

Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West

# Analyse der Aktivitäten und Entwicklungsfortschritte im Bereich der Fahrzeugelektronik mit Fokus auf fahrzeugeigene Betriebssysteme

# Inhaltsverzeichnis

<b>Management Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>Einführung</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Status quo der Entwicklungfortschritte im Bereich Fahrzeugelektronik mit Fokus auf fahrzeugeigene Betriebssysteme</b> .....	<b>8</b>
1.1 E/E-Architektur und Architekturentwicklungen .....	8
1.1.1 Automotive E/E-Architektur .....	8
1.1.2 Entwicklungsstand am Markt .....	13
1.2 Fahrzeugeigene Betriebssysteme .....	17
1.2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung .....	17
1.2.2 Entwicklungsstand am Markt .....	18
1.2.3 Standards, Patente, Open-Source-Initiativen und Projekte .....	29
1.2.4 Erkenntnisse und zukünftige Anforderungen .....	32
1.3 Over-the-Air-Updates .....	33
1.3.1 Motivation für OTA-Updates .....	33
1.3.2 Stand der Technik von OTA-Updates .....	34
1.3.3 Gremien und Standards .....	38
<b>2. Analyse und Vergleich der dominierenden Märkte</b> .....	<b>40</b>
2.1 Marktentwicklung und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich .....	40
2.1.1 Wichtigste Marktteilnehmer und Technologien .....	42
2.1.2 Politik und Wirtschaft .....	48
2.1.3 Gesellschaft .....	51
2.2 Chancen für nachhaltigen Markterfolg .....	52
<b>3. Trend- und Prognoseanalyse</b> .....	<b>58</b>
3.1 Megatrends und ihr Einfluss auf die Automobilindustrie .....	58
3.1.1 Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung .....	58
3.1.2 Einflüsse auf fahrzeugeigene Software .....	60
3.1.3 Einflüsse auf fahrzeugeigene Hardware .....	61
3.1.4 Einflüsse bezüglich Security, Safety und Trust .....	63
3.1.5 Sonstige Einflüsse .....	63
3.1.6 Trends aus anderen Branchen und Adaptierbarkeit auf Automobilindustrie .....	64

3.2	Prognose .....	65
3.2.1	Technologische Entwicklungen und Anforderungen an Fahrzeuge und Betriebssysteme .....	65
3.2.2	Möglichkeiten zur Erweiterung traditioneller Geschäftsmodelle der Automobilindustrie .....	68
3.2.3	Bedeutung innovativer Gesamtarchitekturen als Integrationsplattform in der Automobilindustrie .....	70
<b>4.</b>	<b>Ableitung von Maßnahmen .....</b>	<b>72</b>
4.1	Kernergebnisse der Analysen .....	72
4.1.1	Entwicklungen fahrzeugeigener Betriebssysteme .....	72
4.1.2	Entwicklungen im Gesamtmarkt .....	74
4.1.3	Trends und Prognosen für die Automobilindustrie .....	74
4.2	Handlungsoptionen .....	74
	<b>Fazit .....</b>	<b>78</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>80</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>92</b>
	<b>Impressum .....</b>	<b>93</b>

# Management Summary

Die Digitalisierung hat auf die Automobilindustrie, wie auf viele weitere Wirtschaftszweige und Lebensbereiche einen großen Einfluss. Mit Beginn des neuen Jahrtausends beschleunigte sich diese Entwicklung und eine langfristige Fortsetzung dieser Beschleunigung ist absehbar. Neben der Automatisierung und der Elektrifizierung hat dies gravierende Auswirkungen auf die Tätigkeiten von Automobilherstellern. Einerseits ändern sich die Anforderungen an die Strukturen und das Personal im Entwicklungsprozess, andererseits dringen kontinuierlich neue Firmen aus der Digitalwirtschaft in den Kernbereich der Original Equipment Manufacturer (OEMs) vor.

Gleichzeitig mit den veränderten technischen Randbedingungen kommen neue gesellschaftliche Entwicklungen hinzu. Es entstehen wachsende Anforderungen an Konnektivität und Automatisierung von Fahrzeugen, womit veränderte Kundenerwartungen einhergehen. Diese Veränderungen üben einen starken Einfluss auf die technische Architektur von Fahrzeugen aus. Die Kommunikationsschnittstellen eines Fahrzeugs zur Außenwelt und seine Anbindung an das Internet werden zu Bedingungen für zukunftsfähige Mobilität.

**In diesem Themenpapier werden der aktuelle Stand sowie die zukünftigen Entwicklungen von Fahrzeugarchitekturen und fahrzeugeigenen Betriebssystemen (Operating Systems (OS)) untersucht. Diese Betriebssysteme bilden die Schnittstelle zwischen der Hardwarearchitektur des Fahrzeugs und der Software, mithilfe derer neue Dienste und Funktionalitäten im Fahrzeug umgesetzt werden.**

Im ersten Teil wird dargestellt, welche notwendigen Bestandteile eine elektrisch-elektronische (E/E) Architektur im Fahrzeug begründen, welche Rolle Betriebssysteme darin spielen und wie diese technisch realisiert sind. Außerdem sind erfolgs- und gleichzeitig sicherheitskritische Entwicklungen, wie Vernetzung und Automatisierung und das Einspielen von Software-Updates Over-the-Air (OTA), beschrieben. Es wird der aktuelle Stand der Technik

aufgezeigt und existierende Projekte relevanter Marktteilnehmer werden beleuchtet.

Anschließend folgt eine Analyse der Märkte, die besondere Relevanz für den Automobilmarkt haben. Die EU, die USA und China werden in Bezug auf Verbraucherpräferenzen, regulatorische Gegebenheiten und den technologischen Status quo untersucht. Die Verbraucherpräferenzen spielen insbesondere bei der Akzeptanz von zukünftigen Funktionen und der Geschwindigkeit des Fortschritts eine Rolle. Hier zeigen sich Unterschiede zwischen den Weltregionen, die durch gezielten Zuschnitt von Fahrzeugen auf den Absatzmarkt berücksichtigt werden müssen. Die regulatorischen Rahmenbedingungen in der betreffenden Region sind vor allem bei der Einhaltung von Emissionsrichtlinien sowie bei der Entwicklung von autonomen Fahrfunktionen relevant. Die technologischen Vorgänge in den einzelnen Regionen sind von Bedeutung für eine Forschungspolitik, die auf die Sicherung der Stellung Europas und insbesondere Deutschlands als Entwicklungsstandort abzielt.

Im dritten Abschnitt des Themenpapiers wird dargestellt, wie sich die Megatrends Digitalisierung, Elektrifizierung und Automatisierung auf die zukünftigen Anforderungen an automobile Betriebssysteme auswirken. Daraus lässt sich ableiten, wie sich Automobilhersteller in den kommenden Jahren aufstellen müssen, um in der sich ver-

ändernden Marktumgebung erfolgreich zu sein. Diese Probleme lassen sich nicht singulär durch technische Änderungen lösen, sie bedürfen eines Umdenkens in Bezug auf Personalwesen, Entwicklungsprozesse und Investitionen.

**Das Ergebnis der Untersuchung macht die Notwendigkeit einer marktübergreifenden und technologisch einheitlichen Verfolgung von Zielen deutlich, um die leistungsfähigen E/E-Architekturen zu realisieren und entsprechende Betriebssysteme zu integrieren.**

Dies ist eine Herausforderung, die gleichzeitig die Chance neuer Geschäftsmodelle und Kooperationen mit sich bringt.

Technisch sind die E/E-Architekturen von Fahrzeugen und die integrierten Hard- und Softwarebestandteile mit innovativen Betriebssystemen das Grundgerüst zukünftiger Mobilität.

