmt allerdings die Verbindungsqualität ab und das MIMO Verfahren kann auf Grund seiner Komplexität nicht mehr funktionieren. Dann schaltet das Endgerät auf das SISO Verfahren mit der stärksten Antenne um. Mit diesen Beobachtungen sollen nun Rückschlüsse auf das Inbetriebnahmesystem im Rahmen der Zusammenfassung gezogen werden.

#### **4.5 Zusammenfassung des Kapitels**

Zusammenfassend können die folgenden Ergebnisse an das zukünftige Inbetriebnahmesystem aus Sicht der Vernetzung postuliert werden.

Maßgeblich durch die bereits vorhandene Infrastruktur und damit geringeren Kosten hat sich WLAN als Zieltechnologie etabliert. Grundlegend dafür ist die hohe Skalierbarkeit gegenüber dem Mobilfunk.

Im Vergleich zu dem Mobilfunk ist WLAN bereits mit seiner geringen Latenz aufgefallen. Aus der produktionsnahen Messung wurde für WLAN eine Antwortzeit von 12 ms als Durchschnittswert ermittelt. Ferner zeigt die Messung, dass 98% der Antwortzeiten unter 30 ms liegen. Für das zukünftige Inbetriebnahmesystem bedeutet dies, diesen Wert für die Echtzeitfähigkeit einzuhalten. Somit dürfen Reaktionszeiten über die WLAN-Verbindung bei der Auslegung des Systems die Größenordnung von 30 ms nicht überschreiten.

Im Hinblick auf die Datenrate für das Inbetriebnahmesystem wurde in diesem Kapitel untersucht, bei welchen Leistungsparametern sowohl in der Infrastruktur als auch im Fahrzeug die maximale Datenrate erreicht wird. Dabei wurde zunächst der technische Hintergrund auf die Produktionsinfrastruktur angewendet. Im 5 GHz Band hat sich eine Bandbreite von 40 MHz als bester Kompromiss zwischen einer hohen Datenrate und einer überlappungsfreien Bandbreitenverteilung in der Produktion erwiesen. Damit man ferner von der theoretischen Datenrate im Zusammenspiel mit den unterschiedlichen Leistungsparametern auf die tatsächliche Datenrate schließen kann, wurde die tatsächliche Datenrate anschließend messtechnisch untersucht. Die 360°-Messung zeigt dabei keine Richtungsabhängigkeit der WLAN Antennen im Fahrzeug. Im darauffolgenden Versuch mit unterschiedlichen Abständen hat sich herausgestellt, dass im

2,4 GHz Band geringere Datenraten als im 5 GHz Band auf Grund der kleineren zur Verfügung stehenden Bandbreiten zu erwarten sind. Darüber hinaus weist das MIMO Verfahren bei kleinen Abständen zum Access Point deutlich bessere Datenraten als beim SISO Verfahren auf. Dementsprechend wird für eine performante Datenrate die Kombination aus einer Bandbreite von 40 MHz im 5 GHz Band mit dem MIMO Verfahren empfohlen. Mit diesen Erkenntnissen wird im nächsten Kapitel das Inbetriebnahmesystem betrachtet.

## 5 Entwicklung des Inbetriebnahmesystems

Dieses Kapitel behandelt die Entwicklung eines neuen Inbetriebnahmesystems aus den zuvor abgeleiteten Erkenntnissen der drahtlosen Vernetzung in der Produktion. Das zukünftige Inbetriebnahmesystem soll mit modernen IT-Protokollen auf der Vernetzung aufbauen, sodass Anwendungen in einer neuartigen Prozesslandschaft im anschließenden Kapitel ermöglicht werden. Zunächst soll jedoch das aktuelle Inbetriebnahmesystem vorgestellt und daraus neue Möglichkeiten abgeleitet werden. Dazu werden im Anschluss zwei neue Ansätze aufgezeigt und diskutiert.

### 5.1 Aktuelles Inbetriebnahmesystem

Im Rahmen der ISO und der Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems (ASAM) wurden PC-basierte Inbetriebnahmesysteme für die Entwicklung, Produktion und die Werkstätten entwickelt. Es verdient seinen Treiber größtenteils aus der Standardisierung der Werkstattdiagnose. Durch gesetzliche Anforderungen und Einsparungen von Kosten sowie Erhöhung der Qualität seitens der Industrie war man gezwungen, einen Standard Anfang der 1980er einzuführen. Die erste Norm folgte im Jahr 1992 [ISO9141-1]. 1994 und 1998 wurde die Norm um die Definition der Diagnosedienste erweitert [ISO9141-2], [ISO9141-3]. Zwischen 2001 und 2004 folgte eine Erweiterung der Standardisierung um sieben Teile für eine abgasrelevante Diagnose in der ISO 15031 [ISO15031]. 2004 wurde der CAN Bus in die ISO 15765 übernommen [ISO15765] und 2013 wurde das Unified Diagnostics Service (UDS) Protokoll vollumfänglich bei allen Neufahrzeugen in der ISO 14229 anerkannt [ISO14229]. Seit 2013 veröffentlicht die Arbeitsgruppe mit dem Arbeitstitel „World Wide Harmonized Onboard Diagnostics“ der ISO stets neue Beiträge zur Harmonisierung der abgasrelevanten Diagnose und der erweiterten Diagnose.

Um nun im Rahmen der Inbetriebnahme die Funktionen Konfiguration, Einstellen und Prüfen (vgl. Stand der Technik) über die Diagnosekommunikation mit dem Fahrzeug durchzuführen, stellt das Inbetriebnahmesystem auf Basis der Client-Server-Architektur eine Anfrage an das in Betrieb zunehmende Steuergerät. Diese Diagnosekommunikation ist in dem bereits genannten Diagnoseprotokoll Unified Diagnostics Service beschrieben. Übliche Diagnosedienste für das Prüfen und Einstellen sind Identifikationsdienste, das Lesen von Daten und Messwerten sowie das Ansteuern von Ausgängen. [ISO15031]

Diagnosedienste für das Konfigurieren sind das Schreiben von Daten in das Steuergerät. Bei dem Updateprogrammieren werden bestimmte Softwarekomponenten wie Code-, Daten- und Bootmodule im Steuergerät überschrieben. Bei einem anschließenden Neustart des Steuergeräts können somit neue Anwendungen installiert werden.

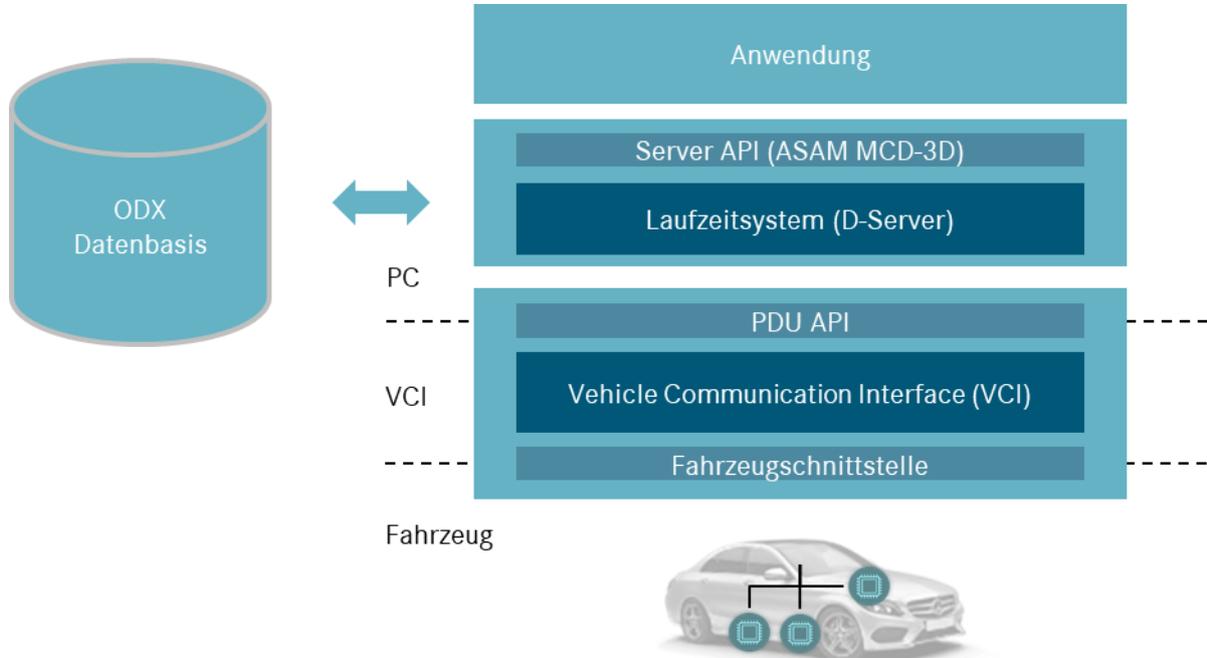
Neben dem Updateprogrammieren können bei dem Kodieren und Parametrieren auch gezielte Softwareschalter umgelegt werden. Dabei muss keine neue Anwendung installiert werden, sondern es müssen nur die folgenden Kodiertypen überschrieben werden. [REI14]

- Einzelbits (Boolesche Informationen)
- Bitfelder (Liste alternativer Konfigurationen)
- Parameter (Integer, Floating-Point)
- Kennfelder (zwei- oder mehrdimensional)

Die gleichen Diagnosedienste werden auch beim Einstellen der Steuergeräte verwendet, um messtechnisch gewonnene Werte in das Steuergerät zurückzuschreiben.

Wenn man mehrere Diagnosedienste hintereinander reiht, bildet man eine Inbetriebnahme Sequenz. Mit dem Aufruf solcher Sequenzen ist die Inbetriebnahmeanwendung in Abbildung 38 somit in der Lage, die drei Funktionen der Inbetriebnahme Konfigurieren, Einstellen und Prüfen in einem fahrzeugspezifischen Ablauf durchzuführen.

Dazu ist auch heute stets das Ziel, ein rein Daten-getriebenes Inbetriebnahmesystem mit standardisierten Schnittstellen zu ermöglichen. Die Inbetriebnahmeanwendung soll einen standardisierten Zugriff auf das Fahrzeug haben. Dieser Zugriff wird durch die ASAM-MCD-3D Schnittstelle in Abbildung 38 abgebildet und bietet zudem einen standardisierten, leseberechtigten Zugriff auf die Datenbasis der Inbetriebnahme. [TOL08]



**Abbildung 38:** Aufbau des heutigen Inbetriebnahmesystems [ISO22900-1], [ISO22901]

Die Datenbasis stellt die gesamte Inbetriebnahme eines Steuergeräts in dem standardisierten Datenformat Open Diagnostic Data Exchange (ODX) dar. Dies umfasst die Beschreibung der Diagnosefunktion, Ablaufsequenzen, Kodier- und Programmierdaten, Umrechnungs- und Darstellungsformen. [ISO22901]

Das danebenliegende Laufzeitsystem greift über die ASAM-MCD-2D Schnittstelle auf diese Datenbasis zu [ISO22900-3]. Ferner kommuniziert es über eine Softwareschnittstelle mit dem Fahrzeugzugang, welcher in der ISO 22900-2 MVCI-D-PDU-API beschrieben ist. [ISO22900-2]

Der Fahrzeugzugang, das sogenannte Vehicle Communication Interface (VCI), kommuniziert über das Onboard Diagnose Kabel (OBD) mit der darunterliegenden Bussystemschnittstelle im Fahrzeug. Die Schnittstelle ist in der Norm ISO 22900-1 definiert und ermöglicht durch die modulare Aufbauweise eine Unterstützung für unterschiedliche Busprotokolle. Somit ermöglichen das Laufzeitsystem sowie das VCI für die Inbetriebnahmeanwendung einen standardisierten Zugriff auf das Fahrzeug. [ISO22900-1]

Der Computer, samt Inbetriebnahmeanwendung und Laufzeitsystem, sowie das VCI werden zusammen als Inbetriebnahme-Testgerät bezeichnet. Dieses Inbetriebnahme-Testgerät entspricht im Wesentlichen einem industrietauglichen Computer. Es ist zudem mit kompletten PC-Funktionalitäten wie Farbdisplay, Folientastatur und WLAN-Netzwerkkarten sowie der Diagnose Kommunikations-Schnittstelle ausgestattet. Auf der Plattform eines Betriebssystems läuft dort die Inbetriebnahmeanwendung sowie das Inbetriebnahme Laufzeitsystem. Das Vehicle Communication Interface wird auf einem separaten Mikroprozessor meist im Gehäuse des Inbetriebnahme-Testgerät mitgeführt. [GRU19]

Darüber hinaus ist das Inbetriebnahme-Testgerät über eine WLAN-Verbindung mit dem Produktionsnetz verbunden. Über diese Verbindung tauscht es ferner folgende Arten der Daten aus:

- Steuerung
- Dokumentation
- Unterstützung
- Wartung

Zur Steuerung gehören im Grunde alle Daten, die das zu versorgende Fahrzeug beschreiben. Das heißt, hier werden alle Informationen, wie der fahrzeugspezifische Inbetriebnahmeablauf auszusehen hat, übermittelt. Im einfachen Fall ist es nur eine Beschreibung des Fahrzeugs. Aber auch Kodier- oder Programmierdaten gehören dazu. [GRU19]

Zu den Daten der Dokumentation gehören alle Prüfergebnisse sowie zusätzlichen Informationen, die die Analyse bei einem Fehleraufkommen vereinfachen. Diese werden üblicherweise nach jedem Inbetriebnahmeschritt von dem Inbetriebnahme-Testgerät an den zentralen Server versendet und dort gespeichert.

Weitere Verbindungsknoten stellen Produktionsanlagen oder Fernbedienungen am Band für unterstützende Prozesse dar. Die Produktionsanlagen können zum Beispiel eine Befüllanlage sein, die in Abstimmung mit dem Inbetriebnahme-Testgerät die Bremsflüssigkeit in das Bremssystem des Fahrzeugs einfüllt. Das Inbetriebnahme-Testgerät öffnet simultan die Bremsventile über einen Diagnosebefehl.

Ebenso bietet das Inbetriebnahme-Testgerät eine graphische Darstellung auf dem Farbdisplay für die Mitarbeiter am Band an. Diese Darstellung soll den Mitarbeitern Informationen über den laufenden Inbetriebnahmeprozess anzeigen und auch Eingaben ermöglichen, sodass die Mitarbeiter eine Rückmeldung geben können. Eine solche Rückmeldung kann beispielsweise eine erfolgreiche Sichtprüfung sein. Mit dem Inbetriebnahme-Testgerät gekoppelt Fernbedienungen werden hingegen dafür benötigt, dass die visuelle Darstellung auch bei Arbeiten außerhalb des Fahrzeugs angezeigt werden kann und die Mitarbeiter darüber Eingaben durchführen können. [GRU19]

Bei den Wartungsdaten handelt es sich um Eingriffe in das Computersystem des Inbetriebnahme-Testgeräts. Dies können zum einen Software Updates für die Inbetriebnahmeanwendung, für die Datenbasis oder für das Betriebssystem sein. Zum anderen kann es auch eine Analyse der Fehler in der Anwendung sein. Dazu schaltet sich der Entwickler auf das Inbetriebnahme-Testgerät und kann dieses mit speziellen Werkzeugen durchsuchen.

Zusammengefasst gehören zum heutigen Inbetriebnahmesystem viele Schnittstellen innerhalb der Wirkkette, aber auch nach außen zu anderen Teilnehmern. Einerseits sind die standardisierten Schnittstellen sehr gut dafür geeignet, Plattformen von verschiedenen Lieferanten zu verwenden. Andererseits sind diese vielen Schnittstellen auch fehleranfällig und müssen jederzeit aufeinander abgestimmt werden. Besonders im Hinblick auf die rasante Weiterentwicklung des Fahrzeugs ist ein solches System mit viel Aufwand verbunden. Neue Fahrzeuggenerationen werden immer intelligenter und vernetzter. Dies bringt auch eine immer komplexere Inbetriebnahme mit sich, die darüber hinaus schnell auf Änderungen reagieren muss. Für die Produktion heißt das, dass noch mehr Daten auf jedes einzelne Inbetriebnahme-Testgerät übertragen werden müssen.

Insbesondere bei der steigenden Anzahl der Funktionalitäten im Fahrzeug und durch den Trend der späten Variantenbildung steigt auch der Umfang und Datenaustausch in der Inbetriebnahme. Daher wird die ständige Erreichbarkeit des Fahrzeugs während der Produktion immer wichtiger.

## 5.2 Impulse für ein neuartiges Inbetriebnahmesystem

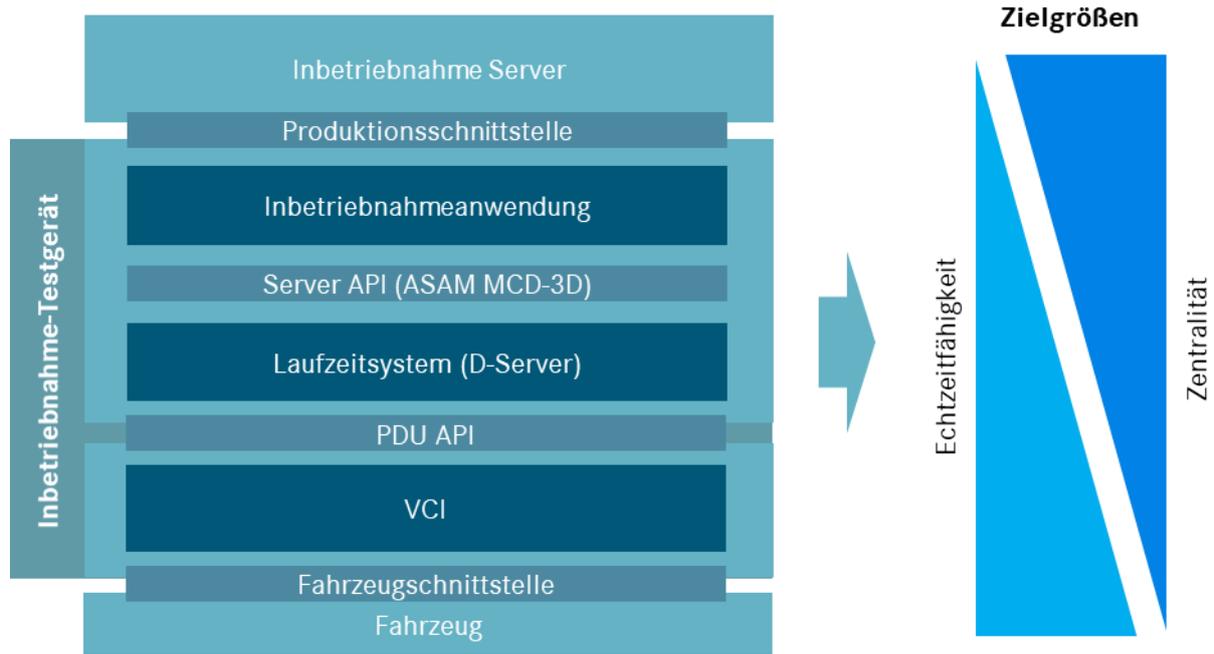
Bei der Auslegung eines neuen Inbetriebnahmesystems ist der Wegfall des Inbetriebnahme-Testgeräts ein wichtiges Ziel, denn damit kann eine höhere Flexibilität bei geringeren Kosten erreicht werden. Allerdings muss dafür das heutige Inbetriebnahmesystem auf das Fahrzeug und hinter der Produktionsschnittstelle neu verteilt werden.

Zwei wichtige gegenläufige Zielgrößen hierbei sind die Zentralität und die Echtzeitfähigkeit des Inbetriebnahmesystems. Unter der Zentralität versteht man die Zusammenführung der Steuerung aller Inbetriebnahmen in einer Inbetriebnahmeanwendung außerhalb des Fahrzeugs. Der Vorteil liegt in dem vollumfänglichen Wissen des Systemzustandes, da alle Informationen über die Inbetriebnahme in einer zentralen Stelle zusammenfließen.

Unter der Echtzeitfähigkeit versteht man die Kommunikationszeit zwischen den Steuergeräten und dem Inbetriebnahme-Testgerät. Dauert die Kommunikation zu lange, können bestimmte Inbetriebnahmeschritte nicht ausgeführt werden. So müssen sicherheitsrelevante Inhalte innerhalb weniger Millisekunden übertragen werden. Wird ein gewisses Timeout überschritten, geht das System automatisch von einer negativen Antwort aus. Lange Timeouts passieren insbesondere, wenn drahtlose Verbindungsprobleme wie Funkhindernisse oder ein Wechsel des Access Points auftreten. Da dies nicht immer zu vermeiden ist, ist eine Lösung, die diese Herausforderung adressiert, maßgeblich für die Entwicklung des zukünftigen Inbetriebnahmesystems.

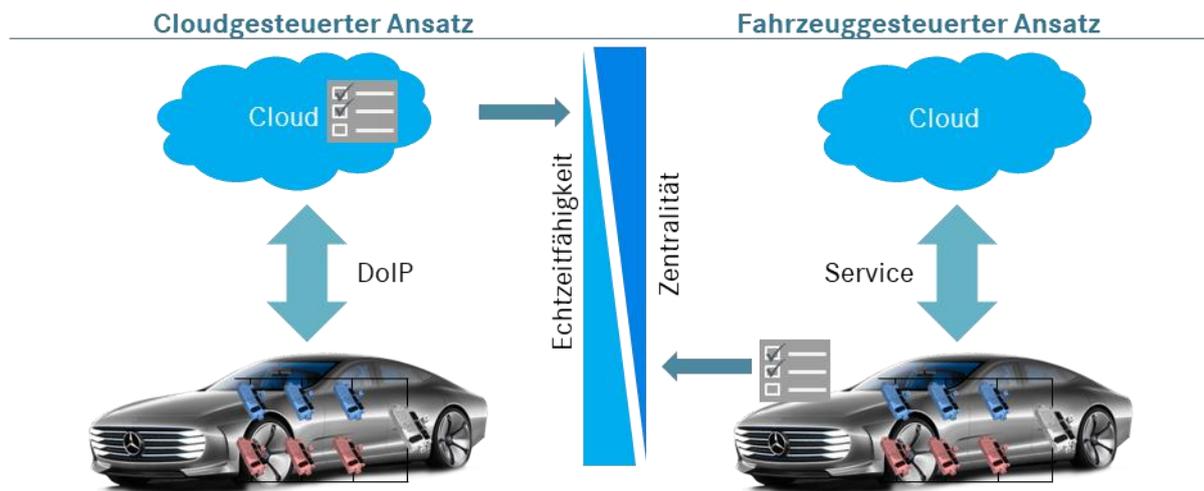
Betrachtet man diese beiden Zielgrößen in der Topologie des aktuellen Inbetriebnahmesystems in Abbildung 39, ist zu erkennen, dass die Echtzeitfähigkeit kleiner wird, je näher man mit den Anwendungen an den Inbetriebnahme Server kommt. Die Inbetriebnahmeanwendung durchläuft nämlich einen Inbetriebnahmeablauf, der stets auf dem aktuellen Stand gehalten werden muss. Dies liegt an der fortlaufenden Aktualisierung der Datenbank. Sie ist daher zentral gesteuert, hat aber wenig echtzeitkritische Anforderungen.

Das Vehicle Communication Interface (VCI) ist dagegen deutlich einfacher gehalten, da es die Nachrichten aus dem Laufzeitsystem lediglich auf den Fahrzeugbus bringt und die Antworten des Steuergeräts zurückschickt. Es muss schnelle und verlässliche Antwortzeiten zum Fahrzeug liefern, um ohne Verzögerung mit den Steuergeräten zu kommunizieren.



**Abbildung 39:** Zielgrößen im Inbetriebnahmesystem

Daher ist zu erkennen, dass die beiden Zielgrößen Echtzeitfähigkeit und Zentralität gegenläufig sind. Würde hingegen die Zielgröße Echtzeitfähigkeit vollständig minimiert, wäre das Inbetriebnahmesystem gänzlich in einer Art Cloudlösung außerhalb des Fahrzeugs. Bei dem im Rahmen der Arbeit definierten cloudgesteuerten Inbetriebnahmesystem steckt die gesamte Intelligenz des Systems in einer zentralen Cloudplattform in der Produktion und so wenig wie möglich im Fahrzeug. Das heißt auch, dass die Inbetriebnahmeabläufe aus der Cloud und damit in direkter Kommunikation mit dem Fahrzeug ausgeführt werden. Im Fahrzeug existiert lediglich ein Gateway, welches die jeweiligen Anfragen der Cloud an die Steuergeräte weiterleitet sowie die Kommunikationssicherheit gewährleistet.