Zukünftige Architekturen zeichnen sich durch folgende Charakteristika aus:

- Serviceorientierung ermöglicht OTA-Updates und die kontinuierliche Integration neuer Anwendungen
- Zentralisierung macht die gesamtheitliche Datenfusion und -berechnung zur Ausführung hochautomatisierter Funktionen möglich
- Virtualisierung bewältigt die voneinander unabhängige Entwicklung und Ausführung von Software- und Hardware
- Cloud-Integration schafft ein Kommunikationsnetzwerk zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur

All diese Eigenschaften erfordern hohe Rechenleistung, Netzwerke zur Datenübertragung in Echtzeit sowie umfassende Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wahrung der

Privatsphäre. Diese Veränderungen werden im Marktumfeld nicht gleichzeitig und sofort umgesetzt. Etablierte OEMs tendieren heute im ersten Schritt zur Entwicklung hybrider E/E-Architektur-Lösungen, um die Anforderungen neuer Funktionalitäten unter bestehenden Limitationen sicher und effizient umsetzen zu können.

Doch die Automobilindustrie, die in Deutschland über 800.000 Arbeitsplätze verantwortet, benötigt zur positiven Gestaltung eines derart fundamentalen Wandels auch politische Unterstützung. Das Themenpapier formuliert daher Handlungsoptionen zur Stärkung des technologischen Wandels in der Automobilwirtschaft. Zentral konnten dabei folgende Handlungsoptionen herausgearbeitet werden:

- Definition einheitlicher Standards und rechtlicher Vorgaben, um langfristige Planungssicherheit und strategische Innovationen zu fördern
- Investition in technische Infrastruktur und Mobilfunknetz zur Entwicklung eines ganzheitlichen Mobilitätsökosystems
- Erleichterung des Zugangs von Fachkräften aus außereuropäischen Nationen in den europäischen Arbeitsmarkt
- Ausrichtung des Bildungssystems von der Schule bis zur berufsbegleitenden Weiterbildung in Richtung der zukünftig entscheidenden Technologiefelder
- Förderung des lebenslangen Lernens in der Industrie

Im Automobilland Baden-Württemberg steht – mit einem Umsatz von jährlich über 100 Mrd. Euro – die Automobilindustrie als essenzieller Wirtschaftsmotor vor einem tiefgreifenden Wandel (e-mobil BW GmbH (2020)). Daher ist es unabdingbar, zukunftsfähige Fahrzeugkonzepte im Umfeld eines ganzheitlichen Ökosystems zu erforschen, zu realisieren und nachhaltig zu implementieren.



## Einführung

---

Der Wettbewerb in der Automobilindustrie wurde bisher maßgeblich von Faktoren wie Motorleistung, Beschleunigungsvermögen und Design bestimmt. Deutsche Premiumhersteller genießen Reputation von Weltrang und konnten Qualitäts- und Leistungsattribute mit ihren jeweiligen Markenidentitäten verknüpfen. In einer Welt, in der Vernetzung bedeutsamer wird als Besitz und Daten wertvoller sind als Rohstoffe, verändern sich Konsumentenansprüche an Mobilität. Fahrzeuge werden zunehmend auf ihren funktionalen Charakter innerhalb des Mobilitätsnetzes reduziert, womit Betriebssysteme und deren Funktionalitäten im Vergleich zu anderen Produktattributen, wie mechanischen Komponenten, an Bedeutung gewinnen.

E/E-Architekturen bilden fahrzeuginterne Kommunikationsnetze. Software, von standardisierten Basiskomponenten über Applikationen bis hin zu individuellen Betriebssystemen, bestimmt die Funktionalität eines Automobils. Während im Jahr 2010 noch 10.000 Zeilen Programmiercode für die Fahrzeugentwicklung ausreichten, sind es heute, nur zehn Jahre später, 100 Millionen Zeilen in einem Fahrzeug der Kompaktklasse (Simon, 2019). Software und Elektronik sind das Leistungssystem eines jeden Fahrzeugs. Sie können genutzt werden, um Mobilität vernetzter, umweltfreundlicher und zugänglicher zu gestalten. Im Automobilbereich gewinnt das Kaufkriterium Software an Relevanz und Hersteller sehen nicht nur der Transformation ihrer Produkte entgegen, sondern der Transformation der gesamten Branche.

**Der Kern dieses Themenpapiers ist es, den aktuellen Stand der fahrzeugeigenen Betriebssysteme sowie deren Funktionalität und elektronische Realisierung zu untersuchen.**

Hierbei werden existierende Fahrzeugarchitekturen und deren Charakteristika aufgeschlüsselt sowie ein marktübergreifender Vergleich präsentiert, um schließlich zukünftige Konzepte zu bewerten.

Die Analyse richtet sich nach den folgenden Leitfragen.

- Welche technologischen Anforderungen stellen neue Formen der Mobilität an Fahrzeugarchitekturen und fahrzeugeigene Betriebssysteme?
- Wie werden diese Systeme technisch realisiert und welche Trends sind auf dem Markt und in der Forschungsrichtungswisend?
- Welche Handlungsoptionen ergeben sich für Industrie und Politik, um die Entwicklung einer zukunftsfähigen Gesamtfahrzeugarchitektur voranzutreiben?

Die Untersuchung dieser Fragestellungen erfordert die technische Analyse bestehender elektronischer Systeme in Fahrzeugen, wobei insbesondere auf bestehende Lösungen unterschiedlicher Hersteller eingegangen wird. Da die Automobilindustrie auf einem weltweit vernetzten Tätigkeitsfeld agiert und globale Absatzmärkte von großer Bedeutung sind, wird die Analyse internationaler Unternehmensaktivitäten in den unterschiedlichen Märkten eingeschlossen. Regionen mit großer Bedeutung für den Weltmarkt werden in Bezug auf ökonomische, politische, gesellschaftliche und technologische Randbedingungen untersucht. Dabei spielen insbesondere die globalen Megatrends Digitalisierung, Automatisierung und Elektrifizierung eine entscheidende Rolle. Softwaresysteme bieten in der Fahrzeugentwicklung die Möglichkeit, Fahrzeuge miteinander, mit der Infrastruktur und der Umgebung zu vernetzen und an Cloud-Dienste anzubinden. Nur wenn diese

Möglichkeiten durch den Einsatz künftiger Betriebssysteme zugänglich sind, kann das Automobil seine Rolle im Mobilitäts-ökosystem der Zukunft ausfüllen.

Gesellschaftliche Relevanz erlangt dies durch die Umsetzung hochautomatisierter und autonomer Fahrfunktionen. Konsumenten erlangen einerseits standortunabhängige Anbindung an Transportnetze, andererseits minimieren Sharing-Funktionen zeitliche und finanzielle Opportunitätskosten und entlasten zusätzlich das Verkehrssystem. Die Fahrtzeit kann effizienter genutzt werden und die intelligente und flexible Kombination unterschiedlicher Fortbewegungsmittel verbessert die urbane Lebensqualität. Dies geht mit ökologischen Vorteilen einher: Ein vermindertes Verkehrsaufkommen sowie die optimierte Energieeffizienz von Fahrzeugen durch Vernetzung und intelligente Steuerung sind Säulen umweltfreundlicherer Mobilität. Alternative Antriebe reduzieren den Schadstoffausstoß und erhöhen die Aufenthaltsqualität in der Nähe von Verkehrswegen. Ökonomisch entstehen neue Geschäftsmodelle durch das Anbieten von Mobilitätsservices (Carsharing, Ride-Hailing etc.) sowie durch die Verringerung des Ressourcenverbrauchs. Auf Seiten der Fahrzeughersteller ergeben sich monetäre Potenziale durch die Möglichkeit, über den Verkaufszeitpunkt hinaus Funktionsupdates und -upgrades zu veräußern. Voraussetzungen für derart intelligente und vernetzte Mobilität sind technische Innovationen, ökonomische Restrukturierung und politisches Handeln.

**Die Automobilindustrie steht vor technologischen Herausforderungen, um leistungsstarke Bordrechner in Fahrzeuge zu integrieren, Sensorfusion für autonomes Fahren in Echtzeit zu ermöglichen und Funktionsupdates über Funkschnittstellen anzubieten.**

In einer Branche, in der der Großteil der Forschungs- und Entwicklungsmitarbeiter zur Berufsgruppe der Maschinenbauer und Fahrzeugtechniker gehört, stellt dies insbesondere eine informationstechnische Herausforderung dar (Cornet et al., 2019).

Für den Automobilbereich als umsatzstärkste und arbeitsmarktdominierende Industrie Baden-Württembergs (der geografischen Wiege des Automobils) besteht großer Handlungsdruck.

Die Chancen dieses Wandels zu nutzen bedarf gemeinschaftlicher, zielgerichteter Investitionen und Förderung finanzieller, aber auch infrastruktureller und organisatorischer Art.

**Dieses Themenpapier leistet einen Beitrag, um Baden-Württemberg in eine Innovatorenrolle künftiger Mobilitätsthemen zu manövrieren und technologischen Abhängigkeiten frühzeitig entgegenzuwirken.**

# 1.

## Status quo der Entwicklungsfortschritte im Bereich Fahrzeugelektronik mit Fokus auf fahrzeugeigene Betriebssysteme

### 1.1 E/E-Architektur und Architekturentwicklungen

#### 1.1.1 Automotive E/E-Architektur

E/E-Architekturen umfassen die gesamte elektrische und elektronische Energieversorgung eines Fahrzeugs. Elektrisch gesteuerte Komponenten und deren Kommunikation werden in der E/E-Architektur koordiniert. Dies schließt sowohl die Kommunikation zwischen den verbauten Komponenten als auch die Kommunikation mit dem Fahrzeugökosystem ein. Die verbaute Hardware wird über Betriebssysteme gesteuert und verwaltet. Mit zunehmendem Funktionsumfang der Fahrzeuge wächst die Bedeutung dieser Architektur und der Hard- und Softwareentwicklung.

Die Evolution von automobilen E/E-Architekturen spiegelt sowohl im Entwicklungsprozess als auch in der technischen Realisierung die Historie der mechanikorientierten Automobilindustrie wider. Funktionen, die als Fusion von Software- und Hardwarekomponenten in ein Fahrzeug integriert werden, wurden zunächst in einem unabhängigen, funktionspezifischen Steuergerät (Electronic Control Unit (ECU)) realisiert. Diese eingebetteten Systeme nehmen über Sensoren physikalische Größen auf und senden Informationen, die in der Kontrolleinheit in Signale verarbeitet werden, an Aktuatoren. Steuergeräte sind über Bussysteme vernetzt und tauschen Informationen aus (siehe Abbildung 1: Heute).

Die fachliche Trennung der E/E-Architekturentwicklung nach Fahrzeugdomänen (passive Sicherheit, Karosserie, Powertrain, Chassis und Infotainment) resultierte aus den unterschiedlichen Charakteristika der Domänen (Bach, 2018). Diese unterscheiden sich bezüglich ihrer Softwareintensität, Echtzeitanforderungen oder Sicherheitskriterien. Funktionalitäten wurden

dementsprechend mittels spezifisch gestalteter Steuergeräte innerhalb der jeweiligen Domäne realisiert. Zwischen den Domänen herrschte traditionell nur begrenzter Informationsfluss (Braun et al., 2016).

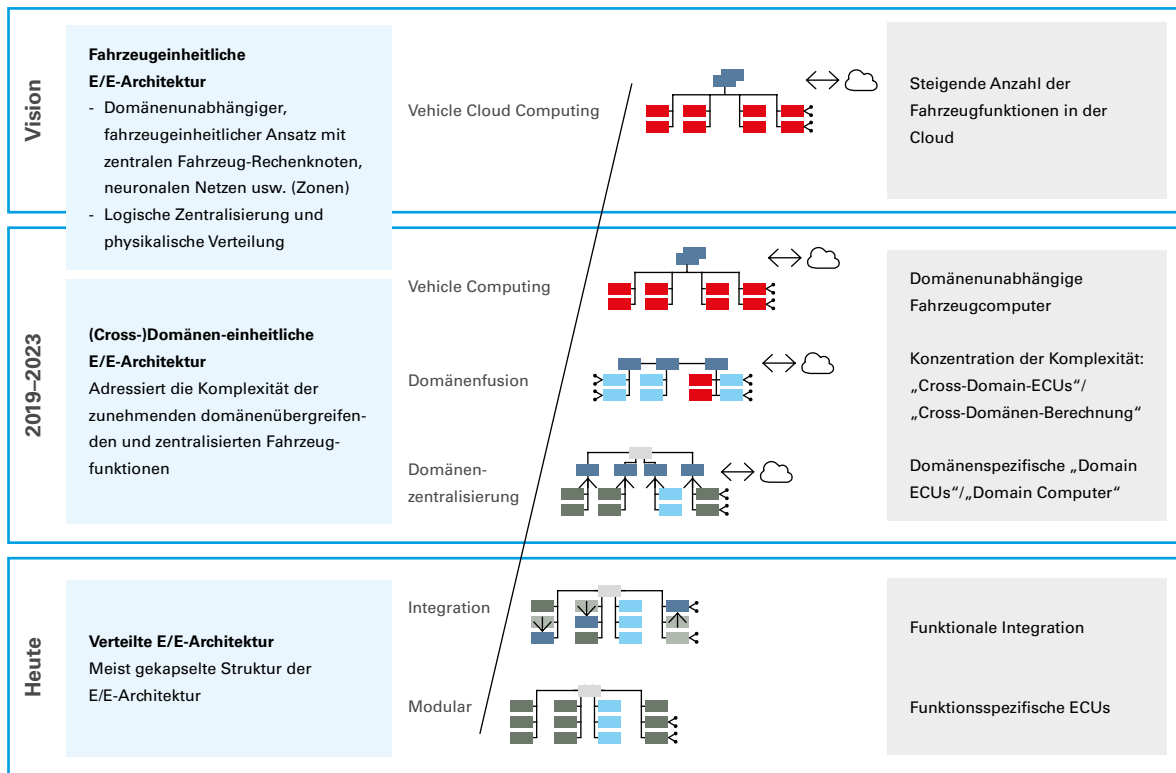
Die funktionsorientierte, verteilte Domänenarchitektur ermöglicht die asynchrone Entwicklung von Technologien und Systemen in den jeweiligen Domänen. Für die meist als Lieferantenleistung erbrachten Systeme und Subsysteme können demgemäß individuelle Lastenhefte formuliert werden. Der OEM verbaut die zu großem Anteil von Tier-1-Lieferanten zusammengesetzten Komponenten schließlich im Rahmen eines Montagevorgangs im Fahrzeug. Diese modulbasierte Domänenarchitektur aus zusammenpassenden Hard- und Softwarekomponenten verringert darüber hinaus, dass hoher Variantenreichtum in einer Domäne Auswirkungen auf weitere hat.

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten entwickelte sich die Automobilindustrie von einer stark mechanikorientierten zu einer softwaredominierten Branche (Traub et al., 2017).

**Die E/E-Architektur hat im Fahrzeug die Schlüsselposition inne, die technischen Möglichkeiten und Grenzen der enthaltenen Systeme vorzugeben.**

Der stetige Anstieg von Funktionen in Fahrzeugen resultierte in einer größeren Anzahl benötigter funktionsorientierter Steuergeräte. So sind in aktuellen Fahrzeugmodellen mit dezentraler Domänenarchitektur über 100 ECUs verbaut (Bucaini, Pelliccione, 2020). Der hohe Platzbedarf und Verkabelungsaufwand bringt die Architektur im Hinblick auf Kosten, Gewicht und benötigtem Bauraum an wirtschaftliche und technologische Grenzen. Zudem entsteht domänenübergreifend Duplizität von Funktionsanteilen, was die Nutzung von Synergiepotenzialen ausschließt und die Last für die Kommunikationsbusse





Steigender Software-Umfang

- Domänenspezifische Zone (ECU)
- Domänenunabhängige Zonen-ECUs, z. B. Türsteuergerät
- Optionale ECUs, z. B. Central Gateway
- Performance-ECUs, z. B. Domäne/zentral/Fahrzeug
- State of the Art automotive ECUs (funktionsspezifisch)
- ◀ Sensoren/Aktoren

Abbildung 1: Entwicklung der E/E-Architektur von Funktionsorientierung zu fahrzeugeinheitlichen Zonenrechnern

Quelle: Zerfowski, Buttje (2019)

weiter erhöht. Das beschriebene domänenorientierte Funktionsparadigma, das an die Organisationsstruktur der Automobilindustrie angepasst ist, wird den technischen Anforderungen nicht länger gerecht (siehe Conway's law) (Kugele et al., 2017). Die Hardware legt die Ressourcen fest, die wiederum Grenzen für die Ausführung der Software-Funktionalitäten definiert. Die Bussysteme, die die Kommunikationsströme der Signale in der Gesamtarchitektur übertragen, erreichen bei der hohen Anzahl an Funktionen schwer handhabbare Dimensionen. Die Signalbibliothek, typischerweise in Form einer Kommunikationsmatrix, beinhaltet bei modernen Fahrzeugen über 45.000 Signale.