**Abbildung 40:** Vergleich der Ansätze zwischen dem cloudgesteuerten und fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystem [DAI15b]

Würde man ein System mit höherer Echtzeitfähigkeit umsetzen, so wäre das Inbetriebnahmesystem vollständig im Fahrzeug. Wie im Stand der Technik beschrieben, wird es in zukünftigen Fahrzeugarchitekturen ein Zentralsteuergerät geben. Bei einem fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystem erhält dieses Zentralsteuergerät die Umfänge der Inbetriebnahme, sodass es unabhängig von der Cloud bestimmte Inbetriebnahmeschritte in Kommunikation mit den Steuergeräten durchführen kann. Die Cloud übernimmt weiterhin die Koordinierung des gesamten Systems, allerdings verlagert dieses System, anders als das cloudgesteuerte System, seine Rechenkapazitäten dezentral in das Fahrzeug. Somit verringert dieses System stark das zu übertragende Datenvolumen und damit den Datenaustausch. Folglich werden die Echtzeitanforderungen hervorragend erfüllt, da die Abarbeitung der Inbetriebnahme direkt im Fahrzeug stattfindet. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Stabilität des Systems aus. Demgegenüber stehen allerdings höhere Anforderungen an das Zentralsteuergerät im Fahrzeug. Es muss neben der höheren Rechenkapazität auch ständig mit den neusten Inbetriebnahmeabläufen versorgt werden. Dies schafft nachteilig eine große Abhängigkeit des Fahrzeugs von der Produktion.

Im nachfolgenden Teil wird verstärkt auf die beiden Ansätze sowie ihre Umsetzung eingegangen. Anschließend werden sie validiert und gemeinsam in die Prozessgestaltung überführt.

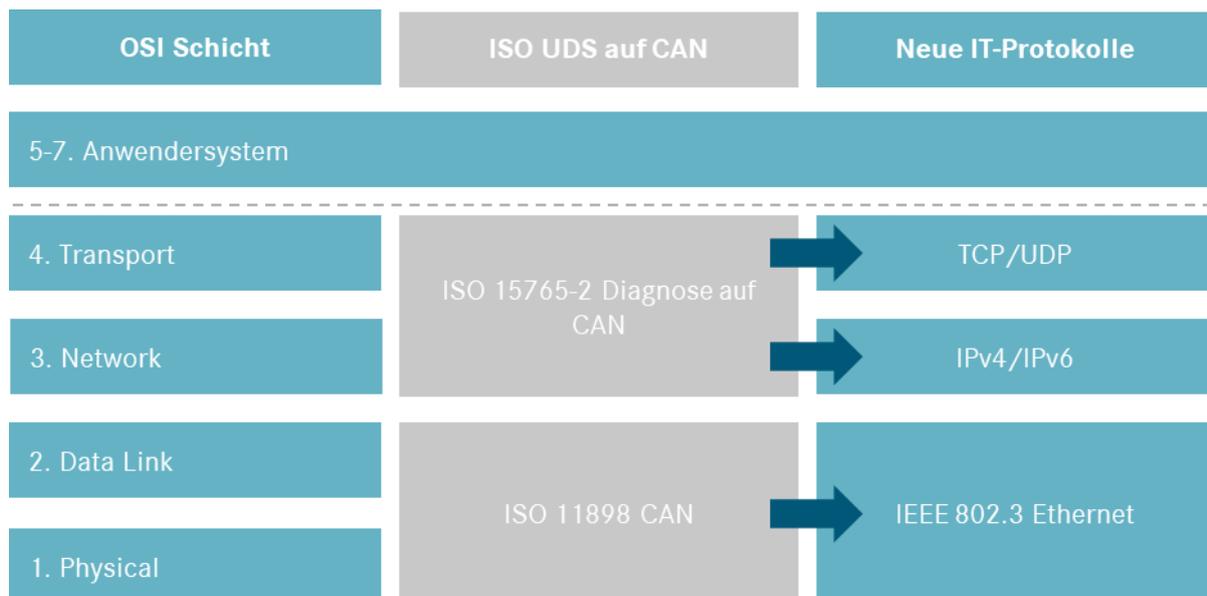
### 5.3 Cloudgesteuerter Ansatz

Für einen cloudgesteuerten Ansatz der Inbetriebnahme hat ein performanter Fahrzeugzugang für die Datenübertragung einen großen Stellenwert. Dadurch hat die Cloud die maximalen Möglichkeiten über die Steuerung der Inbetriebnahme. Dies wird besonders durch den Einzug der Ethernet-Technologie in das Fahrzeug ermöglicht. Demensprechend wird im folgenden Teil stärker auf das Automotive Ethernet eingegangen.

#### 5.3.1 Automotive Ethernet

Durch die stetige Weiterentwicklung des Fahrzeugs in Richtung höheren Komforts, einer höheren Sicherheit sowie Umweltfreundlichkeit haben die Fahrzeugentwickler neben mechanischen Komponenten auch die elektronischen Komponenten stark verbessert. So werden Steuergeräte immer intelligenter und sind zunehmend auf eine größere Datenübertragung ausgelegt. Insbesondere das autonome Fahren fordert einen intensiven Austausch zwischen einem leistungsstarken Zentralsteuergerät und hochgenauen Sensoren und Aktoren. Auch das Multimedia und Infotainment System im Fahrzeug hat sich bedeutend gewandelt. Der Nutzer erwartet immer größere Video- und Audiodatenströme unter voller Einbindung seines Smartphones sowie weiteren vernetzten Plattformen im Fahrzeug. Dementsprechend steigen, wie im Stand der Technik dargestellt, auch die Anforderungen an die verfügbare Bandbreite für die Datenübertragung im Fahrzeug.

Abhilfe schafft dort der zunehmende Einsatz von Ethernet im Fahrzeug. Dieser Standard hat sich bereits seit mehreren Jahren in der Kommunikationstechnik etabliert und wird weitestgehend von vielen internetfähigen Systemen wie Smartphones unterstützt. [SCH19]



**Abbildung 41:** Weiterentwicklung der IT-Protokolle im ISO OSI Modell [MAR11]

Nach dem ISO OSI Modell in Abbildung 41 befindet sich das Automotive Ethernet nach IEEE 802.3 auf der physikalischen Schicht. Dort bringt es gegenüber dem CAN und Flexray zum einen Gewichtseinsparungen durch leichtere Kabel. Des Weiteren überzeugt es durch hohe Übertragungsgeschwindigkeiten, die in kurzen Antwortzeiten resultieren. Zudem überzeugen die neuen Netzwerk- und Transportschichten mit einer viel besseren Anpassungsfähigkeit an internetnahen Anwendungsfeldern. [MAR11]

In der Netzwerkschicht bietet das Internet Protocol (IP) die Möglichkeit, eine Kommunikation über die Grenzen des eigenen lokalen Netzwerks hinaus aufzubauen. Durch eine Abstraktion der unteren physikalischen Schichten ist es somit möglich, das zu übertragende IP Paket über mehrere Netzwerke hinweg in andere IP Netzwerke zu übermitteln. Durch die allgemeine Adressierung eines Knotens kann jeder Knoten theoretisch weltweit erreichbar sein. [MAR11]

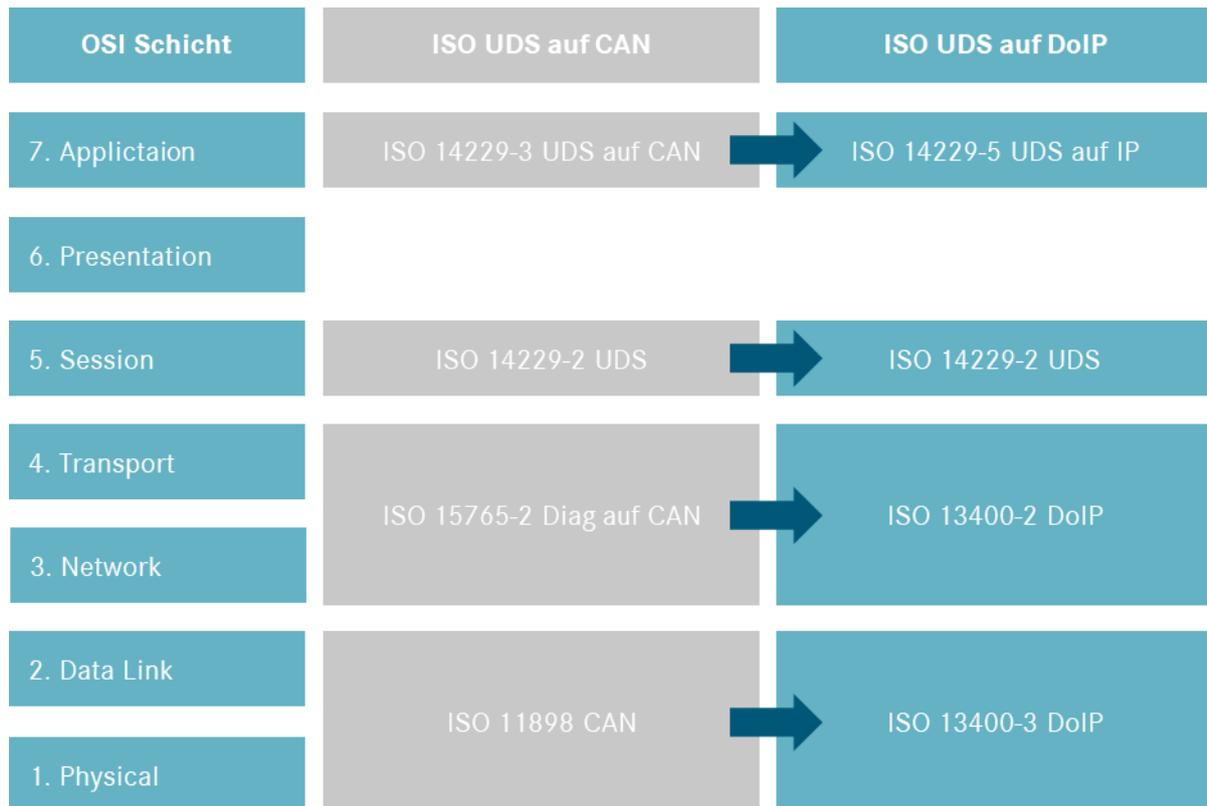
In der Transportschicht existieren soweit zwei dominierende Protokolle. Das Transmission Control Protocol (TCP) repräsentiert eine verbindungsorientierte Übertragung. Es stellt somit sicher, dass die versendeten Pakete auf jeden Fall beim Empfänger ankommen. Bei einem Verlust versendet das Protokoll das Paket erneut. Die Abfrage, ob jedes Paket verlustfrei übertragen wurde, benötigt dementsprechend Zeit, wodurch die Übertragungsgeschwindigkeit vermindert wird. Demgegenüber steht das User Datagram Protocol (UDP) als verbindungslose Übertragung. Da dort keine Überprüfung der Pakete implementiert ist, weist es eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit auf. Abhängig von der Anforderung an Sicherheit oder Geschwindigkeit der Übertragung, kommt daher entweder nur das verbindungsorientierte Transmission Control Protocol, nur das verbindungslose User Datagram Protocol oder eine Kombination aus beiden Protokollen zum Einsatz. [MAR11]

Diese neuen Protokollschichten werden für das Automotive Ethernet im Fahrzeugbereich angewendet und teilweise angepasst. Insbesondere für die Inbetriebnahme eröffnen sich somit neue Möglichkeiten, wie das nachfolgend beschriebene Diagnostics over Internet Protocol (DoIP) zeigt.

### 5.3.2 Diagnostics over Internet Protocol

Das Updateprogrammieren von Steuergeräten wird schon länger über Ethernet angestrebt. Die Vorteile liegen eindeutig in der hohen Bandbreite der Datenübertragung und gehen daher mit kürzeren Programmierzeiten einher. Dies ist, wie man aus dem Stand der Technik entnehmen kann, ein wichtiges Ziel in der Produktion und in den Werkstätten. [SOF16]

Mit Hilfe des Diagnostics over Internet Protocol (DoIP) soll dieses Ziel nun über den Standard ISO 13400 umgesetzt werden [ISO13400]. Da es auf dem Internet Protocol basiert, ist es vom physikalischen Medium unabhängig und kann auch über WLAN oder Mobilfunk übertragen werden. Es ist jedoch kein eigenständiges Diagnoseprotokoll, sondern ein erweitertes Transportprotokoll, wie man in Abbildung 42 erkennen kann. Oberhalb der Transportschicht wird weiterhin das UDS Protokoll verwendet.



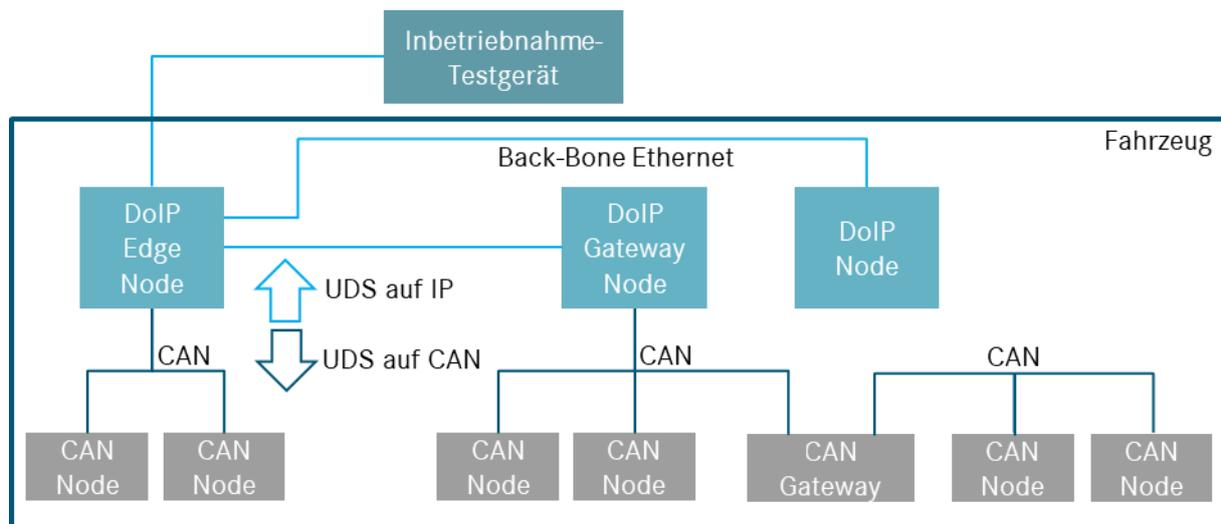
**Abbildung 42: Neuer DoIP Standard für die Inbetriebnahme im ISO OSI Modell [SOF16]**

Heutige Inbetriebnahme-Testgeräte kommunizieren bereits über DoIP mit den Steuergeräten im Fahrzeug. Dazu ist das Inbetriebnahme-Testgerät ein Teilnehmer im IP Netzwerk des Fahrzeugs. Dadurch ist es unbedeutend, ob das Inbetriebnahme-Testgerät über Ethernet an der OBD Schnittstelle, als On-Board Tester im Fahrzeug oder per WLAN im Fahrzeugnetzwerk eingebunden ist.

Dennoch müssen in DoIP-fähigen Steuergeräten (DoIP Nodes) die Transportschicht und die Netzwerkschicht sowie alle darunterliegenden Schichten implementiert sein. DoIP ist immer noch auf UDP und TCP angewiesen. Mittels UDP werden Status- und Konfigurationsinformationen übertragen und TCP wird für die Übertragung der tatsächlichen Diagnosepakete verwendet. Somit erreicht man einen Kompromiss zwischen einer hohen Zuverlässigkeit für die Diagnosepakete und einer dennoch hohen Datenübertragung. Für eine flächendeckende Unterstützung von DoIP muss dementsprechend TCP und UDP in allen Teilnehmer des IP Netzwerks implementiert sein. [SOF16]

Da einige Steuergeräte nicht zwangsläufig eine eigene Implementierung besitzen, existieren DoIP Gateway Nodes. Sie verknüpfen konventionelle Busnetzwerke wie CAN oder Flexray mit dem IP Netzwerk, sodass die Anfragen des Inbetriebnahme-Testgeräts in das jeweilige Ziel-Netzwerk weitergeleitet werden können. [SAL20]

Wie ein solches IP Netzwerk in Zusammenspiel mit den konventionellen Busnetzwerken aussehen kann, ist in der Abbildung 43 gezeigt.



**Abbildung 43:** Beispielhaftes IP Netzwerk für die Fahrzeuginbetriebnahme nach [SAL20]

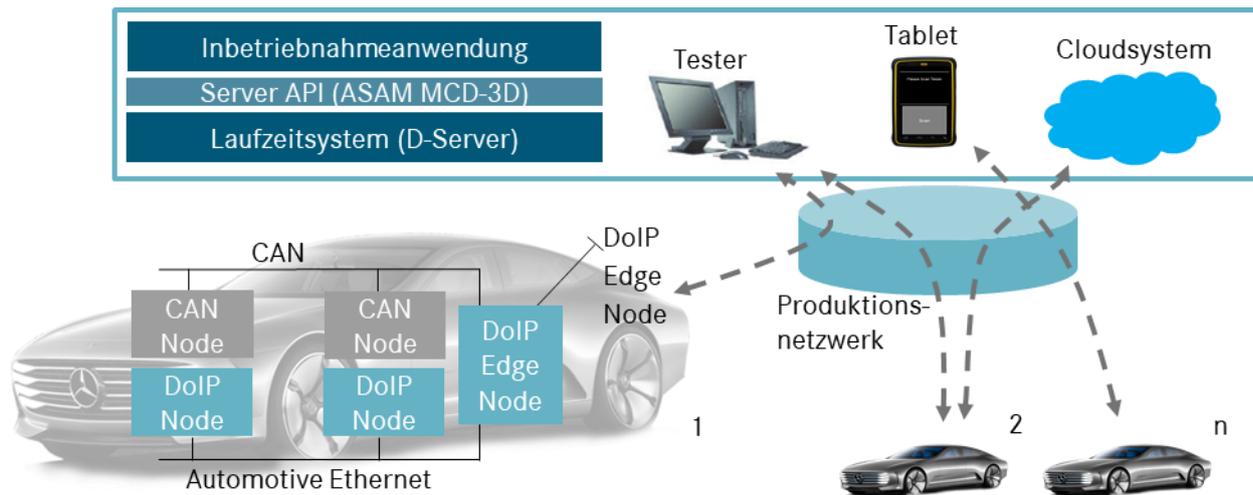
Damit das Weiterleiten über die DoIP Gateway Node funktioniert, braucht es die logische Adresse des Zielsteuergeräts und die eigentliche Nachricht. Die logische Adresse ist dabei eindeutig im Fahrzeug vergeben und ist dem Inbetriebnahme-Testgerät im Voraus bekannt. Möchte das Inbetriebnahme-Testgerät nun eine Inbetriebnahme durchführen, bekommt die DoIP Gateway Node zunächst die gewünschte Diagnoseanfrage und die logische Adresse des Zielsteuergeräts. Es übersetzt die Diagnoseanfrage anschließend in die zielbusspezifische Nachricht, die es dann mit der zugehörigen logischen Adresse auf dem jeweiligen Bus versendet. Danach wartet es auf die Antwort des Steuergeräts. Nach dem Empfangen der Diagnoseantwort auf dem Busnetzwerk leitet die DoIP Gateway Node die Nachricht an das Inbetriebnahme-Testgerät weiter. Dazu ergänzt es noch die logische Adresse des Zielsteuergeräts, sodass das Inbetriebnahme-Testgerät die Antwort eindeutig zuweisen kann und somit auch zeitgleich mit mehreren Steuergeräten kommunizieren kann. [ZIM14b]

### 5.3.3 Umsetzung

Durch die Nutzung des Automotive Ethernet ergeben sich somit neue Möglichkeiten, wie das Inbetriebnahmesystem an das Fahrzeug angebunden werden kann. Über dieses Prinzip entfällt das Vehicle Communication Interface, welches zuvor die Diagnoseanfragen auf das konventionelle Busnetzwerk in das Fahrzeug gebracht hat. Steuergeräte an einem konventionellen Busnetzwerk werden nun über die DoIP Gateway Node am Automotive Ethernet Netzwerk zugänglich gemacht.

Da DoIP auf dem Internet Protokoll basiert, ermöglicht es die Verlegung des Laufzeitsystems samt Schnittstelle und der Inbetriebnahmeanwendung in eine virtuelle Umgebung auf einen leistungsstarken Server außerhalb des Fahrzeugs (vgl. Abbildung 44).

Damit das Laufzeitsystem mit dem Fahrzeug kommunizieren kann, braucht es Zugang zum Fahrzeugnetzwerk. Jedoch sollte aus sicherheitstechnischen Gründen nicht jeder im Produktionsnetz auch Zugriff auf das Laufzeitsystem samt Inbetriebnahmeanwendung haben. Deswegen ist es sinnvoll, das System in einem separaten Netzwerk unterzubringen und nur dem Fahrzeugnetzwerk über WLAN Zugriff auf die virtuelle Umgebung zu geben.



**Abbildung 44:** Cloudgesteuertes Inbetriebnahmesystem in der Produktion [KEL20], [DAI15b]

Eine sichere Kommunikation zwischen Fahrzeug und Laufzeitsystem wird über ein virtuelles privates Netzwerk (VPN) gewährleistet. Durch diesen virtuellen Tunnel hat das Laufzeitsystem vollen und geschützten Zugriff auf das Fahrzeug.

Der VPN Client muss sich dafür jedoch im Fahrzeugnetzwerk befinden. Er wird auf einem Zentralsteuergerät mit WLAN Konnektivität eingerichtet, da dieses zum einen als DoIP Edge Node mit dem Fahrzeugnetzwerk verbunden ist und sich zum anderen über das WLAN Modul im Produktionsnetzwerk befindet. Das WLAN Modul ist ferner über ein vorinstalliertes Zertifikat im Produktionsnetzwerk registriert. [SCH19]

Damit nun das aufgespannte Netzwerk des VPN Client mit dem Fahrzeugnetzwerk kommunizieren kann, muss darüber hinaus eine sogenannte Bridge zwischen den beiden Netzwerken aufgebaut werden. Eine Bridge wird bewusst gewählt, da sie nur den Datenverkehr, der von der einen Seite in die andere Seite fließen muss, passieren lässt. Der große interne Fahrzeugdatenverkehr wird nicht herausgeleitet, sodass der Netzwerkverkehr gering gehalten wird. [SCH19]

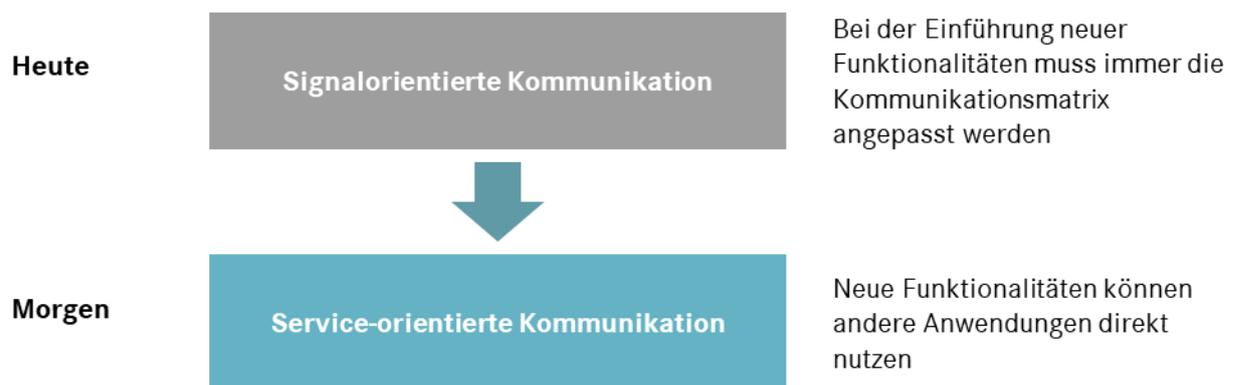
Die Bridge analysiert dabei jedes Paket nach seinem Empfänger. Nach einer internen Tabelle weiß sie dann, ob sich der Empfänger im gleichen oder im benachbarten Netzwerk befindet. Befindet sich der Empfänger im benachbarten Netzwerk, leitet die Bridge das Paket weiter. [TRA13]

Ein weiterer Vorteil der Bridge liegt in ihrer Fähigkeit Pakete zwischen zu speichern. Eigentlich ist dies nur deshalb implementiert, um eine Datenkollision beim Weiterleiten in das benachbarte Netzwerk zu vermeiden. Aber es ist auch sehr gut geeignet, Netzwerke mit unterschiedlicher Bandbreite zu verbinden. Dadurch können Übertragungsschwankungen bei der Verbindung zwischen einem leitungsgebundenen Netzwerk wie Ethernet und einer Luftschnittstelle wie WLAN ausgeglichen werden.