Neue Antriebsformen, automatisiertes und autonomes Fahren sowie die allgemein stärkere Vernetzung im Fahrzeug verändern die Anforderungen an Architekturen zusätzlich, da weitere Funktionalitäten realisiert werden müssen. Die dargestellten Entwicklungen und Unzulänglichkeiten forcieren einen Wandel in der E/E-Architektur.

Im ersten Entwicklungsschritt wird aktuell eine Zentralisierung über Domänengrenzen hinweg angestrebt (siehe Abbildung 1). Funktionen sollen domänenübergreifend realisiert werden und so Datenströme über Domänengrenzen hinweg austauschen. Dafür müssen die Funktionen auf den ECUs in leistungsfähigere Zentralrechner integriert werden. Technisch realisiert werden die klassischen ECUs über Mikrocontroller, die den Anforderungen an Speicher und Rechenlaufzeit für domänenübergreifende Datenströme nur bedingt gerecht werden. Daher werden heterogene, leistungsfähige Rechnerplattformen (Domänencomputer) eingesetzt, um die übergeordneten Funktionen zu realisieren.

Die Entwicklung dieser Plattformen (häufig als System on a Chip (SoC)) ermöglicht für domänenübergreifende Fahrzeugfunktionen die entkoppelte Realisierung von Hardware und Software sowie die Integration mehrerer Funktionen auf diesen zentralisierten, übergreifenden Domänenrechnern. Funktionsspezifische ECUs bleiben zunächst bestehen. Es können Synergien genutzt und zuvor bestehende Engpässe aufgelöst werden. Um die unterschiedlichen Datenflüsse und Funktionen zu ermöglichen, bedarf es eindeutiger Schnittstellen und Struk-

turen. Die Standardisierung dieser Architekturartefakte in Kombination mit einheitlich spezifizierten Basis-Softwarebestandteilen führte zur Entwicklung der branchenübergreifend angewandten AUTomotive Open System Architecture (AUTOSAR) Classic Platform (siehe Kapitel 1.2.3). Für Fahrzeughersteller bietet standardisierte Software mehrere Vorteile, etwa Wiederverwendbarkeit, unaufwändige Reproduzierbarkeit und damit auch variantenübergreifende Einsetzbarkeit. Hierdurch lassen sich signifikante Kosteneinsparungen erzielen.

Firmenspezifische, wettbewerbsdifferenzierende Anwendungssoftware wird lediglich über einheitliche Schnittstellenstandards spezifiziert und getrennt von der standardisierten Basissoftware individuell entwickelt. Die Trennung der Abstraktionsebenen in hardwarespezifische und -unspezifische Komponenten ermöglicht industrieübergreifend Funktionsintegrität, -weiterentwicklung und -übertragbarkeit.

Autonome und hochvernetzte Fahrfunktionen sowie die erforderliche E/E-Architektur müssen zusätzlichen Anforderungen gerecht werden:

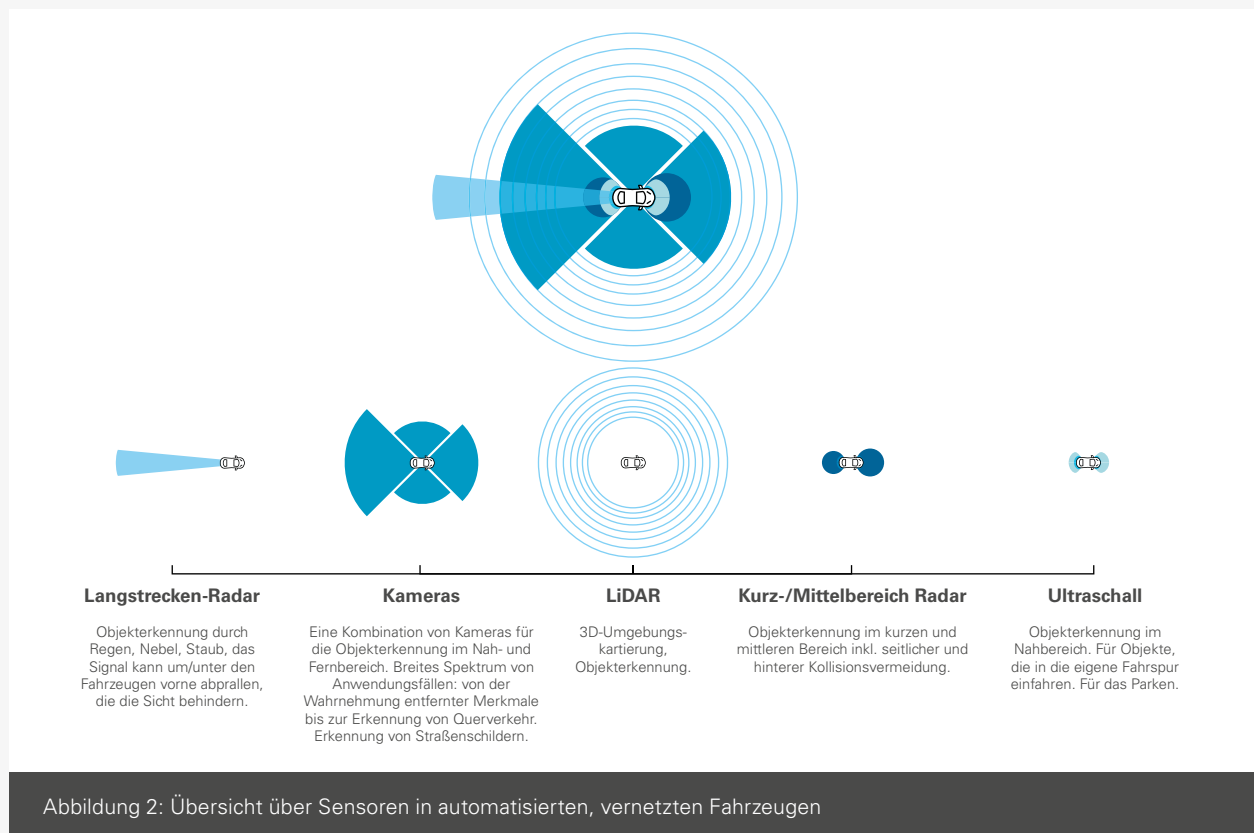


Abbildung 2: Übersicht über Sensoren in automatisierten, vernetzten Fahrzeugen

- hohe Rechenleistung, geringe Verarbeitungszeit und hochleistungsfähige Kommunikationsnetze für Datenströme zur Sensorfusion, echtzeitfähige Funktionsberechnung und -ausführung
- Vernetzung mit anderen Fahrzeugen, Infrastruktur und Cloud (C2X)
- Flexibilität und Erweiterung der Funktionen über den gesamten Produktlebenszyklus
- hohe Sicherheit beim Ausfall einzelner Komponenten, in der Datenkommunikation und bei Updates
- Fusion von einer Vielzahl unterschiedlichster Sensordaten (bspw. aus Radar-, LiDAR-, Ultraschallsensoren, dargestellt in Abbildung 2)

Schon diese Beispiele lassen sich mit den standardisierten AUTOSAR Classic Steuergeräten und der Kommunikation über Controller-Area-Network(CAN)-/LIN- oder FlexRay-Datenbusse nicht zuverlässig und in angemessener Zeit ausführen (Zerfowski, Niranjan, 2019). Die Hardware-bedingten Limitationen verhindern flexible Architekturanpassungen im Produktlebenszyklus, da Software funktionspezifisch im bisherigen Paradigma passgenau für die Hardware entwickelt wurde. Dies verhindert die effiziente Entwicklung von flexiblen Funktionserweiterungen und Updates während der Nutzung.

Die technischen Anforderungen, die bisher während der Entwicklung festgelegt wurden, verhalten sich nun jedoch dynamisch im Laufe des Produktlebenszyklus.

**Zukünftige Entwicklungen und Trends erfordern eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Funktionen und deren flexible Ausführung über den gesamten Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs.**

Softwareanwendungen sollen beliebig erweiterbar oder änderbar sein und durch Updates neue Funktionen, insbesondere auch on demand, zur Verfügung stellen. Darüber hinaus müssen veränderte Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden.

**Um Funktionen als entkoppelte, autarke Artefakte zu beschreiben, die kombiniert einen Verbund von Funktionalitäten realisieren, hat sich in der IT-Welt die serviceorientierte Architektur (SoA) etabliert, die nun von der Fahrzeugbranche aufgegriffen wird.**

Angelehnt an die Flexibilität eines Smartphones werden Funktionen als Dienste formuliert. Im historisch etablierten signal-

orientierten Kommunikationsparadigma müssen im Rahmen der Entwicklung statische Signalbibliotheken und Kommunikationsmatrizen festgelegt werden. Diese können von den zugehörigen Steuergeräten erkannt und verarbeitet werden. Im Unterschied dazu sind Services mit einer bestimmten Aktivität verknüpft, sie haben eine einheitliche Schnittstelle, über die sie aufgerufen werden können, und sind in sich geschlossen. Über einen Remote Procedure Call (RPC) kann ein Service von einem anderen aufgerufen werden, ohne dass die technische Funktionsweise des Service publik wird. Die so realisierten Dienste können über systemgrenzenübergreifende Netzwerke kombiniert werden und darüber Funktionalitäten realisieren. Dies geschieht über einen Service Bus als Middleware, der den Intermediär zwischen Serviceanbieter und -empfänger bildet. Ein Service Orchestrator organisiert schließlich die Bündelung der unabhängigen Services zur dynamischen Realisierung von Geschäftsprozessen.

Als Antwort auf diese Entwicklungen wurde der AUTOSAR Classic Standard einige Zeit später um die AUTOSAR Adaptive Plattform erweitert. Die koexistierenden Standards können in Symbiose implementiert werden. AUTOSAR Classic Mikrocontroller werden eingesetzt, wenn Funktionen mit harten Echtzeitanforderungen umzusetzen sind. Diese erfüllen darüber hinaus hohe Safety-Anforderungen (Automotive Safety Integrity Level (ASIL)): ASIL-D. Allerdings sind die Ressourcen begrenzt und die Software bleibt aufgrund der Hardwareabhängigkeit nicht updatebar.

Funktionen mit Anforderungen an Flexibilität und Leistung, die aber keine harten Echtzeitanforderungen aufweisen, werden nach AUTOSAR Adaptive auf Zentralrechnern realisiert.

So entsteht eine stetig zunehmende Zentralisierung der E/E-Architektur (siehe Abbildung 1). Die leistungsfähigen Domänen- oder Zentralrechner, realisiert über Mikroprozessoren (in SoC), bündeln unterschiedliche Funktionen und benötigen ein Kommunikationsnetzwerk mit hoher Bandbreite. Da bisher eingesetzte Bussysteme dies nicht garantieren können, werden dafür Ethernet-Busse eingesetzt, die in der Lage sind, höhere Datenaufkommen zu bewältigen.

Die an die Zentralrechner angebotenen Steuergeräte übernehmen die Funktion intelligenter Sensoren und Aktoren (Reif, 2011). Die Kommunikation zwischen den ECUs muss extrem sicher und zuverlässig erfolgen (realisiert über klassische Datenbusse). In der Infotainment-Domäne, wo Realzeitbedingungen nicht gegeben sein müssen, Software-on-demand-

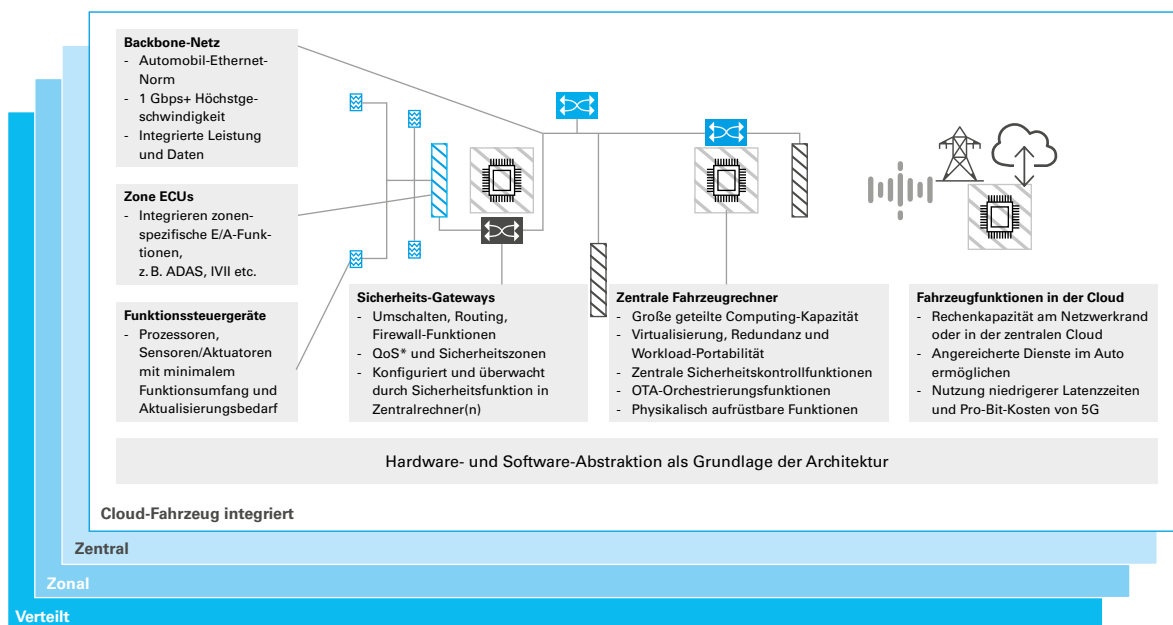
Anwendungen aber nachgefragt werden, existieren parallel zu den AUTOSAR Plattformen spezifische Lösungen (Wonne-mann, 2019). Betriebssysteme als Steuerprogramme der Hardware innerhalb eines einzigen Fahrzeugs reichen also von hochstandardisierten Steuerprogrammen über spezifische Echtzeitbetriebssysteme bis zu Infotainment- und Fahrerassistenzsystemen und erfüllen verschiedenste Aufgaben.

Die Vernetzungsanforderungen innerhalb der Architektur und zwischen Fahrzeugen sowie die Möglichkeit, Updates über eine Funkschnittstelle (OTA) umzusetzen (siehe Kapitel 1.3), führten zur Integration der Cloud in die E/E-Architektur (siehe Abbildung 1). Darüber entstehen umfassende Möglichkeiten zukünftiger Architekturen. Dienste können ohne Werkstattbesuch auf ein Fahrzeug übertragen werden und das Fahrzeug kann mit externen Daten gemanagt werden, um bspw. die Energieeffizienz zu steigern oder Prognosen zu Wartung und Instandhaltung zur Verfügung zu stellen (Predictive Maintenance). Die Verbindung der Automobile mit einem externen Datenspeicher birgt jedoch auch Sicherheitsrisiken.