Zusammengefasst ermöglicht das neu eingesetzte Automotive Ethernet in Zusammenhang mit dem erweiterten Transportprotokoll DoIP eine cloudgesteuerte Inbetriebnahme. Allerdings stößt das System weiterhin an seine Grenzen, da es stets UDS als Diagnoseprotokoll verwendet. Im folgenden Abschnitt soll ein neuer Inbetriebnahmeansatz im Rahmen des fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystems vorgestellt werden.

## 5.4 Fahrzeuggesteuerter Ansatz

Bei der Inbetriebnahme über DoIP wird stets das veraltete UDS Protokoll verwendet. Dies repräsentiert noch die klassische signalorientierte Übertragung, bei der bei Änderungen umfangreiche Anpassungen in der Kommunikationsmatrix des Fahrzeugs erfolgen müssen, die mit hohem Aufwand verbunden sind.



**Abbildung 45:** Wechsel von einer signalorientierten Kommunikation zu einer Service-orientierten Kommunikation [ZOL18]

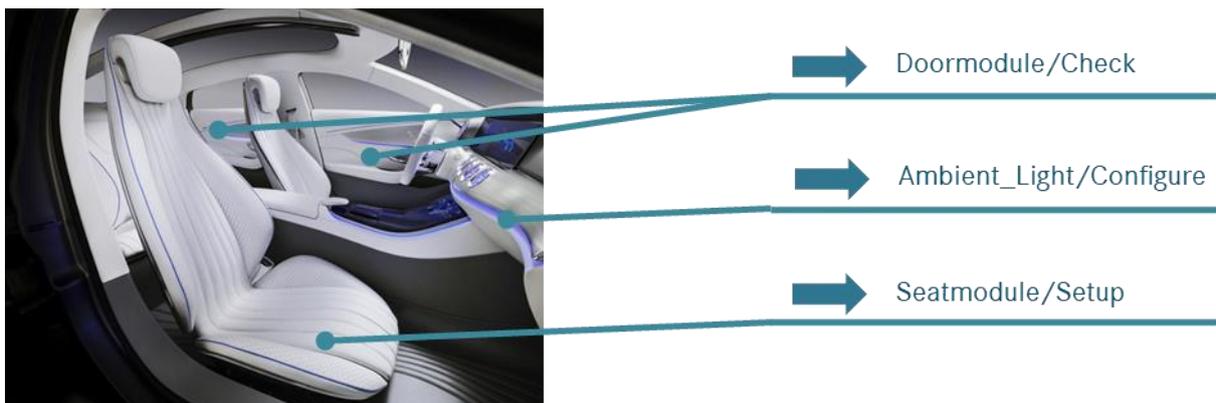
Abhilfe schafft an dieser Stelle die Service-orientierte Kommunikation. Sie abstrahiert bestimmte Funktionalitäten, die von anderen Anwendungen leicht wiederverwendet werden können. Der neuartige SOA Ansatz im Fahrzeug wird heute bereits über AUTOSAR Adaptive für den Standard Scalable service-Oriented MiddlewarE over IP (SOME/IP) für Kundenfunktionen angeboten. [AUT20]

Der Service-orientierte Ansatz soll dementsprechend auch in das zukünftige Inbetriebnahmesystem einziehen. Somit können neue Inbetriebnahmefunktionalitäten schnell in die Fahrzeugsoftware integriert und auch von anderen Anwendungen im Fahrzeug und außerhalb des Fahrzeugs verwendet werden.

#### 5.4.1 Service-orientierte Architekturen für die Inbetriebnahme

Der Grundgedanke des fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystems verfolgt die Verwendung von Service-orientierten Architekturen (SOA). Sie bieten abstrahierte Dienste (Services) für bestimmte Aufgaben im Fahrzeug über eine standardisierte Schnittstelle dem gesamten Fahrzeugsystem und der Umgebung an. So erleichtert die Entkopplung einzelner Komponenten das Erproben von neuen Softwarefunktionalitäten, indem sich die Komplexität signifikant verringert.

Bei der Inbetriebnahme wird mittels standardisierten SOA Protokollen, anders als beim UDS Protokoll, bei dem eine stark steuengerätvariantenabhängige Nachricht an das Steuergerät versendet wird, möglichst auf Wiederverwendbarkeit gesetzt. Somit können Softwarebausteine zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen und Generationen leichter wiederverwendet werden.



**Abbildung 46:** Wiederverwendbarkeit beim Service-orientierten Ansatz [DAI16b]

Dementsprechend haben unterschiedliche Komponentenvarianten, wie in Abbildung 46 dargestellt, den gleichen Service-Aufruf. Die Logik der Inbetriebnahme zieht weitestgehend in das Fahrzeug, sodass der Aufruf der Inbetriebnahmen fahrzeugübergreifend ähnlich ist. Von einer Inbetriebnahmeanwendung in der Cloud oder im Fahrzeug können somit die unterschiedlichen Services aufgerufen werden. Dabei existieren zwei verschiedene Mechanismen. Sie werden im Folgenden anhand von zwei Beispielen erläutert.

#### Client/Server Schnittstelle

Der erste Mechanismus entspricht einer bidirektionalen Kommunikation zwischen dem Anbieter des Dienstes (Server) und dem Aufrufer (Client). Hierbei kann die Inbetriebnahmeanwendung als Aufrufer zum Beispiel einen Wert erfragen oder eine Inbetriebnahme im Fahrzeug starten. In der Netzwerktechnik wird in diesem Kontext



So kann zum Beispiel eine weitere Inbetriebnahmeanwendung im Fahrzeug ebenfalls den Service aufrufen, um die Helligkeit des Ambiente Lichts anzulernen. Dies ist ein großer Unterschied zu dem UDS Protokoll, da der Aufruf steuergerätspezifisch ist und auch nur von einer Inbetriebnahmeanwendung benutzt werden darf.

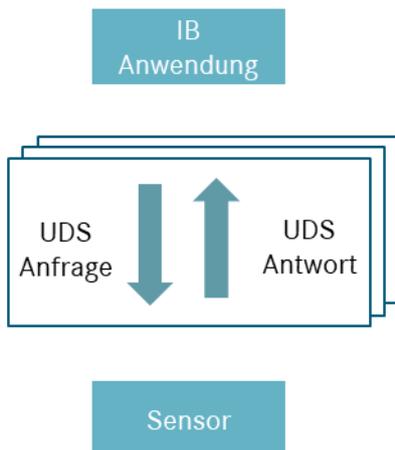
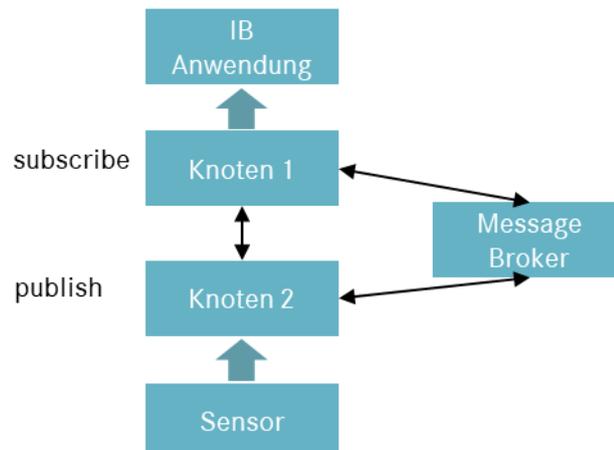
Wenn sich nun die Inbetriebnahmeanwendung im Fahrzeug ändert, bleibt der eigentliche Service für die Inbetriebnahme des Ambiente Lichts erhalten. Auch nach der Markteinführung des Fahrzeugs ist es so möglich, dass neue Anwendungen durch ein Softwareupdate in das Fahrzeug gelangen und die Services mitnutzen können. Somit kann die Inbetriebnahmeanwendung auch weitere Anwendungen, wie eine Geschwindigkeits-App, die zum Beispiel bei Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit das Ambiente Licht ändert oder eine Klima-App, die in Abhängigkeit der Innenraumtemperatur das Ambiente Licht variiert, leicht nachträglich installieren. Damit bleibt die Entwicklung von neuen Funktionen flexibel und die bisherige Kommunikationsmatrix muss nicht angepasst werden. [GRU20]

### **Publish/Subscribe Mechanismus**

Bei dem zweiten Mechanismus hingegen soll ein bestimmter, sich ändernder Wert, beispielsweise eines Sensors, gezielt an die Inbetriebnahmeanwendung kommuniziert werden. Dazu muss sich die Inbetriebnahmeanwendung auf den Wert abonnieren. Somit ist dieser beschriebene Mechanismus zustandsbehaftet, denn ein erneutes Senden an die Inbetriebnahmeanwendung geschieht erst, wenn sich der Wert ändert. [HOL12]

Der Publish/Subscribe Mechanismus drückt somit einen aktuellen Zustand des Systems aus. Es wird ebenfalls als Zustandsdatenbank bezeichnet, da es zustandsabhängige Werte direkt an das System mitteilt. Somit arbeitet es ähnlich wie der Ereignismechanismus bei SOME/IP. [HOL12]

Die Funktionalität und der Unterschied zum UDS Protokoll sollen nun anhand eines Beispiels, wie in Abbildung 48 dargestellt, erklärt werden. Ein Sensor misst Daten, die er der Inbetriebnahmeanwendung außerhalb des Fahrzeugs mitteilen muss, damit diese dann die Daten validieren kann. Konkret könnte dies die gemessene Raddrehzahl auf einem Rollenprüfstand sein. Da die Inbetriebnahmeanwendung auch den Rollenprüfstand kontrolliert, weiß sie genau die tatsächliche Drehzahl und muss diese mit der von dem Sensor gemessenen Drehzahl vergleichen.

**Klassische UDS Kommunikation****Publish/Subscribe Mechanismus**

**Abbildung 48:** Publish/Subscribe Mechanismus für das Auslesen von Sensorwerten im Vergleich zur UDS Kommunikation [HOF19]

In der bisherigen Inbetriebnahme muss die Inbetriebnahmeanwendung für jeden neuen Wert eine neue UDS Anfrage an den Sensor senden. Dieser beantwortet die Anfrage, auch wenn sich der Wert nicht verändert hat. Dies führt zu einer hohen Buslast und auch zur Kollision, wenn mehrere Systeme gleichzeitig den Sensor abfragen.

Abhilfe schafft da der Publish/Subscribe Mechanismus. Bei dem Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protokoll, als Beispiel eines Publish/Subscribe Mechanismus, ist jedes Fahrzeug in der Produktion und die Inbetriebnahmeanwendung als ein Knoten vertreten.

Misst der Sensor in einem Fahrzeug nun neue Werte, veröffentlicht er seine Werte beim Message Broker. Der Message Broker bietet diesen Wert dann über das MQTT Protokoll im Produktionsnetzwerk an. Allerdings kommt die Nachricht nicht an jeden Teilnehmer im Netzwerk an, denn nur die Anwendungen, die zuvor diesen Wert abonniert haben, erhalten den neuen Wert. Dies trägt massiv zur Entlastung des Netzwerkes bei.

### 5.4.2 Umsetzung

Damit Service-orientierte Architekturen für die Inbetriebnahme in einer zukünftigen Fahrzeugarchitektur umgesetzt werden können, müssen die neuen Protokolle in dem Zentralsteuergerät implementiert werden.

Über DoIP werden nach dem ISO OSI Modell nur die unteren Transportprotokollschichten erneuert. Wie jedoch gezeigt, besitzt eine neue Art des Diagnoseprotokolls ein viel höheres Potenzial als das UDS Protokoll. Dementsprechend müssen die Anwendungsschichten im ISO OSI Modell ebenfalls verändert werden.

Im Gegensatz zum bereits implementierten SOME/IP Standard für Kundenfunktionen [ZIM14b] ist eine Service-orientierte Diagnosekommunikation zwischen der Softwareschnittstelle und der Inbetriebnahmeanwendung in einer Cloud noch nicht beschrieben und eine mögliche Darstellung ist in der folgenden Abbildung gezeigt. Da die Inbetriebnahmeanwendung eine webnahe und cloudfähige Anwendung sein wird, orientiert man sich vorrangig an modernen Webanwendungen. Sie besitzen über der Transportschicht die in der Abbildung 49 gezeigten Session-, Presentation- und Applikationsschichten.

OSI Schicht	ISO UDS auf DoIP	Service-orientierte Architektur	
7. Application	ISO 14229-5 UDS auf IP	REST/SOAP/RPC	MQTT
6. Presentation		HTTP/FTP/SMTP	
5. Session	ISO 14229-2 UDS	TLS/SSL	
4. Transport	ISO 13400-2 DoIP	TCP/UDP	
3. Network		IPv4/IPv6	
2. Data Link	ISO 13400-3 DoIP	IEEE 802.3 Ethernet/ 802.11 WLAN	
1. Physical			

**Abbildung 49:** Service-orientierte Architektur im Vergleich zu DoIP [SCH19]

In der Session Schicht befindet sich ein Protokoll zur Absicherung einer sicheren Kommunikation. In diesem Fall ist es eine Transport Layer Security Verbindung (TLS), da sie von den darüberliegenden Protokollen unterstützt wird.

Darüber liegt im Falle eines Publish/Subscribe Mechanismus direkt das MQTT Protokoll. Für REST benötigt man ferner noch das bekannte Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS), welches dann über die API die Services anbieten kann. [WIL11]

Somit ergibt sich ein Kommunikationsmodell nach dem SOA Ansatz für die Inbetriebnahme und die Inbetriebnahmeanwendung kann über moderne Webprotokolle mit der Softwareschnittstelle im Fahrzeug kommunizieren.

Zwar ist die Implementierung dieser neuen Protokolle sehr aufwändig, allerdings bringt eine Abkehr von dem gebräuchlichen UDS Protokoll eine viel höhere Flexibilität. Diese wird besonders bei den kurzzyklischen softwaretechnischen Änderungen im Fahrzeug dringend benötigt. Um nun die technische Machbarkeit der cloudgesteuerten und fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmeansätze zu bewerten, werden beide Ansätze im Folgenden validiert.

## 5.5 Validierung der Ansätze

Im Rahmen einer Validierung soll als nächstes die Umsetzbarkeit der beiden vorgestellten Systemansätze hinsichtlich einer Bewertung der Bandbreite und Latenz diskutiert werden.

Im Gegensatz zur Validierung in Kapitel 4 wird nun der Fokus auf die Vernetzung des gesamten Systems inklusive höherer Protokollebenen gelegt. Dazu sind in Abbildung 50 alle Teilnehmer von dem Steuergerät bis zur Cloud transparent gemacht.



**Abbildung 50:** Vernetzungsteilnehmer zwischen Steuergerät und Inbetriebnahme Cloud

Sowohl der cloudgesteuerte als auch der fahrzeuggesteuerte Ansatz müssen letztendlich die Steuergeräte, Aktoren oder Sensoren in der mechatronischen Ebene des Fahrzeugs erreichen. Diese sind weiterhin über konventionelle Busnetzwerke wie CAN oder Flexray mit einem Gateway verbunden. Das Gateway übersetzt die CAN-Nachrichten in die Automotive Ethernet-Nachrichten. Das intelligente Zentralsteuergerät mit WLAN Konnektivität ist direkt am Ethernet angeschlossen. Es verbindet aber auch das Fahrzeug mit dem WLAN der Produktion. Dies ist über das Produktionsnetzwerk mit einem lokalen Server verbunden, in dem in einer virtuellen Umgebung das Cloud-System läuft.

### 5.5.1 Bandbreite

Da insbesondere bei dem Konfigurieren von Steuergeräten viele Daten für die zu installierende Anwendung in die Steuergeräte übertragen werden, nimmt die übertragbare Bandbreite des Gesamtsystems einen großen Stellenwert ein. Daher soll als nächstes die Bandbreite für das Gesamtsystem betrachtet werden.

Allgemein lässt sich die Bandbreite  $f_{Data}$  als Anzahl der Nutzdaten  $n_{Data}$  in einem Datenpaket durch die Dauer der Übertragung des Datenpakets  $T_{Frame}$  ausdrücken.  $T_{Frame}$  kann ferner über die Paketgröße, bestehend aus dem Paketkopf und -ende sowie den Nutzdaten, geteilt durch die Bitrate  $f_{bit}$  des physikalischen Busses abgeschätzt werden. [ZIM14a]

$$f_{Data} = \frac{n_{Data}}{T_{Frame}} \quad (3)$$

$$T_{Frame} \approx \frac{(n_{Header+Trailer} + n_{Data})}{f_{bit}}$$

Dieser Ansatz kann nun für die fahrzeugseitigen Busnetzwerke angewendet werden. Stellvertretend für die konventionellen Busnetzwerke wird an dieser Stelle CAN aufgeführt. Nach [ZIM14a] lässt sich die Bandbreite  $f_{Data,CAN}$  bei CAN auf der höheren Protokollebene des Transportprotokolls für lange Botschaften wie folgt abschätzen.

$$f_{Data,CAN} = \frac{n_{Data,CAN}}{T_{Frame,CAN}} \cdot k_{Transport} \quad (4)$$

Dabei dauert die Übertragung eines Datenpakets  $T_{Frame,CAN} = 246 \mu s$  bei einer Bitrate von  $500 \text{ kbit/sek}$  und eine Nutzdatengröße von  $n_{Data,CAN} = 8 \text{ Byte}$ . Der Ansatz bezieht ebenso mit ein, dass beim Übergang von der physikalischen Übertragung zum Transportprotokoll  $k_{Transport} = 90\%$  der Bandbreite erhalten bleiben. [ZIM14a]

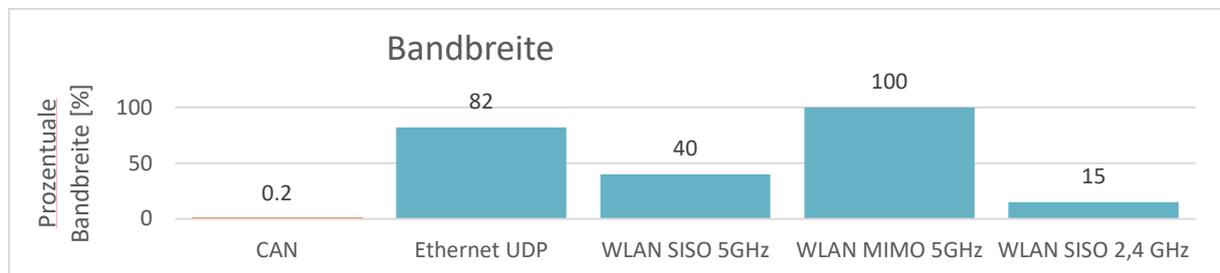
Bei der Abschätzung der Bandbreite beim Automotive Ethernet wird der gleiche Ansatz gewählt. Allerdings muss hier beachtet werden, dass die Größe der Nutzdaten zwischen 64 bis 1024 Byte variieren kann. Daher wird hier die maximale Bandbreite  $f_{Data,Eth}$  bei  $n_{Data,Eth} = 1024 \text{ Byte}$  erreicht.

$$f_{Data,Eth} = \frac{n_{Data,Eth}}{T_{Frame,UDP/IPv6} + 96 \text{ bit} \cdot \frac{1}{f_{bit}}} \quad (5)$$

$$n_{Data,Eth} \in [64, 1024]$$

Bei der Berechnung wird speziell für Automotive Ethernet berücksichtigt, dass zwischen zwei Ethernet-Botschaften ein Mindestabstand von 96 Bittakten eingehalten wird. [ZIM14a]

Somit ergibt die Abschätzung bei einer Dauer der Übertragung eines Datenpakets von  $T_{Frame,UDP/IPv6} = 88,16 \mu s$  bei einer Bitrate von  $f_{bit} = 100 \text{ mbit/sek}$ , unter Verwendung des bei Automotive Ethernet verbreiteten Transportprotokolls UDP, die maximale Bandbreite. Diese ist in Abbildung 51 im Vergleich zu den Bandbreiten von CAN und WLAN dargestellt.



**Abbildung 51:** Vergleich der Bandbreiten des Übertragungswegs von der Cloud in das Steuergerät

Vergleicht man jetzt die abgeschätzten Bandbreiten mit den gemessenen Bandbreiten im 2,4 GHz WLAN Band und im 5 GHz WLAN Band für SISO und MIMO in der Produktion aus Kapitel 4, liegt der Engpass der Datenübertragung beim deutlich langsameren CAN. Dies ist auch zu beobachten, obwohl das Fahrzeug bei der WLAN Messung das einzige Mitglied im WLAN Netzwerk des Access Points war und im Realbetrieb mit mehreren Teilnehmern von einer leichten Reduktion auszugehen ist. Lediglich bei einer fahrzeugseitigen Kommunikation im reinen Ethernet Netzwerk würde das SISO Verfahren sowohl im 2,4 GHz als auch im 5 GHz WLAN Band die Übertragung einschränken.

### 5.5.2 Latenz

Neben der Bandbreite ist auch die Latenz des Kommunikationswegs über das Gesamtsystem zu bewerten. Insbesondere lässt sich dadurch die Echtzeitkritikalität für den cloudgesteuerten Ansatz bewerten. Dies ist wichtig, da über diesen Ansatz die signalorientierten UDS Botschaften von den Steuergeräten über die DoIP Gateway Node und dem Zentralsteuergerät an die Inbetriebnahmecloud in der Produktion geleitet werden.

Die gesamte Latenz lässt sich aus Summe der Latenz der einzelnen Kommunikationswege abschätzen. Da neben den Kommunikationswegen auch Latenz bei der Verarbeitung der Daten in den Gateways und Zentralsteuergerät entsteht, lässt sich mit der folgenden Bilanz nur ein Teil der Latenz ermitteln und daher die Gesamtlatenz  $T_{Latenz,ges}$  nur abschätzen.

$$T_{Latenz,ges} \geq T_{Latenz,CAN} + T_{Latenz,Ethernet} + T_{Latenz,WLAN} \quad (6)$$

Auch hier wird stellendvertretend für die konventionellen Busnetzwerke CAN für die Validierung herangezogen. Nach [ZIM14a] lässt sich die Latenz bei CAN über die

Übertragungsdauer einer einzelnen Botschaft  $T_{Frame,CAN}$  und einer entsprechenden Wartezeit  $T_{Warte,M}$ , die durch die Priorisierung der Botschaften entsteht, berechnen.

Das heißt, wenn einzelne Botschaften höher priorisiert sind, müssen die weniger priorisierten Botschaften warten.

$$T_{Latenz,CAN} \geq T_{Frame,CAN} + T_{Warte,M} \quad (7)$$

Die Wartezeit  $T_{Warte,M}$  einer Botschaft M lässt sich wiederum aus dem folgenden Gleichungssystem

$$T_{Warte,M} = \min_{k \in LP(M)} (T_{Frame,k}) + \sum_{k \in HP(M)} \left\lceil \frac{T_{Warte,M}}{T_k} \right\rceil \cdot T_{Frame,k} \quad (8)$$

nach [ZIM14a] bestimmen. Der erste Summand beschreibt dabei die Wartezeit auf die längste Botschaft mit niedrigerer Priorität (*LP*). Der zweite Summand beschreibt die Wartezeit auf die Botschaften mit einer höheren Priorität (*HP*). Dieses Gleichungssystem muss zusätzlich noch die Bedingung erfüllen, dass die Latenz  $T_{Frame,CAN} + T_{Warte,M}$  die Periodendauer  $T_D$  nicht überschreiten darf. Dementsprechend würde sich im schlechtesten Fall, der auch bei der niedrigpriorisierten Diagnose üblicherweise eintritt, eine Latenz von  $T_{Latenz,CAN} = 9,9 \text{ ms}$  für CAN ergeben (vgl. Tabelle im Anhang).

Als nächstes wird die Latenz im Ethernet Netzwerk bewertet. Auch hier entspricht die Latenz von Ethernet  $T_{Latenz,Ethernet}$  in erster Linie der Übertragungsdauer des Ethernet Pakets  $T_{Frame,UDP/IPv6}$ .