Sicherheit ist eine wesentliche Anforderung, die für Updates, autonomes Fahren und Vernetzung besonders hohe Relevanz hat. Sicherheitskritische Funktionen müssen zu jedem Zeitpunkt korrekt ausführbar sein. Aus diesem Grund wird jede Funktion einem Sicherheitsintegritätslevel (Automotive Safety Integrity Level (ASIL)) zugeordnet. Diese Bewertung beurteilt die Risikoexposition jeder Funktion und deren Beherrschbarkeit im Falle eines Ausfalls. Sicherheitskritische Funktionen müssen auf einem entsprechend zertifiziertem Betriebssystem ausgeführt werden.

In der Architektur ist Sicherheit für kritische Funktionen zusätzlich über Redundanz zu gewährleisten. Bei Ausfall oder fehlender Rechenkapazität in der Hardware kann die Auslagerung von Berechnungen in dafür vorhandene redundante Artefakte oder in die Cloud vorgenommen werden. Für sicherheitskritische Software sind separate Betriebssysteme oder zusätzliche Überwachungssysteme notwendig. Die beschriebenen Entwicklungen erfordern eine hohe Anzahl an Hardwarekomponenten, wobei eine Entwicklung aus dem Mobilfunkbereich eine weitere Reduzierung der Architekturartefakte ermöglicht. Als Erweiterung von Mikroprozessoren ermöglichen sogenannt

### Stand der Technik: vernetzte Fahrzeugarchitektur



\*QoS = Quality of Service (Qualität der Dienstleistung)

Quelle: Quelle: PwC, 2019

Abbildung 3: Stand der Technik für zukünftig zu entwickelnde E/E-Architekturen

te Vehicle Computers die Partitionierung von Hard- und Software. So sind auf einem Rechner bis zu vier vormals separierte Domänen als virtuelle Steuergeräte integrierbar (Zerfowski, Crepin, 2019). Diese sind unabhängig voneinander und so gekapselt, dass Sicherheits- und Echtzeitanforderungen separat umsetzbar werden. Die hochleistungsfähigen Computer können eine Vielzahl an Daten verschiedenster Quellen fusionieren, um basierend auf deren Analyse weitere Entscheidungen zu treffen.

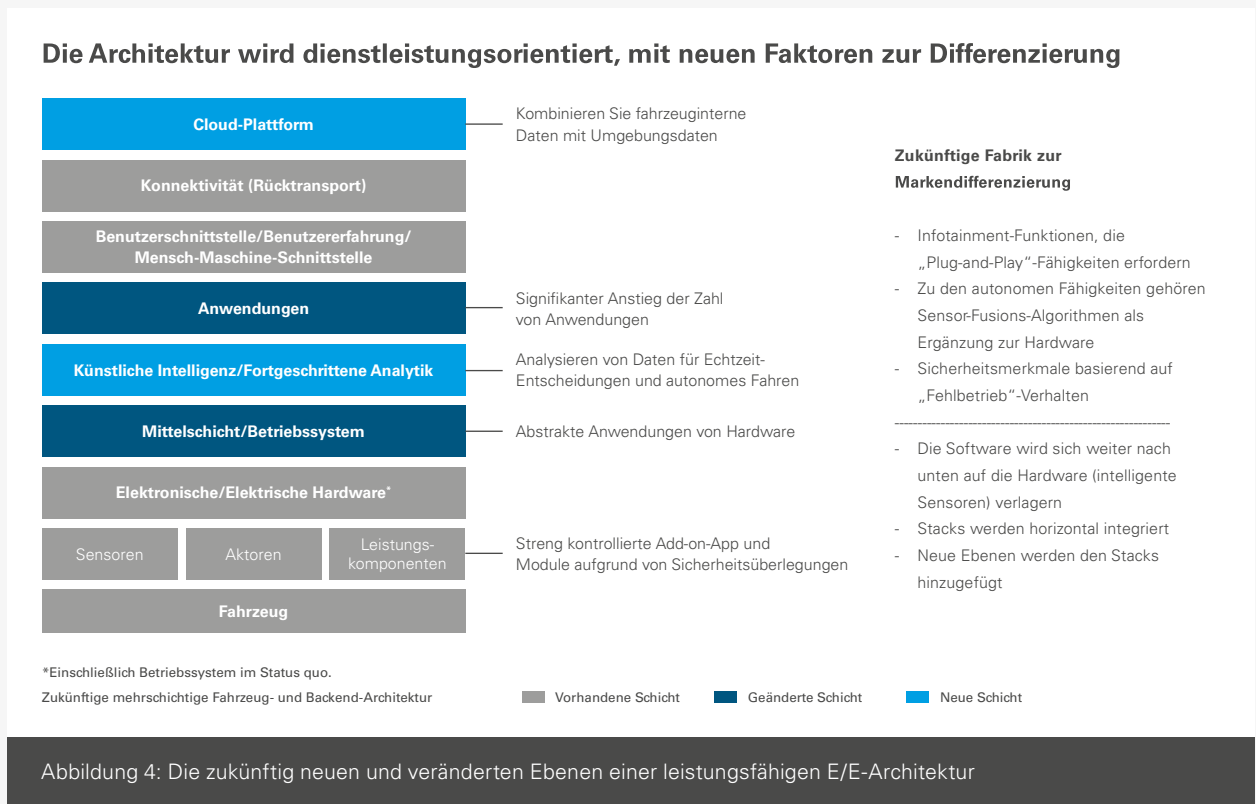
Die zunehmende Auslagerung solcher Berechnungen in die Cloud resultiert schließlich in den Zonenarchitekturen (Abbildung 1). Diese zeichnen sich durch wenige zentrale Vehicle Computers aus und reduzieren Gewicht, Kosten und Abhängigkeiten. Im Gegenzug ist hohe Skalierbarkeit und über die Standardisierung der verwendeten Hardwarekomponenten Wiederverwendbarkeit gegeben. Eine mögliche technische Umsetzung einer solchen Architektur und ihrer Komponenten ist in Abbildung 3 dargestellt.

### 1.1.2 Entwicklungsstand am Markt

Die Automobilindustrie hat sich von einer mechanikorientierten Branche zu einer Industrie entwickelt, in der Software dominiert. Die vernetzte, autonome Zukunft der Fahrzeuge erfordert die Übertragung hoher Datenmengen zwischen einzelnen Applikationen. Zusätzlich muss die Umgebung wahrgenommen werden und darauf basierende Aktionen müssen ohne Latenz ausgeführt werden. Dadurch kommen in der E/E-Architektur neue Ebenen hinzu (siehe Abbildung 4).

**Neue Infotainment-Anwendungen werden von Software-Anbietern entwickelt, die OEMs sehen sich in dieser Domäne Lieferanten gegenüber, die nicht nur Einzelkomponenten und Funktionalitäten realisieren, sondern ganzheitliche Betriebssysteme entwickeln.**

Die etablierten Lieferanten sind gezwungen, passende Hochleistungselektronik anzubieten. Gleichzeitig sind funktionale Sicherheit sowie Security und Privacy im Design zu verankern. Insgesamt geraten die Fahrzeughersteller unter enormen Druck, diese Veränderungen zu ermöglichen, um im Wettbe-



Quelle: Burckack et al., 2020

Abbildung 4: Die zukünftig neuen und veränderten Ebenen einer leistungsfähigen E/E-Architektur

werb weiterhin zu bestehen. Die deutschen OEMs, wie der Volkswagen Konzern, Daimler und BMW, fokussieren sich darauf, die Zentralisierung der Domänen „Antriebsstrang und Chassis“, „Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS) und Safety“, „Infotainment“, „Komfort und Vernetzung“ neben der zentralen Computing-Plattform zu erreichen (siehe Tabelle 1). Diese Entwicklung ist neben technologischer Relevanz für innovative Funktionen auch durch die erreichbare Skalierbarkeit, größere Effizienz und realisierbare Kosteneinsparungen motiviert (Roland Berger, 2020). Obwohl technische Möglichkeiten bereits über diese Fusion auf Domänenebene hinaus existieren, ist eine Zonenarchitektur erst perspektivisch in den Fahrzeugen der Hersteller umsetzbar. Dies ist vor allem der zu geringen Prozessorleistung in den heutigen Fahrzeugen geschuldet, die die Menge an anfallenden Daten nicht beherrschbar macht.