Anders als bei CAN setzt sich jedoch die Wartezeit aus der Verzögerung in den Switches zusammen, denn ein Ethernet Netzwerk entspricht einer Sternstruktur. Das heißt, dass alle Teilnehmer direkt mit einem Switch verbunden sind. Der Switch ist wiederum mit weiteren Switches verbunden. Eine Nachricht muss dementsprechend vom Ethernet Teilnehmer zuerst zu einem Switch gelangen. Der Switch wertet dann auf höherer Protokollschicht den Adressaten der Nachricht aus, wohin er die Nachricht anschließend weiterleitet. Die durch das Auswerten verstrichene Zeit  $T_{Switch}$  muss dementsprechend an jedem passierten Switch zur Nachrichtenlatenz hinzuaddiert werden. [ZIM14a]

$$T_{Latenz,Ethernet} \geq T_{Frame,UDP/IPv6} + \sum T_{Switch} = 3 \cdot n_{Frame,UDP/IPv6} \cdot T_{bit} \quad (9)$$

Konservative Annahmen gehen von der Übertragungsdauer für eine Botschaft  $T_{Frame,UDP/IPv6}$  als  $T_{Switch}$  aus, da der Switch in den meisten Fällen zuerst die gesamte Nachricht empfängt, bevor er das Weiterleiten beginnt. [ZIM14a]

Allerdings ist dieses Verhalten auch der Grund dafür, warum Ethernet in seiner Grundform nicht echtzeitfähig ist. Wenn an einem Switch mehrere Botschaften gleichzeitig für denselben Empfänger ankommen, werden die Botschaften zunächst alle vollständig zwischengespeichert. Das anschließende Weiterleiten der Nachrichten erfolgt in einer nicht geregelten Reihenfolge, sodass eine Echtzeitfähigkeit im Ethernet-Standard IEEE 802.3 nicht garantiert werden kann. Automotive Ethernet kann bereits eine

entsprechende Priorisierung abbilden. Zudem herrscht eine Busruhe bei einer großen Übertragung von Daten. Das heißt, dass nichtbenötigte Kommunikationen zwischen Steuergeräten auf ein Minimum reduziert werden. Unter den Annahmen, dass sich nach dem beispielhaften IP Netzwerk in Abbildung 43 zwei Switches im Fahrzeugnetzwerk befinden, ergibt sich für Ethernet eine Latenz von  $T_{Latenz,Ethernet} = 0,27 \text{ ms}$ . [ZIM14a]

Zum Schluss wird die Latenz des WLAN in der Produktion aus dem Kapitel 4 herangezogen. Aus der Messung geht hervor, dass die zu erwartende Antwortzeit im Durchschnitt bei  $T_{Antwort,WLAN} = 12 \text{ ms}$  liegt. 98% der Messungen liegen unter 30 ms.

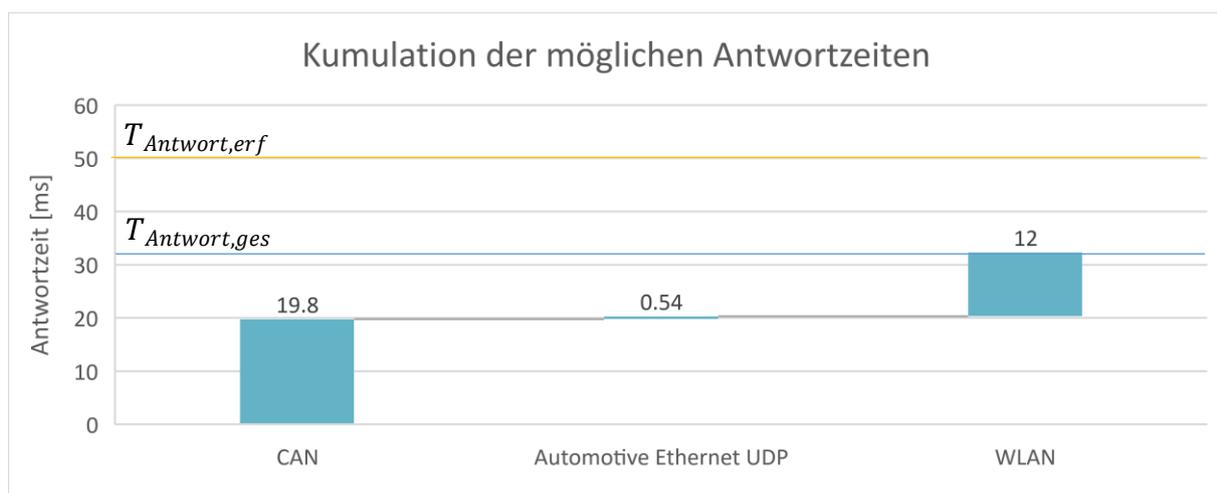
Bei der Interpretation der Gesamtlatenz muss beachtet werden, dass ein Großteil der Steuergeräte üblicherweise eine Antwortzeit von mindestens 50 ms bei zeitkritischen Anwendungen erwarten. Zwar betrifft dies nicht die gesamte Diagnosekommunikation, allerdings gibt es bestimmte Anwendungen, wie beispielsweise der Sicherheitszugang zum Steuergerät, welche tatsächlich auf eine kurze Antwortzeit angewiesen sind. [HEL13]

Da die oben beschriebene Latenz nur einen Kommunikationsweg beschreibt, muss für den Rückweg die Gesamtlatenz nochmals hinzuaddiert werden. Bei WLAN dagegen wurde bereits die Antwortzeit mit Hin- und Rückweg ermittelt. Dementsprechend ergibt sich

$$T_{Antwort,ges} \approx 2 \cdot T_{Latenz,CAN} + 2 \cdot T_{Latenz,Ethernet} + T_{Antwort,WLAN} \quad (10)$$

als die Antwortzeit  $T_{Antwort,ges}$ . Diese Zeit muss kleiner als die erforderliche Antwortzeit  $T_{Antwort,erf} = 50 \text{ ms} > T_{Antwort,ges}$  sein.

Die ermittelten Antwortzeiten sind im Folgenden in der Abbildung 52 zusammen dargestellt.



**Abbildung 52:** Vergleich der Antwortzeiten des Übertragungswegs zwischen Cloud und Steuergerät

In der Abbildung 52 ist zu erkennen, dass die gesamte Antwortzeit überwiegend unter der erforderlichen Antwortzeit liegt. Ferner machen CAN und WLAN den größten Anteil der Gesamtlatenz aus. Automotive Ethernet dagegen hat nur einen marginalen Anteil, da es über eine deutlich höhere Bitrate als CAN verfügt. Allerdings kann die Latenz bei Ethernet bei einem überlasteten Netzwerk auch deutlich größer ausfallen. Jedoch muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass bei der Inbetriebnahme von Steuergeräten das Restfahrzeug überwiegend ausgeschaltet ist und eine Überlastung des Netzwerkes durch unbeteiligte Steuergeräte eher unwahrscheinlich ist.

Bei WLAN sind Schwankungen auf jeden Fall zu erwarten, denn nur 98% der Antwortzeiten liegen unter 30 ms (vgl. Kapitel 4). In 98% der Fälle würde somit die Gesamtantwortzeit auf maximal 50,16 ms steigen. Diese Zeit liegt dagegen leicht über der erforderlichen Antwortzeit von 50 ms. Bei 2% der Antwortzeiten sind sogar deutliche Überschreitungen der erforderlichen Zeit zu erwarten.

Dementsprechend sollten zeitkritische Anwendungen möglichst im Fahrzeug durchgeführt werden. Das widerspricht dem Ansatz vom cloudgesteuerten System, da dieses System die gesamte UDS-Kommunikation übertragen möchte. Eine mögliche Alternative wäre es, zeitkritische Anwendungen nicht über die Inbetriebnahmecloud durchzuführen und sie im Zentralsteuergerät im Fahrzeug zu verankern. Dazu müsste der Teil der Datenbasis für zeitkritische Anwendungen in das Zentralsteuergerät im Fahrzeug verlagert werden.

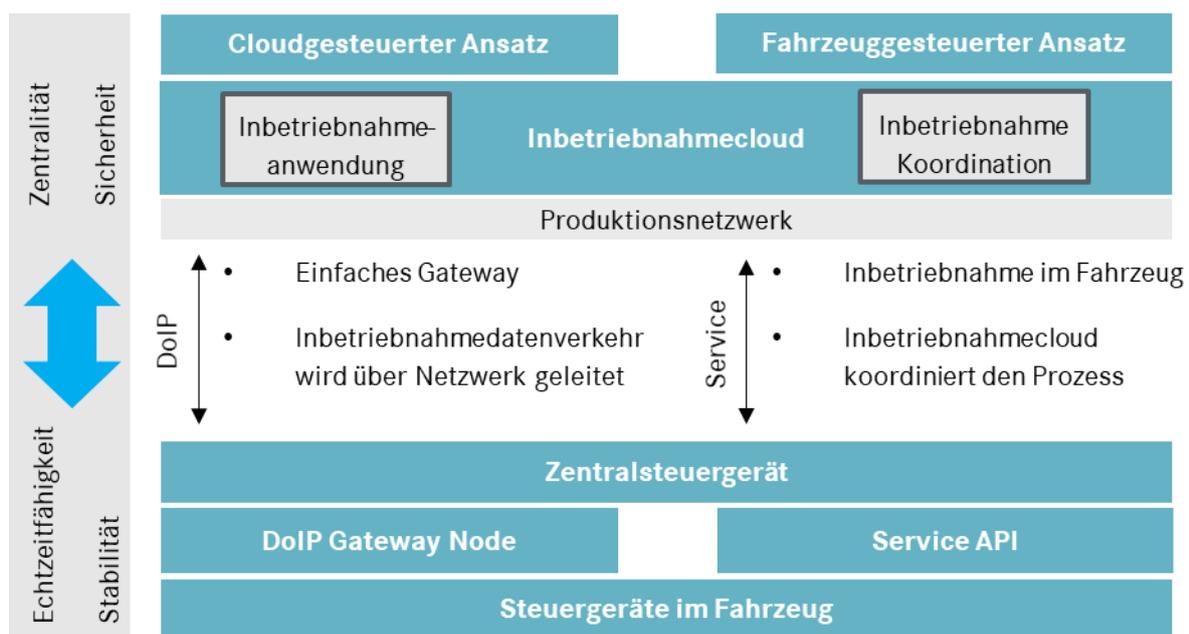
Das fahrzeuggesteuerte System hingegen ist nicht von den Latenzanforderungen betroffen, da es bereits alle zeitkritischen Anwendungen unterhalb seiner Software-schnittstelle im Fahrzeug behandelt. Lediglich eine hohe Bandbreite ist hierbei, wie auch beim cloudgesteuerten System, wichtig für das Konfigurieren der Steuergeräte. Die Validierung hat hier jedoch gezeigt, dass der Engpass weiterhin im Fahrzeug bei einer Übertragung im 5 GHz Band über MIMO liegt. Bei SISO im 2,4 GHz und im 5 GHz Band ist nur eine Beeinträchtigung bei einer reinen Ethernet-Kommunikation zu erwarten. In der nun anschließenden Zusammenfassung sollen beide Systeme abschließend gegenübergestellt werden.

## 5.6 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurden nach einer kurzen Einführung in das aktuelle Inbetriebnahmesystem zwei neue Ansätze der Inbetriebnahme vorgestellt.

Das cloudgesteuerte System profitiert zunehmend von dem Einzug des Automotive Ethernet in das Fahrzeugnetzwerk. Hierdurch lässt sich das Fahrzeug viel einfacher mit einer externen Cloud koppeln. Da im Automotive Ethernet bereits DoIP als ein IP-fähiges Protokoll für die Inbetriebnahme umgesetzt ist, muss das Zentralsteuergerät lediglich die DoIP Nachrichten an die Cloud über das Produktions-WLAN weiterleiten. Damit setzt dieser Ansatz auf die bisherige implementierte DoIP Inbetriebnahme auf und benötigt nur einen geringen zusätzlichen Implementierungsaufwand.

Demgegenüber stehen die hohen Anforderungen an Echtzeitfähigkeit. DoIP basiert auf dem veralteten UDS Protokoll, welches sehr unflexibel und für zeitkritische Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Latenz im Vergleich zu neueren Protokollen verknüpft ist. Bei der Validierung konnte gezeigt werden, dass in einigen Fällen die geforderte Antwortzeit nicht erreicht wird. Alternativ könnte eine Verlagerung der zeitkritischen Anwendungen in das Zentralsteuergerät, auf Kosten einer größeren Systemkomplexität, die hohen Anforderungen an die Latenz entschärfen.



**Abbildung 53:** Vergleich zwischen dem cloudgesteuerten und dem fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystem

Wie in Abbildung 53 dargestellt, wurde neben dem cloudgesteuerten Ansatz auch das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem vorgestellt. Dazu soll eine Service-orientierte Architektur die alte Diagnosekommunikation mit moderneren IT-Protokollen ablösen. Die modernen IT-Protokolle haben den Vorteil, dass sie als eine funktionale Einheit in sich abgeschlossen und daher auch von anderen Netzwerkteilnehmern im Fahrzeug wiederverwendbar sind.

Zudem sind sie voneinander unabhängig. Insbesondere bei einer Fahrzeugneuentwicklung führt diese Unabhängigkeit zu einer stabilen Funktionalität des Gesamtsystems. Das spätere Hinzufügen von speziellen Anwendungen kann durch eine Verknüpfung der bisherigen Services erfolgen.

Im Gegensatz zu dem cloudgesteuerten Ansatz werden die zeitkritischen Diagnoseservices im Fahrzeug durchgeführt. Dementsprechend ist die Anbindung an eine Cloud, zur Überwachung der Inbetriebnahme, weniger anfällig für Verbindungsunterbrechungen.

Aber dieser Ansatz bringt auch Nachteile mit sich. Er benötigt einen einmaligen höheren Implementierungsaufwand, da die Services alle in der Softwareentwicklung im Fahrzeug verankert sein und ebenfalls über die Softwareschnittstelle der Inbetriebnahmeanwendung zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies geht dementsprechend mit einer höheren Komplexität einher. Daneben muss dort auch der damit verbundene Umfang der Inbetriebnahme implementiert werden.

Im Wesentlichen profitieren jedoch diese Implementierungen von bisherigen Webanwendungen, da die eingesetzten Protokolle für dezentrale Anwendungsfälle innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs sehr prädestiniert sind. Sie können auch die von der Inbetriebnahme abhängigen Prozesse sehr stark vereinfachen. Doch dazu müssen neue Prozesse für die vorgestellten Inbetriebnahmesysteme in der Montage entwickelt werden. Wie eine solche Prozesslandschaft aussehen kann, soll im nächsten Kapitel gezeigt und erprobt werden.

## 6 Gestaltung des Inbetriebnahmeprozesses

Die zuvor erarbeiteten Technologien in der Vernetzung und im Inbetriebnahmesystem sind technologische Befähigungen für eine effizientere Inbetriebnahme des Fahrzeugs. Um diese Technologien jedoch in einer Montage anwenden zu können, müssen noch entsprechende effiziente Prozesse entwickelt werden. Dieses Kapitel behandelt die Prozessgestaltung einer neuartigen Inbetriebnahme. Zunächst werden allerdings die aktuellen Prozesse der Inbetriebnahme vorgestellt. Von diesen werden neue Prozesse mit einer höheren Wertschöpfung unter Anwendung der neuen Technologien abgeleitet und am Ende des Kapitels erprobt.

### 6.1 Heutiger Inbetriebnahmeprozess

Zu einer erfolgreichen Prozessgestaltung gehört eine ganzheitliche Betrachtung, die Zeitaufwand, Qualität und Kosten zu einer hohen Wertschöpfung vereint. Die Tätigkeiten in der Montage können prinzipiell in drei Arten der Wertschöpfung aufgeteilt werden. Um ferner eine Prozessverbesserung zu erreichen, können zusätzlich zu jeder Wertschöpfungsart Maßnahmen abgeleitet werden. Abbildung 54 zeigt die möglichen Wertschöpfungsarten sowie ihre Verbesserungsmaßnahmen nach [GOT16].



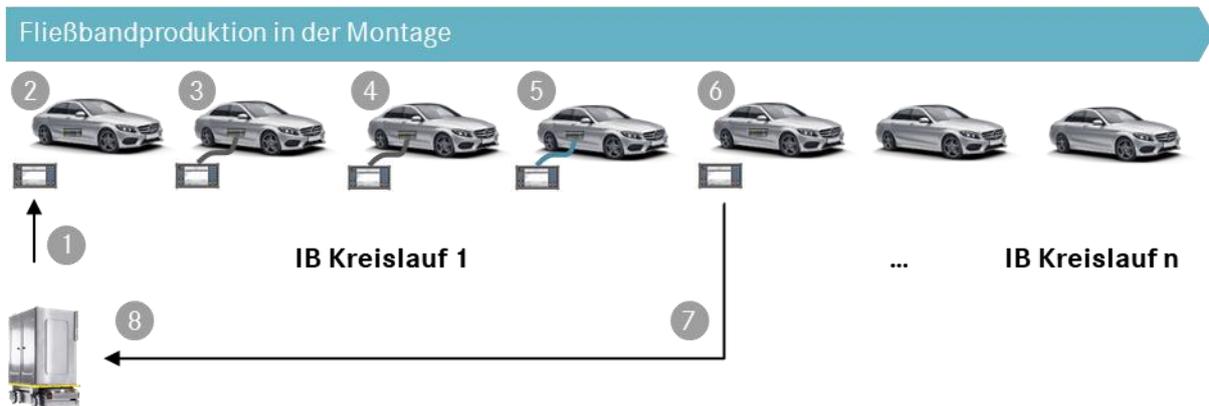
**Abbildung 54:** Wertschöpfungsarten und Zielstellung in der Produktion nach [GOT16]

Unter wertschöpfenden Prozessen versteht man Prozesse, die direkt zu einer Wertsteigerung des Produktes beitragen. So ist die Montage einer Tür an das Fahrzeug beispielsweise ein wertschöpfender Prozess. Analog dazu sind die Inbetriebnahmeschritte Konfigurieren und Einstellen wertschöpfende Prozesse, die das Inbetriebnahme-Testgerät heute bereits im Fahrzeug durchführt. Um eine höhere direkte Wertschöpfung zu erzielen, sollte der wertschöpfende Prozess weiter optimiert werden. [GOT16]

Demgegenüber stehen unterstützende Prozesse. Diese erzielen keine unmittelbare Wertsteigerung des Produktes, sondern sind nur Hilfsprozesse. Bei der Inbetriebnahme ist es beispielsweise der Prüfprozess, da dieser Prozess nur kritische wertschöpfende Umfänge sicherstellt. Dementsprechend sollten unterstützende Prozesse möglichst reduziert werden. [GOT16]

Nicht wertschöpfende Prozesse werden auch als Verschwendung bezeichnet. Zu diesen Prozessen gehören Transportwege und vorbereitende Maßnahmen. In Bezug auf die Inbetriebnahme sind dies beispielsweise der Transport und die Handhabung, sowie die Wartung des Inbetriebnahme-Testgeräts. Da diese Prozesse keinen Mehrwert für den Kunden ergeben, sollten sie eliminiert werden. [GOT16]

Um die Tätigkeiten der heutigen Inbetriebnahme in Relation zur Wertschöpfung zu bringen, werden die Prozessschritte zunächst anhand der Abbildung 55 vorgestellt. Da die Inbetriebnahme in mehreren Teilen in der Montagelinie stattfindet (vgl. Stand der Technik), existieren auch n-fache Kreisläufe der Inbetriebnahme-Testgeräte. In einem Kreislauf führt das Inbetriebnahme-Testgerät ein Teil der Inbetriebnahme im Fahrzeug durch und wird anschließend wieder an seinen Ausgangspunkt zurück transportiert. Dabei erfährt das Inbetriebnahme-Testgerät verschiedene Prozessabläufe, welche im Folgenden näher erläutert werden.



**Abbildung 55:** Schematische Darstellung des aktuellen Inbetriebnahmeprozesses [DAI17b]

Um eine Inbetriebnahme über ein Inbetriebnahme-Testgerät im Bandablauf zu ermöglichen, muss zuerst das Inbetriebnahme-Testgerät aus seiner Ladestation entnommen werden (1). Um den Prozess für Bandmitarbeiter so ergonomisch wie möglich zu gestalten, berücksichtigt man bei der Planung eine ideale Abgreifhöhe. Zudem werden die Ladestationen möglichst nah an das Band gebracht, sodass die Ladestationen unvermeidlich auch Bandanstellungsbereiche einnehmen. [KRA00]

Als nächsten Schritt legt der Bandmitarbeiter das Inbetriebnahme-Testgerät in das Fahrzeug (2). Dabei ist eine stabile Position im Fahrzeug bedeutend, da in einigen Stationen das Fahrzeug für Unterbodenarbeiten geneigt wird. In diesen Stationen sollte das Inbetriebnahme-Testgerät nicht verrutschen, sodass es den Fahrzeuginnenraum sowie sich selbst nicht beschädigt.

Nach der Positionierung verbindet der Mitarbeiter das Kabel mit der OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs (3). Auch dieser Prozess muss mit einer gewissen Genauigkeit und Geschicklichkeit erfolgen. Besonders die OBD-Schnittstelle ist im vorderen linken Fußraum sehr schwierig zu erreichen und auch nicht ohne weiteres sichtbar. Nach einer erfolgreichen Kontaktierung muss zudem überprüft werden, ob die Kontaktierung auch fest sitzt. Fehler durch ein abfallendes Kabel sind schwierig nachzuvollziehen, da man sie nur erschwert von Kommunikationsfehlern im Fahrzeug unterscheiden kann. Darüber hinaus muss im Fehlerfall der gesamte Inbetriebnahmeprozess wiederholt werden.

Nach einer erfolgreichen und feststehenden Kontaktierung beginnt die systemseitige Vorbereitung der Inbetriebnahme. Das Inbetriebnahme-Testgerät muss dazu zunächst das Fahrzeug erkennen und entsprechende Abläufe bereitstellen (4). Danach beginnt die eigentliche Inbetriebnahme (5). Hierbei wird angenommen, dass das Fahrzeug bereits über eine Spannungsversorgung verfügt und damit alle Vorbedingungen für eine Inbetriebnahme erfüllt sind. Die Reihenfolge, wann die Konfiguration, das Einstellen oder das Prüfen beginnen, ist von einem vordefinierten Ablauf abhängig.

Nachdem die Inbetriebnahme durchgeführt ist, prüft ein Mitarbeiter, ob die Inbetriebnahme auch erfolgreich durchlaufen ist. Je nach anschließender Stationsauslastung wiederholt er/sie im Fall einer fehlerhaften Inbetriebnahme den Prozess über ein spezielles Nacharbeitsmenü mit dem Inbetriebnahme-Testgerät. Wenn die anschließenden Stationen eine erneute Inbetriebnahme nicht zulassen, wird das Fahrzeug nach Bandende in die Nacharbeit geleitet.

Bei einer erfolgreichen Inbetriebnahme in der Linie trennt ein Mitarbeiter das Kabel von der OBD-Schnittstelle und entnimmt das Inbetriebnahme-Testgerät aus dem Fahrzeug (6). Das Inbetriebnahme-Testgerät wird dann von dem Mitarbeiter zur Ladestation zurücktransportiert (7) und hineingelegt (8). Der Transportweg entspricht der über die Bandbewegung zurückgelegten Strecke des Fahrzeugs während der Inbetriebnahme. Bei langen Strecken wird in der Praxis auch auf eine Fördertechnik zurückgegriffen, die das Inbetriebnahme-Testgerät automatisiert an seine Ausgangsposition befördert. Allerdings müssen hierfür auch Notfallprozesse bei einem Ausfall der Förderanlage greifen und eine manuelle Beförderung möglich sein.

Neben den hier gezeigten Serienprozessen existieren ferner Wartungsarbeiten an dem Inbetriebnahmesystem, die ebenfalls zu den unterstützenden Prozessen gezählt werden, denn die Inbetriebnahme-Testgeräte werden in jeder Prüfstation in das Fahrzeug gelegt, kontaktiert, de-kontaktiert, entfernt und zurücktransportiert. Unter diesen hohen Prozessbelastungen leidet das Material der Geräte, sodass Schäden nicht zu vermeiden sind. Da diese sehr sporadisch und nicht früh zu erkennen sind, ist ebenfalls eine ständige Wartung notwendig. Ein Überblick der Wartungstätigkeiten des aktuellen Inbetriebnahmesystems ist in Abbildung 56 zu sehen.



**Abbildung 56:** Übersicht der Wartungsaufgaben am heutigen Inbetriebnahmeprozess

Bei der Wartung der Hardware müssen das Gehäuse sowie die Bildschirme des Inbetriebnahme-Testgeräts überprüft werden. Aber auch Schnittstellen wie OBD-Stecker und Kabel müssen überwacht werden. Ein weiterer Wartungspunkt entspricht der Kontrolle der Ladestationen. Auch diese unterliegen hohen mechanischen Beanspruchungen und müssen regelmäßig überprüft werden.

Neben der Hardware Wartung, muss auch die Software gewartet werden, denn der neuste Software-Stand des Betriebssystems muss auf dem Inbetriebnahme-Testgerät sichergestellt sein. Gegen hohe Lizenzgebühren muss das System lauffähig und sicher gehalten werden. Das schließt regelmäßige Updates für das Betriebssystem mit ein. [GRU20]

Aber auch die Inbetriebnahmeanwendung und die Datenbasis für das Laufzeitsystem ändern sich sehr häufig. So müssen die ODX Daten im Laufzeitsystem ebenfalls auf das abgeänderte Ablaufprogramm angepasst werden. Dementsprechend müssen auch alle betroffenen Inbetriebnahme-Testgeräte mit dem neuen Inbetriebnahmeablauf sowie mit der Datenbasis des Laufzeitsystems versorgt werden. [ZIM14b]

Mit dem Trend zu einem intelligenteren Fahrzeug wird der wertschöpfende Aufwand keineswegs weniger. Allerdings sollte man ein großes Bestreben haben, die unterstützenden und nicht wertschöpfenden Prozesse zu minimieren. Konkret bedeutet dies, die hier identifizierten Prozesse des Transports, der Handhabung sowie der Wartung mit dem Wegfall des Inbetriebnahme-Testgeräts zu eliminieren.

Dabei helfen die zuvor vorgestellten Ansätze des Inbetriebnahmesystems, denn ein modernes Fahrzeug verfügt über ganz neue Möglichkeiten der Vernetzung mit der Produktion und damit auch neue Möglichkeiten das Inbetriebnahmesystem prozessual zu gestalten. Wie sich das cloudgesteuerte und fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem auf die Prozesslandschaft auswirken, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

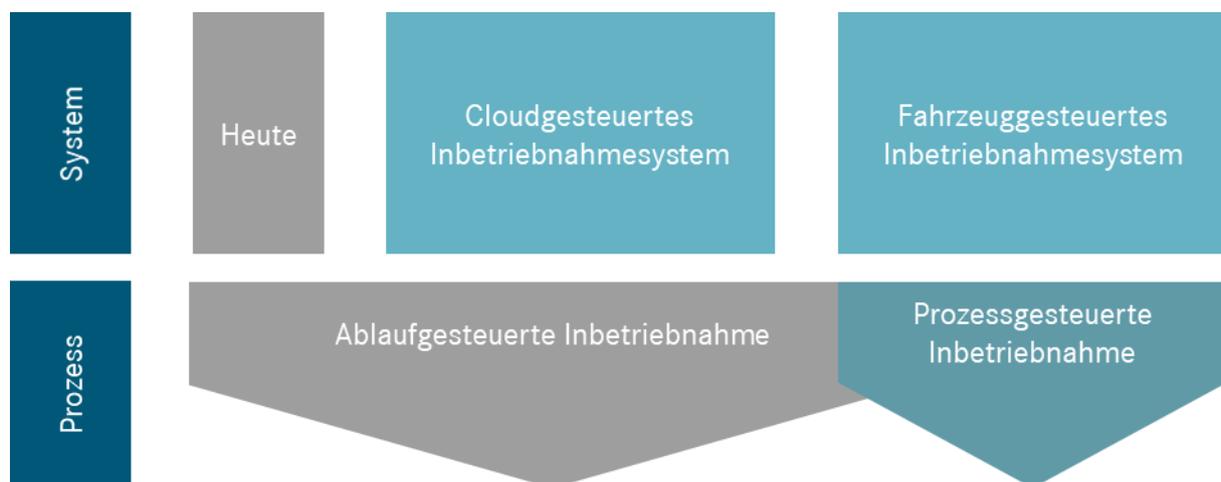
## 6.2 Ableiten neuer Inbetriebnahmeprozesse

Ausgehend von einer neuen Fahrzeugvernetzung mit der Produktion wurden im vorherigen Kapitel das cloudgesteuerte und fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem vorgestellt. Diese beiden neuartigen Inbetriebnahmesysteme machen ein Inbetriebnahme-Testgerät in ihrer vollen Ausbaustufe obsolet. Dementsprechend würden sich die Kosten für die Inbetriebnahme-Testgeräte und viele weitere hier als verschwenderisch dargestellten Tätigkeiten reduzieren. So fallen beispielsweise die Prozessschritte der Handhabung und des Transports des Inbetriebnahme-Testgeräts weg. Die Wartung reduziert sich ebenfalls nur noch auf eine softwaretechnische Verteilung des aktuellen Inbetriebnahmeablaufs.

Um mit neuen Prozessen eine wirksame Verbesserung der Inbetriebnahme zu erreichen, müssen folgende Kriterien erzielt werden.

- Effizienzsteigerung durch Elimination von nicht wertschöpfenden Anteilen
- Reduzierung der unterstützenden Anteile
- Wegfall der nicht wertschöpfenden Anteile
- Absicherung der Qualität des Produktes
- Flexibilisierung des Produktionsprozesses

Dazu müssen neue automatisierte Prozesse implementiert werden, die auf der Vernetzung zwischen Fahrzeug und Produktion aufbauen. Zum einen kann der heute vorwiegend ablaufgesteuerte Inbetriebnahmeprozess mittels dem neuen Inbetriebnahmesystem weiterentwickelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme als ein übergeordneter Ablauf aus der Cloud, der unabhängig vom Fahrzeug in jedem Prozessort in der Montage fest vorgegeben ist, verstanden. Sowohl das cloudgesteuerte als auch das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem würden weiterhin den ablaufgesteuerten Inbetriebnahmeprozess unterstützen (vgl. Abbildung 57).



**Abbildung 57:** Prozessuale Gestaltung der Inbetriebnahmesysteme

Demgegenüber stellt die im Rahmen dieser Arbeit definierte prozessgesteuerte Inbetriebnahme einen gänzlich neuen Inbetriebnahmeprozess dar. Hierbei liegt die Kontrolle über die Inbetriebnahme überwiegend im Fahrzeug. Somit ist das Fahrzeug in der Lage abhängig von seinem Aufbauzustand selbständig zu entscheiden, welche Inbetriebnahmeschritte es durchführt. Wenn neue Steuergeräte im Fahrzeug kontaktiert werden und das Fahrzeug gleichzeitig unter elektrischer Spannung steht, kann unmittelbar nach dem Verbau das Steuergerät in Betrieb genommen werden. Da dieser Prozess über eine dezentrale Logik im Fahrzeug gesteuert wird, kann nur das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem diesen Prozess unterstützen.

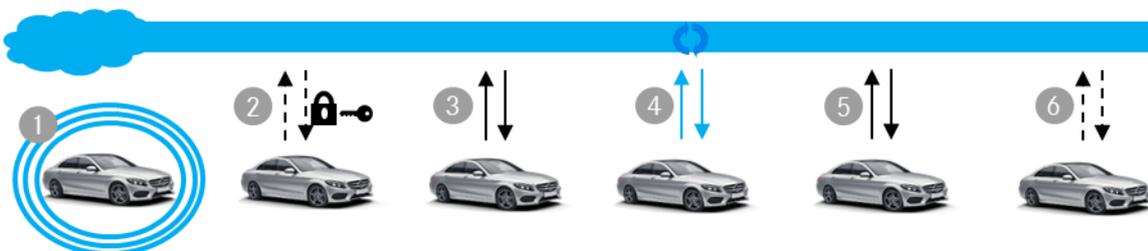
Im weiteren Vorgehen werden die neuen Prozesse für beide Inbetriebnahmesysteme jeweils vorgestellt und anschließend anhand einer Erprobung beurteilt. Dabei soll über einen Vergleich mit dem heutigen Inbetriebnahmeprozess gezeigt werden, inwieweit eine Erhöhung der Wertschöpfung stattfindet.

### 6.3 Ablaufgesteuerte Inbetriebnahme

Zunächst soll die Prozessgestaltung für eine ablaufgesteuerte Inbetriebnahme vorgestellt werden. Da dieses System eine Virtualisierung der Inbetriebnahme anstrebt, kann der eigentliche Prozess des Konfigurierens, Einstellens und Prüfens wie im aktuell verwendeten Prozess weiterhin durchgeführt werden. Allerdings wird, wie im cloudgesteuerten System beschrieben, die Fahrzeugschnittstelle direkt an die Cloud gelegt, sodass anfangs ein sicherheitstechnisches Kopplungsverfahren zwischen Cloud und Fahrzeug sowie ein abschließendes Entkopplungsverfahren notwendig sind. In einem weiteren Szenarium ist es auch vorstellbar, das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem über einen Ablauf in der Cloud zu koordinieren. Dazu startet und überwacht die Cloud die jeweilige Inbetriebnahme über die Service API im Fahrzeug.

Hieraus lässt sich der dargestellte Prozess in Abbildung 58 zunächst für das cloudgesteuerte System ableiten. Anschließend wird ebenfalls eine Lösung für das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem erläutert.

#### Fließbandproduktion in der Montage



**Abbildung 58:** Schematische Darstellung der ablaufgesteuerten Inbetriebnahme [DAI17b]

Nachdem das Fahrzeug automatisiert das Produktionsnetz gefunden hat (1), meldet es sich mit einem Produktionszertifikat beim Produktionsnetzwerk an (2). Es ist zu vermeiden, dass sich weder das Fahrzeug noch die Produktion mit einem fremden dritten System verbinden. Um eine hohe Vertraulichkeit zu erreichen, muss gewährleistet werden, dass sich das Fahrzeug in diesem Zustand nur mit der Produktion verbinden lässt. Dazu gibt es in der IT-Sicherheitstechnik die asymmetrische Verschlüsselung (vgl. Stand der Technik). Der Steuergerätehersteller bringt bei der Produktion der Steuergeräte ein Zertifikat über die Public-Key-Infrastruktur (PKI) ein. Zudem übergibt er vertraulich ein korrespondierendes Zertifikat dem Produktionsnetz des Fahrzeugherstellers. Mit diesem Zertifikat kann das Produktionsnetzwerk nun sicher auf das Fahrzeug zugreifen. [MOS14]

Nach einer erfolgreichen Kopplung mit dem Produktionsnetzwerk beginnt das Cloudsystem einen VPN Tunnel über DoIP mit dem Fahrzeug aufzubauen (3). Um ein virtuelles Inbetriebnahmesystem aufzubauen, erzeugt die Cloud eine Inbetriebnahme Instanz für jedes Fahrzeug. Die virtuelle Inbetriebnahme Instanz umfasst das Laufzeitsystem und die Inbetriebnahmeanwendung, die analog zu einem physischen Inbetriebnahme-Testgerät die Inbetriebnahmeabläufe ausführen. Zur Fahrzeuggegenstelle werden somit über den zuvor aufgebauten Kommunikationstunnel Daten ausgetauscht.

Solange die Verbindung zwischen Fahrzeug und Produktion aufgebaut ist, kann die Cloud im Rahmen der Inbetriebnahme das Konfigurieren, Einstellen und das Prüfen durchführen (4). Sollte die Verbindung für einen kleinen Moment aussetzen, müssen gegebenenfalls einige Inbetriebnahmeabläufe wiederholt werden. Da allerdings die Cloud den Inbetriebnahmeprozess des Fahrzeugs ständig beobachtet, werden nicht durchgeführte Schritte schnell identifiziert und beim nächstmöglichen Zeitpunkt automatisiert wiederholt.

Das fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahmesystem bietet hier eine Alternative, da es die Inbetriebnahme Instanz in der Cloud auf eine koordinierende Rolle reduziert und dementsprechend nur die jeweiligen Service-Endpunkte für die Inbetriebnahme im Fahrzeug ansteuert. Das Fahrzeug führt dann selbständig den Inbetriebnahmeablauf durch. Zur Überwachung muss allerdings eine Kommunikation fortlaufend aufrecht erhalten bleiben.

Am Ende der Produktion, wenn die finale Abnahme des Fahrzeugs erfolgt ist (5), baut die Cloud den Kommunikationskanal zum Fahrzeug ab (6). Das Fahrzeug koppelt sich dann vom Produktionsnetz ab und löscht die Produktionszertifikate im Fahrzeug, sodass das Fahrzeug nicht mehr in das Produktionsnetzwerk zurückgelangt.

Prozessual gesehen, steht der Inbetriebnahmecloud über dem ablaufgesteuerten Prozess immer der aktuelle Inbetriebnahmezustand des Fahrzeugs zur Verfügung. So können Änderungen in der Inbetriebnahme schnell und zentral vorgenommen werden. Allerdings setzt es auch eine durchgehende Erreichbarkeit des Fahrzeugs voraus. Dies ist leider in einer Produktionsumgebung nicht immer gegeben, da das Fahrzeug

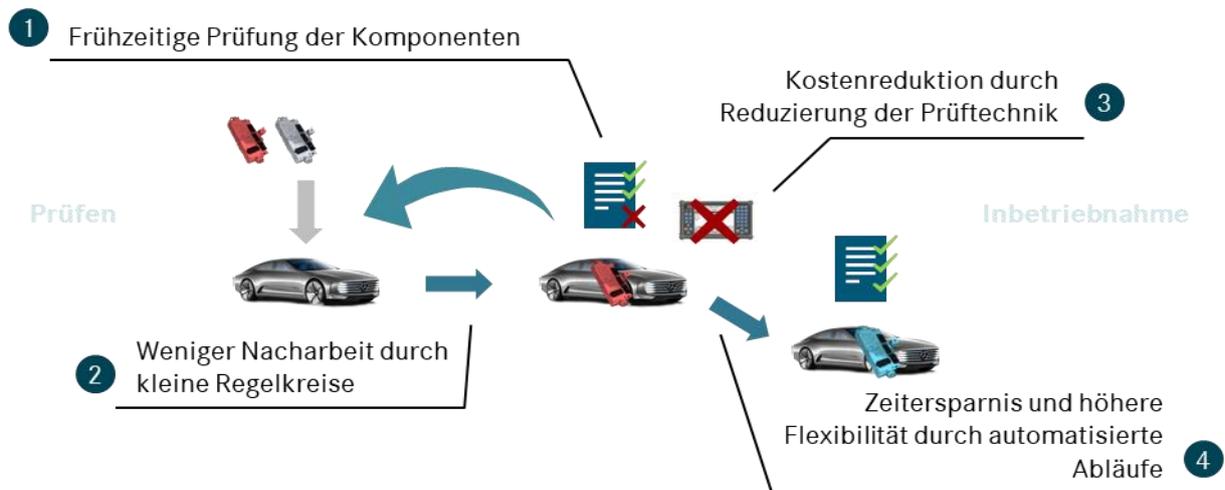
nicht immer unter elektrischer Spannung stehen darf und somit das Zentralsteuergerät nicht arbeiten kann. Gründe für den spannungslosen Zustand können unter anderem der Verbau von kritischen Komponenten, wie Airbags sein. [DAN17]

Um in solchen Stationen die Verbindung zwischen Cloud und Fahrzeug nicht immer abzubauen und anschließend wiederaufzubauen, bietet die prozessgesteuerte Inbetriebnahme eine Lösung.

## 6.4 Prozessgesteuerte Inbetriebnahme

Die prozessgesteuerte Inbetriebnahme basiert auf dem fahrzeuggesteuerten System und strebt einen grundlegend anderen Ansatz als die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme an. Da sich das Inbetriebnahmesystem größtenteils im Fahrzeug befindet, ist die Reihenfolge der Inbetriebnahme viel unabhängiger von der Cloud und kann sich mehr am eigentlichen Montageprozess orientieren. So soll analog zum Aufbauzustand des Fahrzeugs auch eine Inbetriebnahme durchgeführt werden. Mit dem Kontaktieren von neuen Steuergeräten im Fahrzeug soll somit automatisch ihre Inbetriebnahme gestartet werden, sodass Fehler bei dem Zusammenbau schnell entdeckt werden.

Durch diese gänzlich neue Vorgehensweise ergeben sich mehrere Vorteile, die in Abbildung 59 dargestellt sind.



**Abbildung 59:** Übersicht der Vorteile von der prozessgesteuerten Inbetriebnahme [DAI15b]

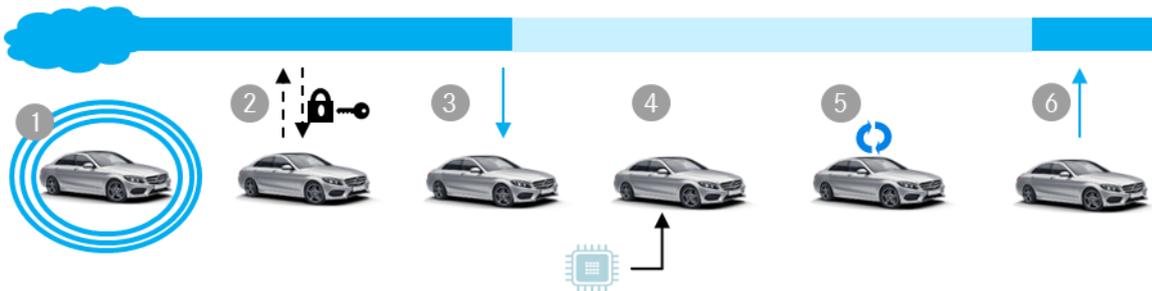
Zum einen kann durch die fahrzeuginterne Prüfung frühzeitig zum Aufbauzustand des Fahrzeugs ein Fehlerbild entstehen. Somit können die entdeckten Fehler über kleine Regelkreise frühestmöglich korrigiert werden. Der Aufwand, bestimmte Komponenten bei einer späten Nacharbeit wieder freizulegen, entfällt. Zum anderen entsteht eine deutliche Kostenreduktion durch den Wegfall des Inbetriebnahme-Testgeräts, da die Inbetriebnahmeschritte vom Fahrzeug durchgeführt werden. Des Weiteren bringt die prozessgesteuerte Inbetriebnahme eine Zeitersparnis und eine höhere Flexibilität durch automatisierte Abläufe. Somit können die Inbetriebnahmeschritte unabhängig

voneinander ablaufen und flexibel genutzt werden. Insbesondere bei einer immer höheren Mischproduktion erspart dies Planungsaufwand. Im folgenden Teil soll das Konzept der prozessgesteuerten Inbetriebnahme näher erläutert werden.

### 6.4.1 Konzept

Die prozessgesteuerte Inbetriebnahme bringt folglich neue Möglichkeiten und ist auch unabhängiger von der Inbetriebnahmecloud als die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme. Als nächstes wird ein solcher Prozess in skizziert.

#### Fließbandproduktion in der Montage

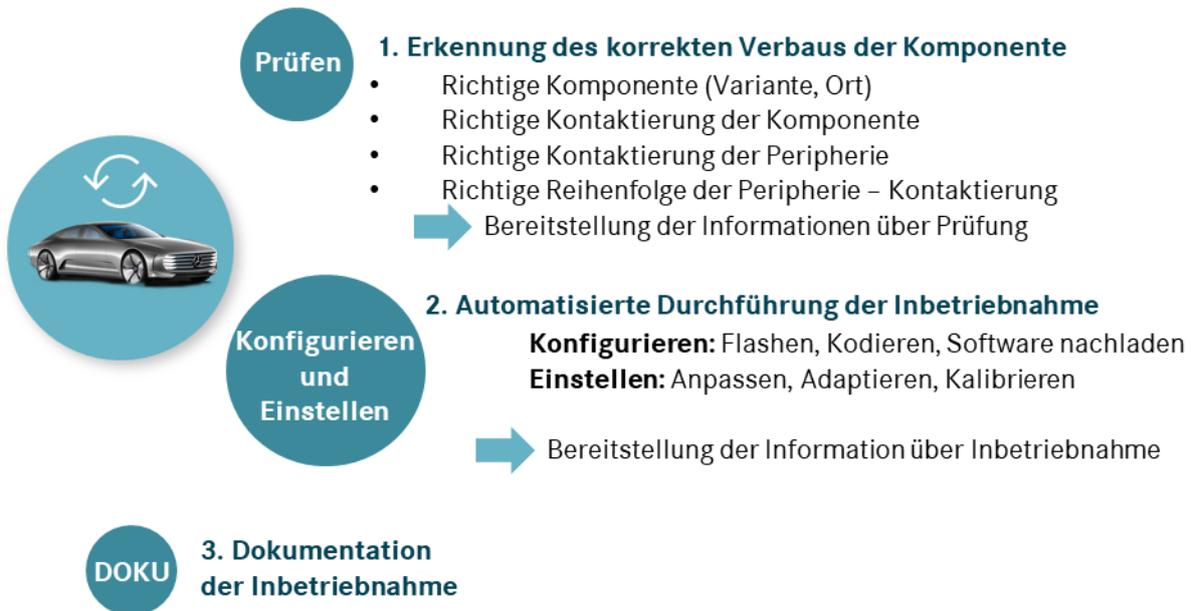


**Abbildung 60:** Schematische Darstellung der prozessgesteuerten Inbetriebnahme [DAI17b]

Beim initialen Verbindungsaufbau vom Fahrzeug zur Cloud werden noch die gleichen Prozessschritte wie bei dem ablaufgesteuerten Prozess ausgeführt (1-2). Auch hier muss zunächst das Fahrzeug das Produktionsnetzwerk finden und sich über sein Produktionszertifikat anmelden.

Der nachfolgende Ablauf ist nun aber anders gestaltet, da zuerst alle notwendigen Informationen für die Fahrzeuginbetriebnahme in das Fahrzeug heruntergeladen werden (3). Dieser initiale Datenversand schließt auch alle nötigen Informationen für das Konfigurieren mit ein, sodass das Fahrzeug anschließend unabhängig von einer Cloud seine Inbetriebnahme durchführen kann.

Die Inbetriebnahme startet durch den elektrischen Steckvorgang der Komponente (4). In Abbildung 61 ist das damit korrespondierende Vorgehen gezeigt. Grundsätzlich werden drei aufeinanderfolgende Prozessschritte definiert: Prüfen, Konfigurieren und Einstellen.



**Abbildung 61:** Vorgehen bei dem prozessgesteuerten Ansatz [DAI15b]

Zunächst muss überprüft werden, ob das Steuergerät einsatzbereit ist. Wie im Stand der Technik dargestellt, führen bereits die Zulieferer aufwändige Qualitätskontrollen an ihren elektrischen Komponenten durch. So können schon vorzeitige Defekte in den Komponenten identifiziert werden. In der Fahrzeugmontage werden dann die meist zuvor geprüften elektrischen Komponenten und ihre Peripherien miteinander kontaktiert, so dass eine weitere Fehlerquelle entsteht. Die Steuergeräte sind jedoch in der Lage, nicht kontaktierte elektrische Komponenten und Peripherien selbst anzuzeigen.

Das hier beschriebene Konzept soll genau diese Information der Produktion frühzeitig zur Verfügung stellen, damit Fehler zeitnah nach der elektrischen Kontaktierung der Komponente und Peripherie identifiziert und behoben werden können. Eine späte Nacharbeit ist mit sehr hohem Aufwand verbunden, weil bedingt durch den fortschreitenden Aufbauzustand des Fahrzeugs die elektronischen Komponenten immer schwieriger zugänglich sind.

Dabei muss ebenfalls sichergestellt werden, dass die korrekte Hardware-Komponente verbaut ist. Zwar werden heutzutage Steuergerätevarianten überwiegend über Software-Schalter gebildet (vgl. Stand der Technik), allerdings lässt es sich oftmals nicht vermeiden, unterschiedliche Hardware-Varianten der elektronischen Komponenten im Fahrzeug zu verbauen. Dementsprechend sollte sehr früh überprüft werden, ob die richtige Komponente verbaut ist.

Wenn der Prüfprozess erfolgreich durchlaufen ist, werden die Ergebnisse der Inbetriebnahmecloud kommuniziert und das Konfigurieren und Einstellen eingeleitet. Da zuvor die Prüfung durchgeführt wurde, kann diese Information direkt beim Konfigurieren

ren und Einstellen verarbeitet werden. Wenn eine Prüfung, wie zum Beispiel der erfolgreiche Verbau eines Steuergeräts, erfüllt ist, kann der jeweilige nächste Inbetriebnahmeschritt gestartet werden.

Prinzipiell wird zuerst eine Konfiguration vor dem Einstellen durchgeführt. Dazwischen wird die Information über den Erfolg der Konfiguration abgelegt und vor dem Durchführen des Einstellens wieder als Vorbedingung kontrolliert. Durch diesen kaskadenartigen Aufbau sollen Fehler schnell präsent gemacht und fehlerhafte Inbetriebnahmen vermieden werden.