Volkswagen entwickelt mit dem Betriebssystem vw.OS eine Plattformlösung, die aus dem Android Open Source Project hervorgeht. Die zugehörige E/E-Architektur wird, wie in Abbildung 5 dargestellt, nach Vorbild von Smartphones realisiert. Der Konzern strebt eine zentralisierte IT-Architektur mit wenigen Zentralrechnern an, welche die bisherige Anzahl an Steuergeräten (aktuell bis zu 70) ablöst (Donath, 2020). Dieses Vorhaben soll in der „Car.Software Organisation“ als eigenständige Konzerntochtergesellschaft umgesetzt werden.

Die Server-Architektur für das Modell ID.3, die aus der In-Car-Application-Server-Technologie (ICAS) von Continental stammt, basiert auf AUTOSAR Adaptive und ermöglicht die Integration von Applikationen des Volkswagen Konzerns, aber auch solche von Drittanbietern. ICAS1 regelt die Fahrfunktionen, während ICAS2 die Steuerung von Assistenzsystemen und autonomem Fahren verantwortet und ICAS3 das Augmented-Reality-Headup-Display sowie das Infotainmentsystem realisiert. Zudem ging Volkswagen eine enge Partnerschaft mit Microsoft ein, um auf Basis von Microsoft Azure eine Volkswagen Automotive Cloud aufzubauen. Die Umsetzung von vw.OS erfolgt zunächst im modularen Elektro-Antriebs-Baukasten (MEB), anschließend plant der Konzern die Umsetzung in sämtlichen Fahrzeugen aller Marken nach 2025 (Eckardt, 2019). Bis zu diesem Zeitpunkt plant der Konzern die Software-Plattform so auszubauen, dass sie einen Eigenanteil von 60 % aller Fahrzeugsoftware beherrscht (Hansen, Wölbart, 2020). Um für den MEB in kurzer Zeit entsprechende Skaleneffekte zu erzielen, sind VW und Ford eine Kooperation eingegangen, durch die der MEB auch an den amerikanischen OEM geliefert wird. Dabei liegt der Fokus auf dem Antriebsstrang. Der Infotainment-Baukasten wird nicht an Ford veräußert. Darüber hinaus haben VW und Ford partnerschaftlich in Argo AI investiert, eine US-amerikanische Technologieplattform für autonomes Fahren. Die Technologie des Unternehmens soll jeweils individualisiert in die Modelle der beiden Konzerne integriert werden.





Daimler kündigte die Entwicklung des Betriebssystems MB.OS an, das nicht zwangsweise ein eigenes Betriebssystem werden soll, jedoch die Kundenschnittstelle im Konzern konserviert. Basis für die Entwicklung ist der Ansatz, ein „Windows für das Auto“ zu kreieren. Die Lösung soll ähnlich wie bei VW zum Jahr 2024 oder 2025 mit ausreichendem Reifegrad auf den Markt kommen. Bisher kündigt Daimler mit der Entertainment-Plattform MBUX ein Update des eigenen Infotainment-Systems an. Zudem stärkt der Automobilhersteller die Partnerschaft mit dem Chiphersteller NVIDIA. Daimler verfolgt das Ziel, Over-The-Air-Updates als neues Geschäftsmodell zu etablieren und weitere Level des autonomen Fahrens zu realisieren, daher entwickelt das Unternehmen mit NVIDIA die NVIDIA DRIVE Plattform als Computing-Architektur (La Rocco, 2020; Floemer, 2020).

Der bayerische Automobilhersteller BMW ist mittlerweile bei Version 7 des eigenen Betriebssystems BMW OS. Die Plattform kann bereits Software-Updates Over-the-Air verteilen, was ab Herbst 2020 vollständig ohne Werkstatttermin und in allen Modellen mit OS 7 möglich werden soll. Das Freischalten von Funktionen per Software-Update ist über die Connected-Drive-Dienste möglich. Updatebare Inhalte sind im Navigationssystem enthalten und betreffen viele mit Geodaten zusammenhängende Funktionen (Leicht, 2020).

Die von BMW angekündigte zukünftige E/E-Architektur soll mit den folgenden Eigenschaften entwickelt werden:

- Wandel von signalbasierter Kommunikation zur SoA
- Updatebarkeit und Co-Design von Hard- und Software mittels Hochleistungsrechnerplattformen
- zonenorientierte Netzwerkarchitektur
- Fahrzeugbackendinfrastruktur, die hochvernetzte
- Funktionen ermöglicht

In dieser Fahrzeugarchitektur werden zwei Klassen von Funktionen unterschieden. Basisfunktionen, wie Bremsfunktion oder Motorkontrolle, werden auf Mikrocontrollern realisiert. Funktionen mit höheren Anforderungen an Performanz sollen mittels Mikroprozessoren umgesetzt werden. Die so entstehende hybride Architektur, die unter anderem Hypervisoren als Monitor virtueller Maschinen (VM) vorsieht, um eine Abstraktionsebene zwischen Hardware und Software zu ziehen, soll homogen über die Marken des Konzerns umgesetzt werden.

Hypervisoren ermöglichen es, VMs auszuführen (siehe Abschnitt 1.2). Sie kapseln das Betriebssystem und die Ressourcen und können diese flexibel an die VMs verteilen. Somit können in einem einzigen System Softwarefunktionen unterschiedlicher Kritikalität kombiniert werden. Dies bezieht sich auf Sicherheitskritikalität (unterschiedliche ASIL), Echtzeitanforderungen (Echtzeitbetriebssysteme und generische Betriebssysteme), unterschiedliche Fehlertoleranz und Zuverlässigkeit. Bei der Softwareentwicklung muss also lediglich ein einziges Hardwaresystem berücksichtigt werden. Damit sind schlankere, parallellaufende Entwicklungsprozesse möglich und im Betrieb können mehrere Betriebssysteme auf derselben Hardware ausgeführt werden. Für jedes System kann das entsprechend passende Betriebssystem (AUTOSAR, individuelles OS etc.) realisiert werden.

Die Nutzung von Hypervisoren steht aktuell noch vor den Herausforderungen der Sicherheitsintegrität, da jedes Betriebssystem entsprechend der Norm ISO 26262 zertifiziert werden muss.

Im Gegensatz zu den deutschen Fahrzeugherstellern hat der amerikanische E-Fahrzeug-Hersteller Tesla eine E/E-Architektur entwickelt, die sich in vier safetyorientierte Domänen aufteilt: Autopilot, Central Information Display (CID) und Instrument Cluster, Antriebsstrang sowie Energiespeicher. CID und Instrument Cluster sind kombiniert und kommunizieren direkt miteinander. Mit einem zentralen Gateway überträgt Tesla bereits heute Updates Over-The-Air (OTA) (siehe Kapitel 1.3), auch die, die Antriebsstrang und Energiespeicher betreffen (Meissner et al., 2020; Leopold, 2018). Um hochautomatisierte Funktionen zu ermöglichen, sind SoC-Rechner verbaut, die ursprünglich vom Lieferanten NVIDIA stammten, nun aber als Eigenleistung realisiert werden.

Der schwedische Fahrzeughersteller Volvo hat in Kooperation mit dem chinesischen OEM Geely ein vollelektrisches Fahrzeug entwickelt, das mit einem Android-Betriebssystem ausgestattet ist. Die Architektur basiert auf der Plattform, die auch für weitere Volvo Modelle verwendet werden soll (Volvo Cars, 2018; Volvo Cars, 2014). Analog zu Daimler fokussiert sich Volvo auf die Technologie DRIVE AGX Xavier des Chipherstellers NVIDIA, um neben Fahrerassistenzsystemen und Infotainment-Funktionen auch Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) zu integrieren. Auf derselben Plattform baut Volvo weitere Modelle, die ab 2022 mit entsprechender Hardware OTA-Updates ermöglichen sollen.