Bei einigen Inbetriebnahmeschritten ist eine Interaktion mit dem Produktionsmitarbeiter notwendig. Um Informationen vom Fahrzeug dem Mitarbeiter mitzuteilen, können fahrzeugeigene Displays verwendet werden. Sollte der Mitarbeiter außerhalb des Fahrzeugs stehen, können zudem Fahrzeugleuchten, wie beispielsweise der Blinker, für eine Informationsdarstellung verwendet werden. Weitere Möglichkeiten für eine Informationsdarstellung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 2:** Möglichkeiten zur Gestaltung einer Informationsdarstellung

<b>Informationsdarstellung</b>	<b>Beschreibung</b>
Displays vom Infotainment-System	Da im Produktionsbetrieb die Displays nicht verwendet werden, können dort Informationen über die Inbetriebnahme angezeigt werden.
Blinker	Der Blinker ist von außen gut sichtbar und ist mit seiner Warnfarbe gut zu erkennen.
Scheinwerfer	Scheinwerfer können mittlerweile auch Bilder projizieren. Sie können allerdings auch die Produktionsmitarbeiter blenden.
Ambientelicht	Das Ambientelicht kann durch mehrere Farben im Fahrzeuginnenraum sehr gut Informationen übermitteln.
Bremslicht	Das Bremslicht ist von hinten gut sichtbar.
Lautsprecher	Die Fahrzeuglautsprecher können von innen und außen hörbare akustische Signale versenden. Allerdings könnte dies zur einer erhöhten Lärmbelastigung der Produktionsmitarbeiter führen.

Muss der Mitarbeiter nun Inbetriebnahmeschritte quittieren, kann er/sie Eingaben über das Infotainment System machen. Aber auch hier kann eine Inbetriebnahme von außen durch außenliegende Sensoren, wie zum Beispiel dem Türgriff, bestätigt werden. Mögliche Informationseingaben sind im Nachfolgenden gezeigt.

**Tabelle 3:** Möglichkeiten zur Gestaltung einer Informationseingabe

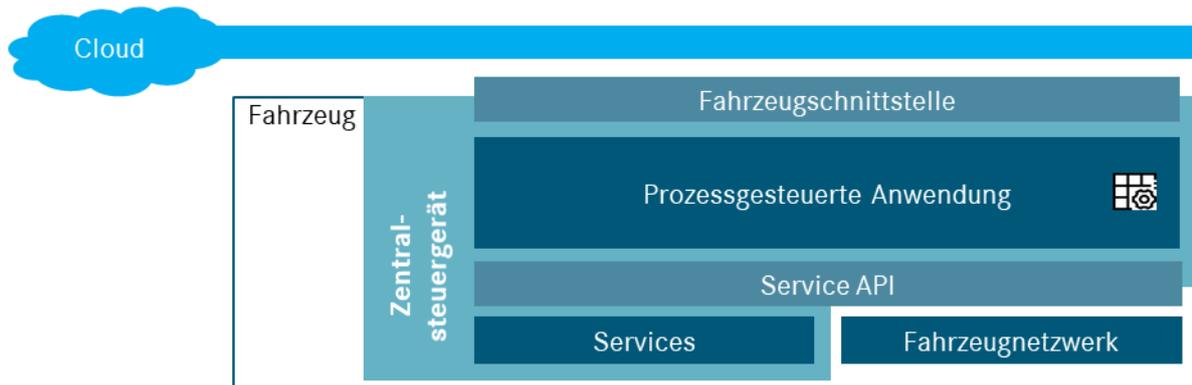
Informationseingabe	Beschreibung
Touch/Tasten am Infotainmentsystem	Prinzipiell können alle Tasten sowie auch Touchbildschirme vom Infotainmentsystem im Fahrzeug genutzt werden, da sie in der Produktion sonst keine Verwendung haben.
Blinkerhebel am Lenkrad	Wenn Mitarbeiter das Fahrzeug während der Inbetriebnahme fahren müssen, eignet sich der Blinkerhebel am Lenkrad als ideale Eingabe.
Fensterheberschalter	Sofern die Tür zu diesem Prozessschritt verbaut ist, kann der Fensterheberschalter ergonomisch gut erreicht werden.
Türgriff	Für alle Tätigkeiten außerhalb des Fahrzeugs bietet sich der Türgriff als Eingabemöglichkeit an. Auch hier müssen dazu die Türen verbaut sein.
Kofferraumschließknopf	Bei Arbeiten am Heck kann der Kofferraumschließknopf am Kofferraumdeckel betätigt werden.
Ultraschallsensor	Eine etwas unkonventionelle Lösung stellt die Eingabe über die Ultraschallsensoren dar. Dabei muss gewährleistet werden, dass sie nicht versehentlich von fahrzeugnahen Gegenständen beeinflusst werden.

Wenn zum Schluss alle notwendigen Inbetriebnahmeschritte durchgeführt sind, müssen die absolvierten Prozesse beim Hersteller dokumentiert werden. Dazu sendet das Fahrzeug die Ergebnisse an die Inbetriebnahmecloud und baut anschließend die Kommunikation zur Cloud sowie zum Produktionsnetzwerk ab (6). Dies umfasst ebenso das Löschen der Zertifikate im Fahrzeug.

Damit die dargestellten Prozesse im Fahrzeug durchgeführt werden können, muss eine entsprechende Anwendung für das Fahrzeug entwickelt werden. Die Umsetzung dieser Anwendung soll im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

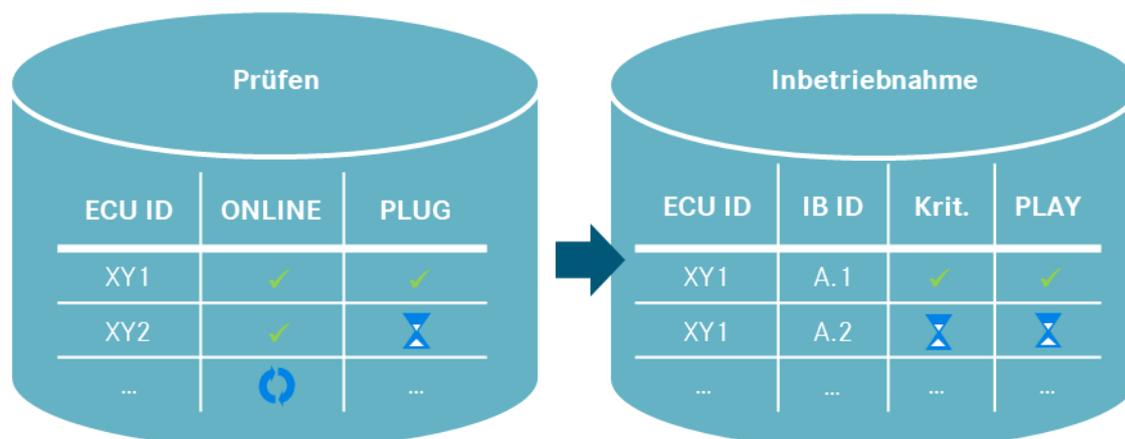
### 6.4.2 Umsetzung

Damit eine prozessgesteuerte Inbetriebnahme im Fahrzeug durchgeführt werden kann, muss in das Fahrzeug eine entsprechende Anwendung mit Zugang zur Service API zur fahrzeuginternen Inbetriebnahme entwickelt werden. Da im Rahmen des Trends der Hochintegration von Steuergeräten (vgl. Stand der Technik) auch Kapazitäten für solche Anwendungen in einem Zentralsteuergerät zur Verfügung stehen, baut das nachfolgende technische Konzept auf einer entsprechenden Lösung auf. Natürlich könnte man die Logik auch in andere Steuergeräte übertragen, allerdings ist dies auf Grund der eingeschränkten Steuergerätearchitektur mit mehr Aufwand verbunden.



**Abbildung 62:** Einordnung der Anwendung im Fahrzeug

Die Anwendung kann also mit der Service API des Zentralsteuergeräts kommunizieren. Diese Service API wurde bereits im Rahmen des fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystems vorgestellt. Zudem hat die Anwendung zeitgleich auch einen Vernetzungszugang zur Inbetriebnahmecloud. Somit kann sie autark von der Cloud arbeiten und die zuvor gezeigten Prozessschritte durchlaufen. Wie das konkret aussieht, ist in der nächsten Abbildung gezeigt.



**Abbildung 63:** Systembeschreibung der prozessgesteuerten Anwendung

Zur Systembeschreibung in gehören zwei unterschiedliche Datenbanken. In der Prüf-Datenbank werden zunächst alle neugefundenen Steuergeräte (ECUs) mit ihrer Identifikation sowie ihrer Adressierung (aus leserlichen Gründen hier nicht in der Darstellung gezeigt) aufgenommen. Um die Datenbank zu füllen, wird zwischen zwei Anwendungsfällen unterschieden:

1. Alle zu verbauenden Steuergeräte gelangen über den initialen Datenversand aus der Cloud in die Prüf-Datenbank
2. Ein eigenständiger Suchprozess in der Anwendung ermittelt kontinuierlich neu angeschlossene Steuergeräte

Bei der initialen Datenversorgung entsteht schon am Anfang des Inbetriebnahmeprozesses eine vollständige Zielliste an Steuergeräten. Somit kann direkt überprüft werden, ob das richtige Steuergerät verbaut ist und ob am Ende des Montageprozesses das Fahrzeug dem Zielzustand entspricht.

Bei dem alternativen Suchprozess sendet die Anwendung spezielle Botschaften an alle Steuergeräte. Alle am Fahrzeug angeschlossenen aktiven Steuergeräte antworten dann auf diese Botschaft mit ihrer Identifikation. Ergo können somit neuverbaute Steuergeräte gefunden werden und in die Prüf-Datenbank eingetragen werden. Allerdings lässt dieser Prozess keinen Vergleich mit einem Zielzustand zu. Ein Abgleich des Zielzustandes mit der Inbetriebnahmecloud muss nachgelagert stattfinden.

Wenn nun ein neues Steuergerät erkannt (online) wird, beginnen die Prüfungen der eigenen Kontaktierung sowie der zugehörigen Peripherie. Nach erfolgreicher Kontaktierungsprüfung über Auslesen des Fehlerspeichers über den entsprechenden Service wird das Steuergerät in die Inbetriebnahme-Datenbank überführt.

Die Inbetriebnahme-Datenbank ist die Grundlage für die Inbetriebnahmeschritte Konfiguration und Einstellen der Steuergeräte. Anhand dieser Datenbank sind die zu verrichtenden Inbetriebnahmeschritte je nach Steuergerät aufgezeigt. Auch hier gibt es zwei Arten der initialen Befüllung der Datenbank:

1. Standardreihenfolge: Zuerst Konfigurieren und anschließend Einstellen
2. Bei speziellen Inbetriebnahmen müssen die Informationen der einzelnen Schritte über die initiale Datenversorgung in die Anwendung gelangen

Natürlich existieren noch Vorbedingungen für die einzelnen Inbetriebnahmeschritte. Hier kann zum Beispiel die Reihenfolge der Peripheriekontaktierung ausgewertet werden. Erst wenn diese Vorbedingungen erfüllt sind, können danach die Inbetriebnahmeschritte über den entsprechenden Service durchgeführt werden.

Nach Abschluss der Inbetriebnahme werden die Ergebnisse für die anschließende Dokumentation bereitgestellt. Dazu nimmt die Anwendung Kontakt mit der Inbetriebnahmecloud auf und versendet die Ergebnisdaten.

Mit dieser Prozessreihenfolge wird die prozessgesteuerte Inbetriebnahme durchgeführt. Um ferner diesen neuartigen Prozess mit dem aktuellen und ablaufgesteuerten Inbetriebnahmeprozess zu vergleichen, wird der Prozess im Folgenden anhand des Türsteuergeräts im Fahrzeug mit den anderen Prozessen erprobt.

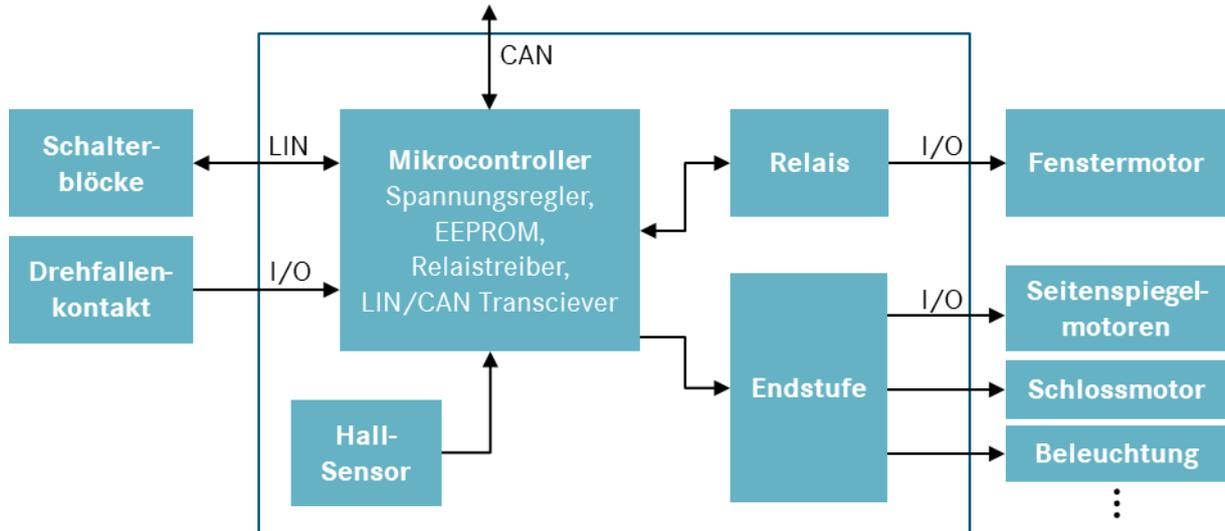
## 6.5 Erprobung der Prozesse

Die Erprobung der heutigen und zukünftigen ablaufgesteuerten sowie der prozessgesteuerten Inbetriebnahme soll im Folgenden anhand des Türsteuergeräts erprobt und anschließend bewertet werden. Das Türsteuergerät eignet sich hervorragend für eine Erprobung, da es einen großen Funktionsumfang aufweist, welcher im Rahmen der Inbetriebnahme geprüft und eingestellt werden muss. Daher soll nun kurz auf den Aufbau, die Funktionen sowie auf die Inbetriebnahme des Türsteuergeräts eingegangen werden, sodass anschließend die ablaufgesteuerte und prozessgesteuerte Inbetriebnahme daran angewendet werden kann. Zum Schluss werden die für die Inbetriebnahme anfallenden Zeitanteile ermittelt und verglichen.

### 6.5.1 Beschreibung des Türsteuergeräts

In erster Linie umfasst die Funktion eines Türsteuergeräts die Ansteuerung der elektrischen Fensterheber (mit Überschusskraftbegrenzung), der Spiegel (Verstellung, Heizung, usw.), der Schalterblöcke für Bedieneinheiten sowie ihrer Funktionsbeleuchtung. Des Weiteren enthält es in der Regel die Ansteuerung des in der Tür befindlichen Schlosses und den Drehfallkontakten zur Erkennung des Schlosszustandes. [REI14]

In Abbildung 64 ist der Aufbau eines Türsteuergeräts dargestellt. Das Türsteuergerät überwacht analoge sowie digitale Eingänge der in der Tür verbauten Schalter und den Zustand verschiedener Verbraucher (z. B. Schlosszustand über Drehfallkontakt oder Lampenzustand über Spannungsmessung). Darüber hinaus wird der LIN-Bus häufig verwendet, um mit Schalterblöcken in der Tür zu kommunizieren. Der dazugehörige LIN und CAN -Transceiver ist mit dem Spannungsregler, dem Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM) sowie dem Relaisreiber in einem Mikrocontroller integriert. Im EEPROM werden Fertigungsdaten, Fahrzeugdaten und Parameter des Fensterhebersystems abgelegt. Einige dieser Parameter werden für die Algorithmen zur Berechnung der Überschusskraft benötigt. [REI14]



**Abbildung 64:** Aufbau eines Türsteuergeräts nach [REI14]

Über den Relaisreiber erfolgt die Ansteuerung des Relais für den Fenstermotor. Mittels der Rückführleitungen zum Mikrocontroller kann eine Relaisdiagnose, um das mögliche Versagen des Fenstermotors erfassen zu können und Gegenmaßnahmen zu ergreifen, durchgeführt werden. Die Hall-Sensoren geben zu jedem Zeitpunkt Auskunft über die Position des Fenstermotors. Ferner werden über die Endstufen Aktoren, wie beispielsweise für die Verstellung der Seitenspiegel, sowie die Lampen für die Suchbeleuchtung, angesteuert. [REI14]

Im Rahmen der Inbetriebnahme des Türsteuergeräts werden mehrere Schritte, wie in Abbildung 65 dargestellt, durchgeführt. Nach dem Verbau des Steuergeräts werden zunächst die elektrischen Kontaktierungen geprüft, da das Steuergerät über mehrere Peripherieelemente verfügt.



**Abbildung 65:** Inbetriebnahmeschritte bei dem Türsteuergerät

Das Steuergerät prüft dabei automatisch über einen Kurzschlussstest, ob diese Elemente angeschlossen sind. Des Weiteren muss im Rahmen der Inbetriebnahme die Identität des Steuergeräts überprüft und der Fehlerspeicher ausgelesen werden. Einige Elemente wie zum Beispiel der Spiegelmotor müssen dazu aktiv verfahren werden. Eine Fehlkontaktierung wird im steuergeräteeigenen Fehlerspeicher hinterlegt.

Danach erfolgt im Rahmen des Einstellens die Adaption der Scheibenposition. Zur zuverlässigen Bestimmung der Scheibenposition und der Überschusskraft werden zwei Hall-Sensoren unter einem auf die Motorwelle aufgedrückten mehrpoligen Ringmagneten verwendet. Die Sensoren nehmen dabei unabhängig von der Stromstärke des Motors die Drehzahl und Drehrichtung auf. Aus der Drehzahl und der Stromstärke lässt sich dann auf die Änderung der Verschiebekraft der Fensterscheibe schließen und somit ihre Maximalstellung berechnen. Diese wird nach der Adaption in das EEPROM automatisch zurückgeschrieben. [REI14]

Die hierbei gezeigte Inbetriebnahme des Türsteuergeräts soll zum einen nun ablaufgesteuert, basierend sowohl auf dem heutigen Inbetriebnahmesystem wie auch auf dem cloudgesteuerten Inbetriebnahmesystem, durchgeführt werden. Zum anderen soll auch eine Anwendung der prozessgesteuerten Inbetriebnahme des Türsteuergeräts basierend auf dem fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystem stattfinden. Dabei werden die einzelnen Prozesszeiten nach ihrer Wertschöpfungsart aufgenommen, sodass sie anschließend verglichen werden können.

### **6.5.2 Ermittlung und Vergleich der Zeitanteile**

Für die zuvor beschriebenen Inbetriebnahmeprozesse lassen sich nun die Arten und Zeitanteile der Wertschöpfung anhand der Inbetriebnahme des Türsteuergeräts ermitteln. Zunächst wird auf den aktuellen Inbetriebnahmeprozess eingegangen. Der Prozess basiert auf dem heutigen Inbetriebnahmesystem und ist ablaufgesteuert. Die vom Montagemitarbeiter abhängigen Zeiten werden dabei über die Zeitberechnungsmethodik Methods-Time Measurement konform ermittelt und orientieren sich an einem Inbetriebnahmeablauf im Inneneinbau der Montage. [SYS07]

Im Rahmen der Vor- und Nachbereitung der Inbetriebnahme fallen einerseits Zeiten für den Transport des Inbetriebnahme-Testgeräts sowie die prüfsystemabhängigen Startzeiten an. Als eine Besonderheit gilt die heutige Identitätsprüfung, die generell in jedem Ablauf für alle Steuergeräte durchgeführt wird.

In der nachfolgenden Tabelle sind die aufgenommenen Zeitanteile und Wertschöpfungsarten für den heutigen Inbetriebnahmeprozess gezeigt.

**Tabelle 4:** Art und Zeitanteil der Wertschöpfung im heutigen Inbetriebnahmeprozess

Rang	Ablauf	Typ I	Typ II	Typ III
1	Inbetriebnahme-Testgerät aus der Ladestation zum Fahrzeug bringen			9%
2	Inbetriebnahme-Testgerät im Fahrzeug positionieren und Kabel mit OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs verbinden			7%
3	Systemseitige Inbetriebnahme Vorbereitung			13%
4	Inbetriebnahme Instanz führt Scheibeneinstellung durch	29%		
5	Inbetriebnahme Instanz führt Identitäts- und Kontaktierprüfungen für den gesamten Fahrzeugaufbauzustand durch		28%	
6	Kabel des Inbetriebnahme-Testgeräts von OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs trennen und aus Fahrzeug entfernen			5%
7	Inbetriebnahme-Testgerät zur Ladestation zurückbringen und in die Ladestation legen			9%
	<b>Summe: 100%</b>	29%	28%	43%

Das Ergebnis der Betrachtung der Wertschöpfung ergibt, dass über 40 Prozent des heutigen Inbetriebnahmeprozesses als nicht wertschöpfend eingestuft werden kann und dementsprechend zu eliminieren ist. Ebenso zählen knapp ein Drittel der Gesamtprozessdauer zu unterstützenden Prozessen und sollten möglichst reduziert werden. Besonders durch die Identifikationsprüfung für alle Steuergeräte in jedem Ablauf kommt hierbei ein hoher Zeitanteil zustande.

Ein neuer ablaufgesteuerter Inbetriebnahmeprozess kann, wie zuvor beschrieben, auch durch das cloudgesteuerte Inbetriebnahmesystem ermöglicht werden. Dabei wird kein Inbetriebnahme-Testgerät mehr eingesetzt. Dementsprechend fallen die manuellen Vor- und Nachbereitungsschritte weg. Lediglich die prüfsystemabhängigen Startzeiten werden dennoch gemessen, da der ablaufgesteuerte Inbetriebnahmeprozess fast den gleichen Inbetriebnahmeablauf wie beim heutigen Inbetriebnahmeprozess verwendet.

Die für die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme ermittelten Zeitanteile sowie Wertschöpfungsarten sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 5:** Art und Zeitanteil der Wertschöpfung in der ablaufgesteuerten Inbetriebnahme

Rang	Ablauf	Typ I	Typ II	Typ III
1	Fahrzeug meldet sich beim Produktionsnetz an			<2%
2	Cloud baut eine Inbetriebnahme Instanz und einen Kanal zum Fahrzeug auf			13%
3	Inbetriebnahme Instanz führt Identitäts- und Kontaktierprüfungen für den gesamten Fahrzeugaufbauzustand durch		41%	
4	Inbetriebnahme Instanz führt Scheibeneinstellung durch	42%		
5	Cloud baut am Ende der Produktion Inbetriebnahme Instanz ab			<1%
6	Fahrzeug entkoppelt sich vom Produktionsnetz			<1%
	<b>Summe: 100%</b>	42%	41%	17%

Aus der Tabelle 5 ist zu erkennen, dass der nicht wertschöpfende Zeitanteil nur noch bei 17 Prozent liegt. Daher ist durch die Weiterentwicklung zu einem cloudgesteuerten System eine deutliche Eliminierung der nicht wertschöpfenden Prozesse zu beobachten. Allerdings sind die wertschöpfenden und unterstützenden Prozessanteile noch immer gleich groß. Nach der eingehenden Definition sind die unterstützenden Prozessanteile ferner zu reduzieren. Abhilfe soll hier die prozessgesteuerte Inbetriebnahme mit dem fahrzeuggesteuerten System bringen.

Dieser Inbetriebnahmeprozess startet mit Kontaktierung der zusammengebauten Tür und somit auch des Türsteuergeräts, da das Türsteuergerät üblicherweise vor der Montage im Gesamtfahrzeug bereits in der Tür verbaut ist [KRA00]. Durch eine vorherige Kommunikation mit der Cloud werden lediglich bestimmte Daten, wie die Reihenfolge der Inbetriebnahme und der Soll-Aufbauzustand des Fahrzeugs ausgetauscht. Im Rahmen der darauffolgenden Prüfung erfolgt die steuergerätespezifische Identitätsprüfung sowie das Auslesen der Fehler. Anders als bei der ablaufgesteuerten Inbetriebnahme wird an dieser Stelle nicht die gesamte Ausstattung des Fahrzeugs, sondern nur die Identität des neu kontaktierten Steuergeräts sowie der Peripherie überprüft. Des Weiteren wird hier angemerkt, dass das vorherige Ansteuern der Komponenten für das Fehlerlesen nicht betrachtet wird, da dieser Zeitbaustein in allen Prozessen identisch wäre.

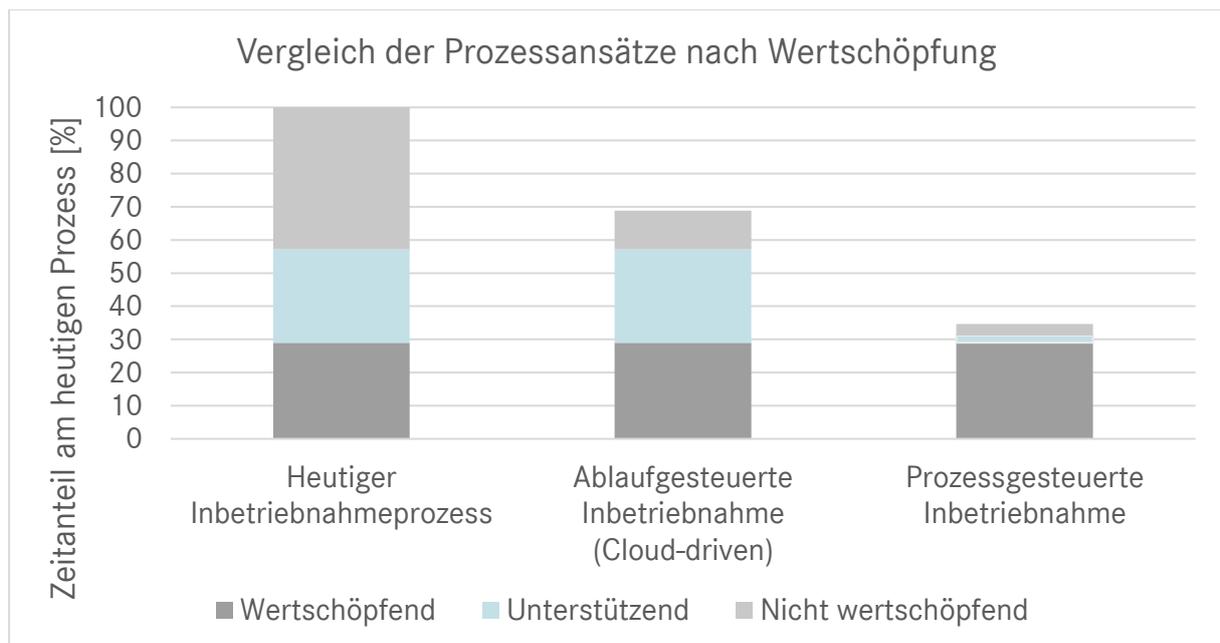
Im anschließenden Prozessschritt wird die Scheibe über das Adaptionsverfahren eingestellt. Die entsprechenden Zeitenanteile und Wertschöpfungsanteile sind in der folgenden Tabelle anteilig dargestellt.

**Tabelle 6:** Art und Zeitanteil der Wertschöpfung in der prozessgesteuerten Inbetriebnahme

Rang	Ablauf	Typ I	Typ II	Typ III
1	Fahrzeug meldet sich beim Produktionsnetz an			<7%
2	Cloud versorgt Fahrzeug mit inbetriebnahmespezifischen Daten			<1%
3	Fahrzeug prüft kontaktierte Komponente		6%	
4	Fahrzeug führt Scheibeneinstellung durch	84%		
5	Fahrzeug übermittelt die Ergebnisse der Inbetriebnahme an die Cloud			<1%
6	Fahrzeug entkoppelt sich vom Produktionsnetz			<1%
	<b>Summe: 100%</b>	84%	6%	10%

Nach Tabelle 6 konnten die nicht wertschöpfenden Zeitanteile für die prozessgesteuerte Inbetriebnahme weiter eliminiert werden und betragen nun nur noch 10 Prozent der Prozesszeit. Darüber hinaus konnten ebenfalls die unterstützenden Zeitanteile im Vergleich zum wertschöpfenden Anteil auf 6 Prozent reduziert werden.

Um nun alle drei Prozesse besser vergleichen zu können, werden sie in Abbildung 66 in prozentualer Abhängigkeit zum heutigen Inbetriebnahmeprozess dargestellt.



**Abbildung 66:** Vergleich der im Rahmen der Arbeit untersuchten Inbetriebnahmeprozesse

Es ist zu erkennen, dass der heutige Inbetriebnahmeprozess, bedingt durch seine manuellen Vor- und Nachbereitungsschritte, den größten Anteil an nicht wertschöpfenden Prozessen aufweist. Die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme mit dem cloudgesteuerten Inbetriebnahmesystem zeigt bereits einen geringeren Anteil an nicht wertschöpfenden Prozessen. Da jedoch der Inbetriebnahmeablauf nahezu identisch mit dem heutigen Inbetriebnahmeprozess ist, sind auch die wertschöpfenden und unterstützenden Anteile unverändert. Die prozessgesteuerte Inbetriebnahme kann allerdings durch die vollständig neue Herangehensweise den unterstützenden Anteil weiter reduzieren. Somit hat dieser Prozess die kleinsten Zeitanteile gegenüber den anderen zwei Prozessen.

Allerdings kann die prozessgesteuerte Inbetriebnahme nur durch eine Kontaktierung des Steuergeräts gestartet werden. Unter bestimmten Umständen, wie einer fehlenden Energieversorgung im Fahrzeug, ist dies allerdings nicht möglich. Daher wird im folgenden Kapitel eine kombinierte Variante aus der ablaufgesteuerten und prozessgesteuerten Inbetriebnahme vorgestellt.

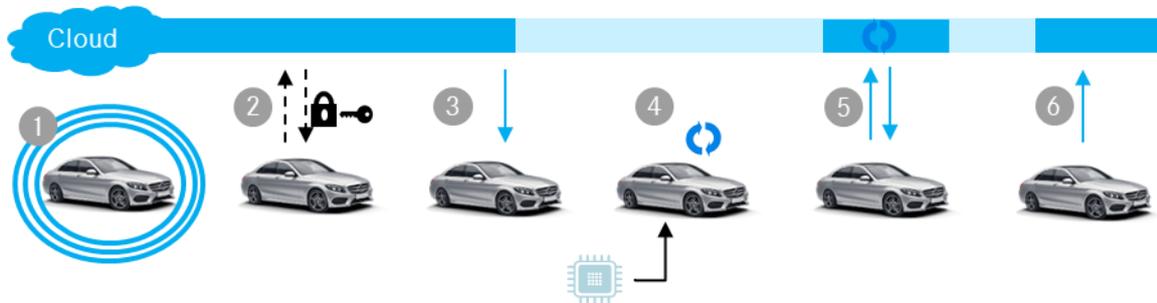
## 6.6 Kombiniertes Inbetriebnahmeprozess

Die zuvor vorgestellten Prozesse sind untereinander sehr unterschiedlich. Die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme, basierend auf dem cloudgesteuerten System, läuft nach einem festgelegten Ablauf an bestimmten Stationen ab. Die prozessgesteuerte Inbetriebnahme, basierend auf dem fahrzeuggesteuerten System, hat dagegen keinen festen Ablauf, sondern orientiert sich direkt an dem Montageprozess im Fahrzeug.

Diese zwei Prozesse haben ihre Vor- und Nachteile. Einerseits ist die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme für das einzelne Fahrzeug sehr starr und unflexibel. Besonders, wenn es zu Änderungen im Montageablauf kommt, muss der Prozess mit großem Aufwand angepasst werden. Andererseits ist der Prozess sehr robust, da er auch durch die große Rechenressource in der Cloud sehr komplexe Inbetriebnahmeabläufe steuern kann. Der Einsatz der prozessgesteuerten Inbetriebnahme hingegen eignet sich bei flexiblen Montageprozessen, da die Reihenfolge der Inbetriebnahmeschritte durch den tatsächlichen Montageprozess festgelegt wird. Nachteilig ist demgegenüber die begrenzte Komplexität der Inbetriebnahme, da sie nur eingeschränkt mit der Infrastruktur, wie Prüfständen, kommunizieren kann.

Um einen Kompromiss aus beiden Prozessen zu erwirken, wird an dieser Stelle eine Kombination vorgeschlagen. Ein möglicher Prozess ist folgendermaßen skizziert.

#### Fließbandproduktion in der Montage



**Abbildung 67:** Darstellung eines kombinierten Inbetriebnahmeprozesses [DAI17b]

Der Anfang des kombinierten Prozesses verläuft identisch zu den beiden anderen Prozessen. Das Fahrzeug sucht das Produktionsnetzwerk und meldet sich an (1-2). Anschließend verbindet es sich mit der Cloud und lädt sich die inbetriebnahmespezifischen Daten aus der Cloud herunter (3). Diese werden später verwendet, um die prozessgesteuerte Inbetriebnahme im Fahrzeug durchzuführen. Gleichzeitig bereitet die Cloud eine Inbetriebnahmeinstanz für die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme vor, indem sie alle dafür notwendigen Fahrzeugverbindungsdaten bereithält. Zunächst wird eine prozessgesteuerte Inbetriebnahme nach dem zuvor beschriebenen Ablauf durchgeführt (4). Danach folgt die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme, indem die Cloud die Inbetriebnahmeinstanz mit den bekannten Verbindungsdaten des Fahrzeugs aufbaut (5). Die Reihenfolge ist dabei nicht entscheidend, denn die Cloud bindet die prozessgesteuerte Inbetriebnahme als eine Art Ablauf in ihren Gesamtablauf ein.

Zum Schluss werden die Ergebnisdaten aus der prozessgesteuerten Inbetriebnahme aus dem Fahrzeug mit den Daten der ablaufgesteuerten Inbetriebnahme in der Cloud für die Dokumentation zusammengetragen und archiviert (6).

Der kombinierte Prozess soll zeigen, dass auch eine gemeinsame Lösung mit beiden Prozessen möglich ist. Dabei nutzen beide Prozesse ihren jeweiligen Vorteil aus. Somit profitiert die kombinierte Inbetriebnahme von der Flexibilität aus der prozessgesteuerten Inbetriebnahme und von der Robustheit der ablaufgesteuerten Inbetriebnahme.

## 6.7 Zusammenfassung des Kapitels

Um das zuvor dargestellte Inbetriebnahmesystem in die produktionstechnische Prozesslandschaft zu überführen, wurden in diesem Kapitel zunächst die unterschiedlichen Wertschöpfungsarten, die im Zusammenhang mit dem Inbetriebnahmeprozess stehen, vorgestellt. Darauf aufbauend wurde der aktuelle Inbetriebnahmeprozess sowie seine Wartungsaufgaben diskutiert und daraus neue Inbetriebnahmeprozesse basierend auf den neuen Inbetriebnahmesystemen abgeleitet.

Dabei wird im Wesentlichen zwischen zwei Prozessarten unterschieden. Die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme verläuft nach einem geplanten Ablauf in bestimmten Montagestationen. Die prozessgesteuerte Inbetriebnahme richtet sich hingegen nach dem Montageprozess und startet direkt nach dem Verbau der elektrischen Komponenten.

Damit die vorgestellten Prozesse gegeneinander bewertet werden können und überprüft werden kann, ob sie zu einer Verbesserung der Wertschöpfung führen können, wurden alle drei Prozesse anhand des Türsteuergeräts erprobt. Dazu wurden die Zeitelemente und Wertschöpfungsarten für jeden Prozess während der Erprobung aufgenommen und anschließend verglichen.

Beim Vergleich ergab sich, dass der heutige Inbetriebnahmeprozess bedingt durch seine manuellen Vor- und Nachbereitungsschritte den größten Anteil an nicht wertschöpfenden Prozessen aufweist. Die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme zeigte bereits einen geringeren Anteil an nicht wertschöpfenden Prozessen. Jedoch ist der Inbetriebnahmeablauf nahezu identisch mit dem heutigen Inbetriebnahmeprozess. Deshalb sind auch die wertschöpfenden und unterstützenden Anteile relativ zueinander unverändert.

Durch die vollständig neue Herangehensweise bei der prozessgesteuerten Inbetriebnahme wurden die unterstützenden Anteile weiter reduziert. Sie hat somit den kleinsten Gesamtzeitanteil gegenüber den anderen zwei Prozessen.

Da die prozessgesteuerte Inbetriebnahme allerdings nicht direkt nach jedem Verbau der Komponenten durchgeführt werden kann, wurde zum Schluss noch der kombinierte Prozess aus der ablaufgesteuerten und prozessgesteuerten Inbetriebnahme ergänzt. Dieser soll die jeweiligen Vorteile der Inbetriebnahmeprozesse vereinen und stellt somit einen zukunftsweisenden Kompromiss dar.

Mit diesen Erkenntnissen soll die Arbeit an dieser Stelle abgeschlossen sein. Im nächsten Kapitel erfolgt eine übergreifende Zusammenfassung, sodass im darauffolgenden Unterkapitel der Forschungsausblick gegeben werden kann.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden die wesentlichen inhaltlichen Aspekte und Erkenntnisse dieser Dissertation zusammengefasst. Darüber hinaus wird ein Ausblick in die Zukunft auf Basis der erreichten Ergebnisse aufgezeigt und weiteres Forschungspotenzial aufgeführt.

### 7.1 Zusammenfassung

Das Thema der vorliegenden Dissertation umfasst die eingehende Untersuchung des technisch möglichen Vernetzungsgrades moderner Fahrzeuge mit der Produktionsinfrastruktur während der Fahrzeugmontage, um die Inbetriebnahme der elektronischen Komponenten drahtlos unter Anwendung von innovativen IT-Ansätzen und optimierten Prozessansätzen zukunftsorientiert kosten- und zeitoptimiert während des laufenden Montageprozesses durchzuführen.

Zu Beginn findet in Kapitel 1 die Darstellung der Motivation dieser Dissertation statt. Um die steigende Komplexität der zukünftigen Fahrzeuge weiterhin für die Inbetriebnahme beherrschen zu können, müssen neue Anforderungen an die E/E-Architektur sowie an die Software erfüllt werden.

Danach erfolgt in Kapitel 2 ein allgemeiner Überblick über die tendenzielle Entwicklungsrichtung im zukünftigen Fahrzeugbau mit Fokus auf ihre elektrische und elektronische Systemarchitektur. Neben der wachsenden Konnektivität bei der Kommunikation mit der Fahrzeugumgebung ist hierbei der Trend zu einer Service-orientierten Softwarearchitektur sowie der damit einhergehenden drahtlosen Software-Aktualisierung zu erkennen. Anschließend wird der Stand der Technik der Inbetriebnahme eines Fahrzeugs erläutert und die Inbetriebnahme in die Fahrzeugmontage eingeordnet.

Die Formulierung der dieser Dissertation zugrundeliegenden Forschungsfrage und die Darstellung der Vorgehensweise zur deren Bearbeitung geschehen in Kapitel 3. Darauf folgt in Kapitel 4 die Analyse der drahtlosen Vernetzungstechnologien beginnend mit der Erläuterung der diesbezüglich bestehenden Randbedingungen in der Fahrzeugmontage. Diese berücksichtigend wurden anschließend die aktuell technologisch fortschrittlichsten Vernetzungstechnologien WLAN, LTE und 5G hinsichtlich der optimalen Anwendbarkeit miteinander verglichen. Eine durchgeführte Nutzwertanalyse nach definierten betriebsspezifischen Leistungskriterien kommt zum Ergebnis, dass WLAN letztendlich das höchste Potenzial für eine optimale Vernetzung zwischen Fahrzeug und der Produktionsinfrastruktur aufweist. Dementsprechend wurde diese Vernetzungstechnologie weiter hinsichtlich der Leistungsparameter Kanalbreite, Modulationsverfahren und Anzahl der Datenströme sowohl theoretisch als auch messtechnisch untersucht und optimiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse finden anschließend Eingang in die Entwicklung eines innovativen und leistungsfähigen Inbetriebnahmesystems.

Ausgehend vom herkömmlichen Inbetriebnahmesystem wurden dazu in Kapitel 5 zwei neue IT-Systemansätze für das innovative Inbetriebnahmesystem abgeleitet und analysiert. Die cloudgesteuerte Inbetriebnahme verfolgt den Ansatz einer Virtualisierung der Anwendung in einer Cloud. Die fahrzeuggesteuerte Inbetriebnahme verspricht dagegen, unter Anwendung neuartiger IT-Protokolle das Inbetriebnahmesystem nahezu vollständig in das Fahrzeug integrieren zu können. In der anschließenden Validierung wurden beide Ansätze auf die technische Umsetzbarkeit mittels der Erkenntnisse aus der Vernetzung geprüft und vervollständigt.

Um das entwickelte Inbetriebnahmesystem in die realistische montageübliche Prozesslandschaft zu überführen, wurde in Kapitel 6 zunächst der herkömmliche Inbetriebnahmeprozess anhand seiner Wertschöpfung beschrieben und anschließend seine jeweilige systemrelevante Veränderung durch Einsatz der zwei neuen Ansätze des Inbetriebnahmesystems analysiert. Der bereits heute verwendete ablaufgesteuerte Inbetriebnahmeprozess wurde mit Hilfe des cloudgesteuerten Inbetriebnahmesystems weiterentwickelt. Als gänzlich neuer Prozess wurde die prozessgesteuerte Inbetriebnahme vorgestellt. Er wird durch den Einsatz des fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystems ermöglicht. Dieser Prozess steuert die Inbetriebnahme direkt über den Montageprozess und hat das Potenzial, die Wertschöpfung in der Produktion weiter zu steigern.

Aus der abschließenden Erprobung der neuen Inbetriebnahmeprozesse hinsichtlich der neuartigen Inbetriebnahmesysteme lässt sich schlussfolgern, dass sich durch die ablaufgesteuerte Inbetriebnahme in Kombination mit dem cloudgesteuerten Inbetriebnahmesystem bereits viele nicht wertschöpfende Tätigkeiten eliminieren lassen. Demgegenüber kann die prozessgesteuerte Inbetriebnahme mit dem fahrzeuggesteuerten Inbetriebnahmesystem die unterstützenden Anteile sogar noch weiter reduzieren. Letztendlich können sich im zum Schluss vorgestellten kombinierten Inbetriebnahmesystem beide Varianten zum gegenseitigen Vorteil ergänzen und zeigen dementsprechend, dass eine Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktion hinsichtlich Vernetzungstechnologie, Inbetriebnahmesystem und –prozess sinnvoll hinsichtlich der erzielbaren Wertschöpfungssteigerung im Montageprozess ist.

In Anlehnung an diese Dissertation lässt sich ein weiterer Forschungsbedarf, das Fahrzeug mit der Produktion zu vernetzen, ableiten, da hier grundsätzlich nur Inbetriebnahmeprozesse in der Montagelinie betrachtet wurden. In einem nächsten Schritt müssten die Ansätze des Inbetriebnahmesystems auch für die Prozesse im Einfahrbereich angewendet werden. Dies bekommt zunehmend Relevanz, da dort die Inbetriebnahme des sich neu aufmachenden Forschungsfelds der autonom sowie elektrisch fahrenden Fahrzeuge ihren Schwerpunkt aufweist.

## 7.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit behandelten Ansätze haben theoretisch und praktisch validiert gezeigt, dass sich die Vernetzung eines Fahrzeugs mit der Produktion für die Inbetriebnahme der elektronischen Komponenten in drahtloser Form grundsätzlich als sinnvoll und produktivitätssteigernd erweist. Insbesondere hinsichtlich der Entwicklungstrends bezüglich der Vernetzung, des elektrisch und autonom fahrenden Fahrzeugs sowie der Mobilitätsdienstleistungen, gewinnt ein innovatives Inbetriebnahmesystem bei modernen Fahrzeugen ebenfalls zukünftig einen hohen Stellenwert.

Nach dem Mooreschen Gesetz steigt nach wie vor die Leistungsfähigkeit der Halbleiter und der elektrischen Steuereinheiten exponentiell. Mit günstigeren und höheren Hardwareleistungen können IT-Systeme wirtschaftlich sinnvoll in immer neue Anwendungsbereiche vordringen. Für die Produktion bedeutet dies, dass die Möglichkeiten für den Einsatz von elektronik- und softwarebasierten Funktionen im Fahrzeug stetig wachsen und somit die zu übertragenden Datenmengen in das Fahrzeug zunehmen.

Insbesondere neue Anwendungen in Mobilitätsdienstleistungen lassen den Anteil an Software in Fahrzeugen durch die anhaltenden Wünsche nach höherer und differenzierterer Funktionalität weiter steigen. Dies führt zwangsläufig auch zu einer höheren Komplexität der Softwaresysteme. Um dies zu bewerkstelligen müssen noch zahlreiche Herausforderungen in Hinblick auf Beherrschbarkeit der Entwicklung und Einsatzes von Software gelöst werden. Das betrifft ebenfalls die Inbetriebnahme solcher Fahrzeuge. Jedoch zeigt die Dissertation auf, dass das Fahrzeug mittels einer drahtlosen Vernetzung durchgehend erreichbar ist. Somit kann das Fahrzeug in kürzeren Entwicklungszeiträumen auch kurzfristige Inbetriebnahmen erhalten. Im Zusammenspiel mit einer viel höheren Transparenz des Gesamtsystems trägt dies auch deutlich zu der Beherrschbarkeit der Entwicklung und Einsatzes von Software bei.

In modernen Fahrzeugen bestimmt die Software zunehmend die eigentliche Verhaltensweise des Gesamtsystems. Dadurch entstehen für einen Fahrzeughersteller auch völlig andere Entwicklungs- und Kostenstrukturen. Software wird nicht nur eine wachsende Bedeutung als Fachkompetenz in der Automobilindustrie erlangen, sondern eine schnelle Umsetzung ganz neuer softwaretechnischer innovativer Funktionen im Automobil wird zunehmend wettbewerbsentscheidend. Dementsprechend müssen sich auch die Inbetriebnahme- und Wartungsprozesse auf die schnell wachsende Bedeutung von Software ausrichten. Der überwiegende Teil der Inbetriebnahme kann durch die fortschreitende Vernetzung und der damit einhergehenden Flexibilität mit diesem Umdenken mithalten. Um elektrisch und autonom fahrende Fahrzeuge im Einfahrbereich in Betrieb nehmen zu können, erkennt die Dissertation jedoch noch weiteren Forschungsbedarf. Dieser Bereich muss sich mit der bisherigen Anlagentechnik von den hergebrachten Denkweisen und Konzepten des Maschinenbaus lösen und zukünftig auch dort neue Vernetzungskonzepte einführen.

Mit Hilfe von vernetzten Fahrzeugen kann letztendlich eine digitale Infrastruktur aus den drahtlosen mobilen Verbindungen und dem Internet entstehen. Sollten in Zukunft die Kosten für den 5G Mobilfunk dramatisch sinken, könnte diese Vernetzungstechnologie WLAN substituieren. Somit würde dies zu einem massiven Reichweiteausbau über die Grenzen der Fabrik hinaus für die Inbetriebnahme führen. Das Fahrzeug könnte mit der Produktion und dem Hersteller über den gesamten Life-Cycle eng verbunden bleiben.

## Summary and Outlook

The main content-related aspects and findings of this dissertation are summarized below. In addition, an outlook reveals future potential as well as further research topics.

### Summary

The topic of the present dissertation includes the detailed investigation of the technically possible degree of networking of modern vehicles with the production infrastructure during automotive assembly. In order to enable the wireless commissioning of the electronic components, the dissertation covers innovative IT and optimized process approaches in a future-oriented manner in terms of cost and time savings.

At the beginning in Chapter 1 and 2, there is a general overview of the trend in future vehicle development with a focus on its electrical and electronic system architecture. In addition to the growing connectivity in communication with the vehicle environment, the trend towards a service-oriented software architecture and the associated wireless software updates can be recognized. Subsequently, the state of the art for the commissioning of a vehicle is explained and the commissioning is classified in the automotive assembly. Chapter 3 summarizes the research question and presents the structural approach of this dissertation.

Followed by the analysis of wireless networking technologies in Chapter 4, there is an explanation of the relevant guard rails in automotive assembly. Considering these guard rails, the currently most technologically advanced networking technologies WLAN, LTE and 5G were then compared in terms of optimal applicability. A Scoring-Model carried out according to defined production-specific performance criteria comes to the result that WLAN ultimately has the highest potential for optimal connectivity between the vehicle and the production infrastructure. Accordingly, this networking technology is further investigated theoretically and optimized in terms of channel width, modulation method and number of data streams as performance parameters. The gained knowledge is used in the development of an innovative and high-performance commissioning system.

Based on the conventional commissioning system, two new IT system approaches for an innovative commissioning system were derived and analyzed in Chapter 5. The cloud-driven commissioning pursues the approach of virtualizing the application in a cloud. In contrast, vehicular software-driven commissioning, promises to be able to almost completely integrate the commissioning system into the vehicle using innovative IT-protocols. In the subsequent validation, both approaches were checked for technical feasibility using the knowledge gained from networking and completed.

In order to transfer the developed commissioning system into the realistic process landscape, the conventional commissioning process is first described in Chapter 6 based on its added value. Then, analyzation reveals the respective system-relevant changes towards the two new approaches of the commissioning system approaches.

The sequence-controlled commissioning process was further developed with the help of the cloud-driven commissioning system. The process-controlled commissioning is presented as a completely new approach. This approach is made possible with the use of the vehicular software-driven commissioning system. This approach controls the commissioning directly via the assembly process and has the potential to further increase value in production.

After the final testing of the new commissioning processes with the new commissioning systems, it can be concluded that sequence-controlled commissioning in combination with the cloud-driven system can already eliminate many non-value-adding activities. In contrast, process-controlled commissioning with the vehicular software-driven commissioning system can even further reduce the supporting components. Ultimately, the combination of both commissioning processes, sequence-controlled and process-controlled, shows that connecting the vehicle with production increases value with regard to the overall assembly process.

Since only commissioning processes in the assembly line were considered, there is further need for research in other areas. The presented approaches of the commissioning system would also have to be applied to the processes in the dynamic commissioning area. This is becoming more and more relevant, as the commissioning of the newly emerging research field of autonomously and electrically driving vehicles is the main focus in this area.

## Outlook

The shown approaches have validated that connecting a vehicle with the production for the commissioning of electronic components wirelessly proves to be reasonable and increases productivity. An innovative commissioning system will also gain a high level of importance in modern transportation trends in the future, particularly with regard to networking, electrically and autonomous driving vehicles as well as mobility services.

According to Moore's law, the performance of semiconductors and electrical control units continues to increase exponentially. With cheaper and higher hardware performance, IT systems can penetrate into new areas of application in an increasingly economically sensible way. For production, this means that the possibilities for the use of electronic and software-based functions in the vehicle are constantly growing and thus, the amount of data to be transferred into the vehicle is increasing.

In particular, new applications in mobility services are causing growing data flows and more differentiated functionalities. This inevitably leads to a higher complexity of the software systems. In order to accomplish this, numerous challenges have to be solved with regard to the controllability of the development and use of software. This also applies to the commissioning of such vehicles. However, the dissertation shows that the production can continuously access the vehicle by means of wireless networking. In combination with a greater transparency of the overall system, this also makes a

significant contribution to the controllability of the development and use of software. This finally leads to shorter development periods.

In modern vehicles, the software increasingly determines the actual behavior of the overall system. This also creates completely different development and cost structures for manufacturers. Software will not only gain increasing importance as a technical competence in the automotive industry, but the rapid implementation of completely new software-technical innovative functions in the automobile is becoming increasingly competitive. Accordingly, the commissioning and maintenance processes must also be adapted to the rapidly growing importance of software. The majority of the commissioning can keep up with this rethinking due to the progressive flexibility in networking. However, the dissertation recognizes the need for further research in order to be able to set up electrically and autonomously driving vehicles in the dynamic commissioning area. New connectivity concepts have to be introduced to rethink traditional ways of older related concepts of mechanical engineering

With help of connected vehicles, a digital infrastructure can ultimately emerge from wireless mobile connections and the internet. If the costs for 5G mobile communications should drop in the future, this networking technology could replace WLAN. Thus, this would lead to a massive expansion of the connectivity range beyond the limits of the factory. The vehicle could remain closely linked to production and the manufacturer over the entire life cycle.

## 8 Literaturverzeichnis

- [AHM15] Ahmed, Bannour; Matin, Mohammad Abdul: Coding for MIMO-OFDM in Future Wireless Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. p.1-16
- [AUT20] AUTOSAR: Automotive Open System Architecture. - [www.AUTOSAR.org](http://www.AUTOSAR.org). Website. Download am 2019-01-05
- [ARY18] Arya, Karm Veer ; Bhadoria, Robin Singh ; Chaudhari, Narendra S.: Emerging Wireless Communication and Network Technologies : Principle, Paradigm and Performance. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. pp.66
- [BAE13] Bächtold, Werner: Mikrowellentechnik : Kompakte Grundlagen für das Studium. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. S.59ff
- [BED10] Bedner, Mark; Ackermann, Tobias: Schutzziele der IT-Sicherheit. In: Aufsatz in Datenschutz und Datensicherheit (DuD). Ausgabe 5|2010, Mai 2010
- [BOR14] Borgeest, Kai: Elektronik in der Fahrzeugtechnik : Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. S.239ff
- [BSI09] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: § 8a BGBl. I S. 2821. Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Bundesamt für Justiz und Verbraucherschutz Deutschland, 2009
- [CAM17] Campolo, Claudia; Molinaro, Antonella; Iera, Antonio; Menichella, Francesco: 5G Network Slicing for Vehicle-to-Everything Services. Emerging Technology for 5G enabled vehicular networks. IEEE Wireless Communications, December 2017
- [DAI15a] Daimler: Werk Düsseldorf - Unterbaulinie, Scheibenzentrum. 15.09.2015 - <http://media.daimler.com/dcmedia/home/de>. Website. Download am 2019-01-05 - Fotonummer: 15C1024\_02, 15C1024\_05 – Bildquelle
- [DAI15b] Daimler: Mercedes-Benz F 015 Luxury in Motion. 06.01.2015 - <http://media.daimler.com/dcmedia/home/de>. Website. Download am 2019-01-05 - Fotonummer: 14C1450\_021 - Bildquelle
- [DAI16a] Daimler: Mercedes-Benz E-Klasse T-Modell. 13.09.2016 - <http://media.daimler.com/dcmedia/home/de>. Website, Download am 2019-01-05 - Fotonummer: 16C719\_01 - Bildquelle
- [DAI16b] Daimler: Generation EQ. 29.09.2016 - <http://media.daimler.com/dcmedia/home/de>. Website. Download am 2019-01-05 - Fotonummer: 16C825\_01 - Bildquelle

- [DAI17a] Daimler: Mercedes-Benz Cars auf der Tokio Motor Show 2017: Britta Seeger, Vorstandsmitglied der Daimler AG, verantwortlich für Mercedes-Benz Cars Vertrieb über CASE Strategie. 25.10.2017 - <http://media.daimler.com/dcmmedia/home/de>. Website. Download am 2020-01-010 - Fotonummer 17C859\_008 - Bildquelle
- [DAI17b] Daimler: Mercedes-Benz S 560 e. 12.09.2017 - <http://media.daimler.com/dcmmedia/home/de>. Website. Download am 2019-01-05 - Fotonummer 17C188\_02 - Bildquelle
- [DAI18] Daimler: Film und Key Visuals zeigen Aufbau und Funktionsweise von „Factory 56“: Mercedes-Benz Cars steigert mit „Factory 56“ Flexibilität und Effizienz deutlich. 15.11.2018 - <https://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/41836905>. Website. Download am 2019-01-05 – Fotonummer 18C0931\_03 - Bildquelle
- [DAN17] Danner, Florian: Befähigung zur effizienzsteigernden Produktion von Fahrzeugen : mit konventionellen und elektrifizierten Antriebssystemen durch innovative Prüf- und Inbetriebnahmeverfahren. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2017. S.15ff
- [EU17] Europäische Kommission: Maßnahmen der EU zur Verringerung der Luftverschmutzung durch Fahrzeuge: Fragen und Antworten. Factsheet. Brüssel, 31. August 2017
- [GES09] Gessler, Ralf; Krause, Thomas: Wireless-Netzwerke für den Nahbereich : eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren ; mit 44 Tabellen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2009. S.227
- [GOT16] Gottmann, Juliane: Produktionscontrolling : Wertströme und Kosten optimieren. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016. S.215ff
- [GRI18] Griemert, Rudolf; Römisch, Peter: Fördertechnik : Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. 12. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018. S.213
- [GRU19] Gruß, Florian; Brauneis, Daniel: Cloudbasierter Ansatz zur Inbetriebnahme von Fahrzeugen unter Nutzung der 5G Übertragungstechnologie. 11. Montage-Tagung. Saarbrücken, 2019
- [GRU20] Gruß, Florian; Keller, Thomas: New impetus from the commissioning of future-oriented vehicles. Montagesysteme 2020 Konferenz. Bad Nauheim, 2020
- [GUS19] Gustrau, Frank: Hochfrequenztechnik : Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019. S.34 und S.240ff

- [HAN19] Handelsblatt: Deutschland startet die Lizenzvergabe für firmeneigene 5G-Netze. Vernetzung der Industrie. Düsseldorf, 18.11.2019
- [HEL13] Hellberg, Jonas; Pettersson, Mikael: Remotely access real-time system in a modern car. Master of Science Thesis in Systems, Control and Mechatronics. Department of Signals and Systems. Division of Automatic control, Automation and Mechatronics. Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2013. p.18
- [HOF19] Hoffmann, Florian: IT-Server-Struktur im Fahrzeug. Diagnose-Tagung. Dresden, 2019
- [HOL12] Holstein, Hauke: Verteilte Dateisysteme. Proseminar Speicher- und Dateisysteme. Sommersemester 2012. Universität Hamburg, 2012. S.4ff
- [HUB16] Huber, Walter: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion : Ein Praxisbuch. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016. S.259
- [IDR11] Idrees, Muhammad Sabir; Schweppe, Hendrik; Roudier, Yves; Wolf, Marko; Scheuermann, Dirk; Henniger, Olaf: Secure Automotive On-Board Protocols: A Case of Over-the-Air Firmware Updates. In: Strang T., Festag A., Vinel A., Mehmood R., Rico Garcia C., Röckl M. (eds): Communication Technologies for Vehicles. Nets4Cars/Nets4Trains 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6596. Springer, Berlin, Heidelberg. pp.223
- [IEE09] IEEE Standard for Information technology: Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput," in IEEE Std 802.11n-2009 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, and IEEE Std 802.11w-2009) , vol., no., 29 October 2009. p.1-565
- [IEE12] IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band," in IEEE Std 802.11ad-2012 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012 and IEEE Std 802.11aa-2012) , vol., no., 28 December 2012. p.1-628
- [IEE13] IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systemsLocal and metropolitan area networks-- Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6

- GHz.," in IEEE Std 802.11ac-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, and IEEE Std 802.11ad-2012) , vol., no., 18 December 2013. p.1-425
- [ISO13400] ISO 13400-2:2019-12: Straßenfahrzeuge - Diagnosekommunikation über das Internet Protokoll (DoIP) - Teil 2: Dienste der Transport- und Netzwerkschicht, Dezember 2019
- [ISO9141-1] DIN ISO 9141:1992-04: Straßenfahrzeuge; Diagnosesysteme. Anforderungen für den Austausch digitaler Informationen, April 1992
- [ISO9141-2] ISO 9141-2:1994-02: Straßenfahrzeuge; Diagnosesysteme - Teil 2: Anforderungen von CARB zum Austausch digitaler Informationen, Februar 1994
- [ISO9141-3] ISO 9141-3:1998-12: Straßenfahrzeuge – Diagnosesysteme - Teil 3: Prüfung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und OBD-II-Tester, Dezember 1998
- [ISO14229] ISO 14229-6:2013-03: Straßenfahrzeuge - Einheitliche Diagnosedienste (UDS) - Teil 6: Einheitliche Diagnosedienste für K-Leitung Implementierungen (UDSonK-Line), März 2013
- [ISO15031] ISO 15031-3:2004: Road vehicles — Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics - Part 3: Diagnostic connector and related electrical circuits, July 2004
- [ISO15765] ISO 15765-3:2004: Road vehicles — Diagnostics on Controller Area Networks (CAN) - Part 3: Implementation of unified diagnostic services (UDS on CAN), October 2004
- [ISO22900-1] ISO 22900-1:2008: Straßenfahrzeuge - Modulare Kommunikationsschnittstelle im Fahrzeug (MVCI) - Teil 1: Hardwaredesign Anforderungen, März 2008
- [ISO22900-2] ISO 22900-2:2017: Straßenfahrzeuge - Modulare Kommunikationsschnittstelle im Fahrzeug (MVCI) - Teil 2: Diagnoseprotokoll Dateneinheit Anwendungsprogrammierschnittstelle (D-PDU API), Juni 2017
- [ISO22900-3] ISO 22900-3:2012-12: Straßenfahrzeuge - Modulare Kommunikationsschnittstelle im Fahrzeug (MVCI) - Teil 3: Diagnose Dienstanwendungsprogrammierschnittstelle (D-Server API), Dezember 2012
- [ISO22901] ISO 22901-1:2008-11: Straßenfahrzeuge - Offener Datenaustausch (ODX) - Teil 1: Spezifikation für Datenmodelle, November 2008
- [KHU16] Khurram, Muzaffar; Kumar, Hemanth; Chandak, Adi; Sarwade, Varun; Arora, Nitu; Quach, Tony: Enhancing Connected Car Adoption: Security

- and Over The Air Update Framework, 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Reston, VA, 2016. p.194-198
- [KLE12] Kleberger, Pierre: A Structured Approach to Securing the Connected Car. Thesis for the degree of licentiate of engineering. Division of Networks and Systems. Department of Computer Science and Engineering. Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2012. pp.8
- [KLJ16] Kljai, Zdenko; Škorput, Pero; Amin, Natasa: The Challenge of Cellular Cooperative ITS Services Based on 5G Communications Technology. 2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2016. p.587-594
- [KRA00] Kratzsch, Sabine: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2000
- [KRO09] Kropik, Markus: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2009
- [KOM20] Elektrotechnik Kompendium: Mobilfunktechnik (Grundlagen). WLAN - Wireless LAN - <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net> am 2020-06-27. Website. Zugriff am 2019-01-05
- [LAN18] Langheim, Jochen: Electronic Components and Systems for Automotive Applications : Proceedings of the 5th CESA Automotive Electronics Congress, Paris, 2018. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019. pp.185
- [MIT05] Mitchell, John C.: Security analysis and improvements for IEEE 802.11i. In: The 12th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS'05). Citeseer, 2005
- [MAR11] Marscholik, Christoph; Subke, Peter: Datenkommunikation im Automobil : Grundlagen, Bussysteme, Protokolle und Anwendungen. Berlin: VDE-Verlag, 2011. S.18ff
- [MCK18] McKinsey: Race 2050 - A Vision for the European Automotive Industry; Report, Center for Future Mobility, 2018
- [MOS14] Moser, Martin; Estor, Daniel; Minzlaff, Moritz; Weimerskirch, André; Wolleschensky, Lars: Operating a Car-To-X PKI - Challenges for Security and Privacy. FISITA World Automotive Congress. Maastricht, 2014
- [MUE18] Müller, Rainer; Otto, Marcel: Herausforderungen zur Funktionsabsicherung autonomer Fahrzeuge in der Produktion. Montagesysteme 2020 Konferenz. Bad Nauheim, 2020
- [NAT14] National Instruments: Introduction to Wireless LAN Measurements - From 802.11a to 802.11ac. Academic Course, 2014. pp.38

- [NIL08] Nilsson, Dennis K.; Larson, Ulf E.: Secure Firmware Updates over the Air in Intelligent Vehicles. ICC Workshops 2008. In: IEEE International Conference on Communications Workshops, Beijing, 2008. p.380-384
- [OER19] Oertel, Markus; Zimmer, Bastian: Mehr Leistung mit Autosar Adaptive. In: ATZelextronik. Ausgabe 5/2019, 2019
- [PIS16] Pischinger, Stefan; Seiffert, Ulrich: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. S.1020ff
- [QUA18] Qualcomm Wireless Academy: LTE Release 8/9 : Technical Overview. Student Guide, 2018
- [REI12] Reif, Konrad: Klassische Diesel-Einspritzsysteme : Reiheneinspritzpumpen, Verteilereinspritzpumpen, Düsen, mechanische und elektronische Regler. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012. S.472-491
- [REI14] Reif, Konrad: Automobilelektronik : Eine Einführung für Ingenieure. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. S.429ff
- [ROE14] Roesch, T.: Apps nutzen offene Telematikplattform für Flottenfahrzeuge. In: Siebenpfeiffer, Wolfgang: Vernetztes Automobil : Sicherheit - Car-IT - Konzepte. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. S.167-172
- [SAL20] Salah, Mohamed: DoIP and Advanced Diagnostics Using Ethernet in the Vehicle. Mentor Graphics - [www.mentor.com](http://www.mentor.com). Website. Zugriff am 2019-01-05
- [SAU15] Sauter, Martin: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme : LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015. S.333
- [SAU18a] Sauter, Martin: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme : LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018. S.269
- [SAU18b] Sauter, Martin: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme : LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018. S.65
- [SCH16] Schäuffele, Jörg; Zurawka, Thomas: Automotive Software Engineering : Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. S.329ff
- [SCH17] Scharnhorst, Thomas: AUTOSAR proofs to be THE automotive software platform for intelligent mobility. ELIV Congress. Bonn, 2017
- [SCH18] Schmieder, Matthias; Regius, Bernd; von Leyendecker, Bert: Qualitätsmanagement im Einkauf : Vermeidung von Produktfehlern in der Lieferkette. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018. S.45

- [SCH19] Schreiner, Rüdiger: Computernetzwerke: Von den Grundlagen zur Funktion und Anwendung. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019. S.20ff
- [SIE14] Siegmund, Gerd: Technik der Netze: Grundlagen, Verkehrstheorie, ISDN, GSM, IN. Berlin: VDE-Verlag, 2014. S.688
- [SOF16] Softing Automotive Electronics GmbH: Diagnostic Communication over Internet Protocol. Faltblatt 2016 - [www.automotive.softing.com](http://www.automotive.softing.com). Website. Zugriff am 2019-01-05
- [STE08a] Steffen, Rainer; Bogenberger, Richard; Herrscher, Daniel; Hillebrand, Joachim; Hintermaier, Wolfgang; Rahmani, Mehrnoush; Steinberg, Karl-Ernst; Winckler, Andreas: A Vision for the In-Car Network - The Internet Protocol as an Overall In-Car Communications Standard In: AT-Zelektronik. Ausgabe 5/2008; 2008
- [STE08b] Steffen, Rainer; Bogenberger, Richard; Hillebrand, Joachim; Hintermaier, Wolfgang; Hahman, Mehrnoush; Winckler, Andreas: Design and Realization of an IP-based In-car Network Architecture, First Annual International Symposium on Vehicular Computing Systems, 2008
- [STE18] Steger, Marco; Boano, Carlo Alberto; Niedermayr, Thomas; Karner, Michael; Hillebrand, Joachim; Roemer, Kay; Rom, Werner: An Efficient and Secure Automotive Wireless Software Update Framework. In: IEEE Trans. Ind. Inf. 14 (5), 2018. p.2181–2193.
- [STO14] Von Stokar, Rudolf: Software-Updates – Effiziente Nutzung von connected Cars. In: AT-Zelektronik. Ausgabe 9/2014, 2014. S.46-51
- [SUN15] Sung, Kisoong; Lee, Jeonghwan; Shin, Jaewook: Study of CAN-to-3GPP LTE gateway architecture for automotive safety in V2I environment. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Seoul, 2015. p.256-259
- [SYS07] Syska, Andreas: Produktionsmanagement: Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2007. S.98
- [TEK13] Tektronix: Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements. Primer - [www.tektronic.com/wifi](http://www.tektronic.com/wifi). Website. Download am 2019-01-05. pp.16
- [TOL08] Tolg, B.: Plattform-Software, Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug - Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen, Viewig Verlag, 2008. S.267ff
- [TRA13] Traeger, Dirk H.; Volk, Andreas: LAN Praxis lokaler Netze. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. S.187ff

- [TRA17] Traub, Matthias; Maler, Alexander; Barbehön, Kai L.: Future Automotive Architecture and the Impact of IT Trends. In: IEEE Software, vol. 34, no. 3, May-Jun. 2017. p.27-32
- [VAE19] Vaezi, Mojtaba ; Ding, Zhiguo ; Poor, H. Vincent: Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. pp.258
- [VIS19] Visualcapitalist: Millions Lines of Code - <https://www.visualcapitalist.com/millions-lines-of-code>. Zugriff am 2019-05-02
- [VOD20] Vodafone: Wir verstärken Ihr Mobilfunk-Signal - <https://www.vodafone.de/business/mobilfunk/signalverstaerker.html>. Website. Zugriff am 2019-05-02
- [WAL10] Wallentowitz, Henning; Reif, Konrad: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik : Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2010. [WEN18] Wendzel, S.: IT-Sicherheit für TCP/IP- und IoT-Netzwerke. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. S.83ff
- [WER17a] Werner, Martin: Nachrichtentechnik : Eine Einführung für alle Studiengänge. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2017. S.286ff
- [WER17b] Werner, Martin: Nachrichtentechnik : Eine Einführung für alle Studiengänge. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2017. S.373ff
- [WIF18] WiFi Alliance: Wi-Fi CERTIFIED Easy Connect : Technology Overview. Wi-Fi Alliance, 2018
- [WIL11] Wilde, Erik; Pautasso, Cesare: REST: From Research to Practice. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2011. pp.2
- [WOL18] Wolf, Fabian: Fahrzeuginformatik: Eine Einführung in die Software- und Elektronikentwicklung aus der Praxis der Automobilindustrie. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018. S.24ff
- [YAN17] Yang, Yang; Xu, Jing; Shi, Guang; Wang, Cheng-Xiang: 5G Wireless Systems : Simulation and Evaluation Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. p.2
- [ZIM14a] Zimmermann, Werner; Schmidgall, Ralf: Bussysteme in der Fahrzeugtechnik : Protokolle, Standards und Softwarearchitektur. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. S.57ff
- [ZIM14b] Zimmermann, Werner; Schmidgall, Ralf: Bussysteme in der Fahrzeugtechnik : Protokolle, Standards und Softwarearchitektur. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. S.229ff

## 9 Anhang

Arten der Vernetzungstechnologien sowie Frequenzbereich nach [PIS16]

Dienst	Frequenzbereich
Langwelle (LW)	153 . . . 279 kHz
Mittelwelle (MW)	531 . . . 1611 kHz
DRM (Digital Radio Mondiale) Ultrakurzwelle (UKW)	unterhalb 30MHz 87,5 . . . 108MHz (76 . . . 90MHz in Japan)
Fernsehen, analog (kaum noch gebräuchlich) oder digital (DVB-T: Digital Video Broadcast – terrestrial)	48 . . . 68MHz (Band I) 90 . . . 108MHz (nur Japan) 174 . . . 230MHz (Band III) 470 . . . 850MHz (Band IV/V)
DAB (Digital Audio Broadcast) bzw. DABC: digitaler Radioempfang in Europa	174 . . . 240MHz (Band III) 1452 . . . 1491MHz (L-Band)
Funkfernbedienungen für Zentralverriegelung, Standheizung und/oder heimisches Garagentor Aktive Sensoren zur Reifenfülldrucküberwachung	315MHz in Nordamerika 433MHz in Europa oder 868MHz, je nach OEM
Telefon	698 . . . 862MHz (LTE, div. Einzelbänder) 880 . . . 960MHz (GSM900) 824 . . . 894MHz (AMPS USA) 810 . . . 956MHz (PDC Japan) 1427 . . . 1447MHz (UMTS Japan) 1447 . . . 1510MHz (LTE, div. Einzelbänder) 1710 . . . 1920MHz (GSM1800, UMTS, LTE) 1850 . . . 1990MHz (PCS USA/Japan) 1920 . . . 2170MHz (UMTS, LTE) 2300 . . . 2400MHz (UMTS, LTE) 2496 . . . 2690MHz (LTE)
GPS (Global Positioning System)	1575,42MHz
GLONASS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema): Globales Satellitennavigationssystem	1602,56MHz . . . 1615,50MHz
SDARS (Satellite Digital Audio Radio Services): digitales Satellitenradio in Nordamerika	2320 . . . 2345MHz
WLAN	2400 . . . 2484MHz 5150 . . . 5725MHz
Bluetooth	2402 . . . 2482MHz
DSRC (Dedicated Short Range Communication), z. B. ETC (Electronic Toll Collect): elektronische Mauterfassung	5,8GHz (Europa)/5,9 GHz (USA)

Maximale Latenz bei unterschiedlichen Priorität bei der CAN Botschaft nach [ZIM14]

<b>CAN Priorität</b>	$n_{Data}$ <b>[byte]</b>	<b>Periodenzeit <math>T</math></b> <b>[ms]</b>	$T_{Latenz,min}$ $= T_{Frame}$ <b>[ms]</b>	$T_{Latenz,max}$ $= T_{Latenz,min} + T_{Warte,max}$ <b>[ms]</b>
1 (höchste Priorität)	1	50	0,5	1,4
2	2	5	0,6	2,0
3	1	5	0,5	2,6
4	2	5	0,6	3,2
5	1	5	0,5	3,7
6	2	5	0,6	4,3
7	6	10	0,9	5,0
8	1	10	0,5	8,6
9	2	10	0,6	9,2
10 (niedrigste Priorität)	3	10	0,7	9,9