Auch chinesische OEMs entwickeln E/E-Architekturen, um die Entwicklungen in Software und Elektronik beherrschbar zu machen. Der Hersteller BYD zeigt mit einem performanten Kontrollmodul die Möglichkeit der Konsolidierung mehrerer Steuergeräte auf. Zusätzlich wurde eine Datenplattform geschaffen, die als Schnittstelle zu Diensten von Drittanbietern dient.

Die chinesischen und amerikanischen Hersteller realisieren hauptsächlich batterieelektrische Fahrzeuge, dies stellt zusätzliche Bedingungen an die E/E-Architektur. Neben Sicherheit und Echtzeit ist die Energieeffizienz eine bedeutende Anforderung. In der Umsetzung einer solchen Architektur ist es daher von Bedeutung, Energieflüsse dynamisch steuerbar zu machen.

**Ähnlich der Zuteilung von Rechenressourcen nach Relevanz, bedarf es in E-Fahrzeugen der Zuteilung von Energiereserven an einzelne Domänen.**

Dies kann über ein Reichweitenmanagement als Assistenzfunktion realisiert werden, die Energieeffizienz höher priorisiert als Komfortfunktionen und zusätzlich ineffiziente Fahrmanöver vermeidet, falls diese nicht sicherheitsrelevant sind. Es entsteht daher eine Priorisierung, die Sicherheit vor Energieeffizienz stellt und Komfort nachgelagert betrachtet (Scheuch, 2011).

Abbildung 4 zeigt die Betriebssysteme eines Fahrzeugs als Ebene der Architektur auf, die maßgeblich die Ausführung von Applikationen steuert und verwaltet. Daher sind fahrzeugeigene Betriebssysteme ein Bestandteil der Architektur, die zukünftige Funktionen entscheidend prägt. Im Folgenden Abschnitt wird dies weiter spezifiziert.

Unternehmen	Architektur	Betriebssystem	OTA-Updates	Partnerschaften (Beispiele)
<b>Volkswagen</b>	Angestrebt: zentralisierte Architektur mit wenigen Zentralrechnern	vw.OS (aus Android Open Source)	Ab Modell ID.3 (2020) geplant, aber für erste Auslieferungsladung noch nicht verfügbar	Investition in Argo.AI mit Ford als Technologieplattform für autonomes Fahren
<b>Daimler</b>	Angestrebt: zentralisierte Architektur mit wenigen Zentralrechnern	MBUX (Infotainment-System – linuxbasiert) MB.OS	S-Klasse heute bereits Updates aus Cloud, ab 2024 für alle Fahrzeuge geplant	NVIDIA für die NVIDIA DRIVE Plattform als Computing-Architektur
<b>BMW</b>	Angestrebt: Zonenarchitektur und SoA	BMW OS (linuxbasiert)	Updates für Infotainment und Navigationsinhalte seit Herbst 2020	Industrieweite Partnerschaft für autonome Fahrfunktionen
<b>Tesla</b>	4 safetyorientierte Domänen	Linuxbasiert	Updates für Infotainment, Antriebsstrang und Energiespeicher bereits möglich	Kaum Partnerschaften, bisher noch NVIDIA zur Chipherstellung, aber in Zukunft: eigene Chipentwicklung
<b>Volvo/ Geely</b>	4 zentrale Domänen	Android Automotive	OTA-Updates für 2022 in Volvo Modellen angekündigt	NVIDIA für Technologieplattform DRIVE AGX Xavier
<b>BYD</b>	Zentralisierung angestrebt	HarmonyOS (Huawei)	OTA-Updates möglich	Huawei (HarmonyOS), Baidu (Apollo-Plattform), Qualcomm

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 1: Unternehmen und Status quo sowie angestrebte Ziele hinsichtlich Architekturen, Betriebssystemen, OTA-Updates und aktuell wichtige Partnerschaften in diesem Bereich

## 1.2 Fahrzeugeigene Betriebssysteme

Die zunehmende Konsolidierung vormals getrennter Funktionalität geht mit einer Reduktion der Anzahl unterschiedlicher ECUs einher. Während zuvor Software-Funktionalität untrennbar mit der zugehörigen Hardware ausgeliefert wurde, entstehen künftig neue Herausforderungen durch die notwendige softwareseitige Integration. Neben Signalschnittstellen kommen insbesondere Schnittstellen hinzu, die zugeliessene Softwarebausteine untereinander und mit der Ausführungsumgebung verbinden. Diese standardisierten Ausführungsumgebungen werden für gewöhnlich als Betriebssystem bezeichnet. Im folgenden Abschnitt werden die aktuellen Entwicklungen im Bereich fahrzeugeigener Betriebssysteme betrachtet und in den Kontext bestehender Standards sowie Standardisierungsbestrebungen gesetzt.

Während der Begriff des Betriebssystems im Personal-Computer(PC)-Umfeld bereits sehr etabliert ist, erfordert die Einordnung in den Automotive-Kontext eine differenzierte Betrachtung. Softwareanwendungen im Fahrzeug realisieren ein breites Funktionsspektrum. Es reicht von echtzeitkritischen, sicherheitsrelevanten Funktionen über multimediale, den Insassen zugewandten Anwendungen bis hin zur Hoch-Automatisierung einzelner Fahrfunktionen.

Zunächst wird daher der Begriff des fahrzeugeigenen Betriebssystems präzisiert und eine notwendige Differenzierung unterschiedlicher Kategorien vorgenommen. Anhand der beschriebenen Kategorien erfolgen die Betrachtung des aktuellen Entwicklungsstands am Markt und die Einordnung zu bestehenden Standards und dahinterstehenden Organisationen und Initiativen, z. B. Open-Source-Projekten.

### 1.2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung

Nach Tannenbaum und Bos (2015) erfüllen Betriebssysteme im Wesentlichen zwei zentrale und grundsätzlich voneinander losgelöste Aufgaben:

- Bereitstellung einer klaren, vereinheitlichten Abstraktion der zugrundeliegenden Hardwareschnittstellen
- Verwaltung der (beschränkten) Ressourcen

Im Hinblick auf fahrzeugeigene Betriebssysteme betrifft Letzteres vor allem die zunehmende Kollokation von Softwarebausteinen unterschiedlicher Funktionalität und Priorität auf geteilter Hardware.

Die Vereinheitlichung von Schnittstellen durch Abstraktion bedarf einer differenzierten Betrachtung. Diese Differenzierung halten wir für notwendig, da der Begriff des Betriebssystems insbesondere durch mediale Berichterstattung und Marketing zuletzt etwas weit gefasst wurde.



Für die Betrachtung der Marktsituation unterscheiden wir die drei in Abbildung 6 dargestellte Abstraktionsniveaus: ECU, Fahrzeug, Plattformökosystem. Die Abstraktion auf ECU-Ebene entspricht der klassischen Definition eines Betriebssystems mit dem Ziel, Softwareentwicklung für verschiedene Hardwareplattformen zu erleichtern.

**Im Zuge der zunehmenden ECU-übergreifenden Vernetzung unabhängiger Funktionalitäten zur Bereitstellung höherwertiger Dienste bedarf es einer fahrzeugweiten Definition von Schnittstellen und Kommunikationsmechanismen.**

Auf dem Abstraktionsniveau Fahrzeug werden daher Softwareplattformen betrachtet, die Anwendungen und Diensten eine fahrzeugweite Sicht ermöglichen bzw. zu ihrer Bereitstellung eingesetzt werden. Die Bestandteile eines fahrzeugweiten Betriebssystems werden notwendigerweise auf ECUs im Fahrzeug ausgeführt und stehen daher im Bezug zu Betriebssystemen auf ECU-Abstraktionsniveau.

Die übergeordnete Abstraktionsebene des Plattformökosystems stellt weniger eine technische Notwendigkeit zum Betrieb des Fahrzeugs als die Grundlage zur Bereitstellung höherwertiger Funktionalität durch Dienstleister dar. Beispiele solcher Ökosysteme lassen sich im Bereich von Smartphones und Tablets finden. Auf dedizierten Marktplätzen können Drittanbieter den Nutzern kommerziell Anwendungen und Dienste bereitstellen. Diese Dienste setzen notwendigerweise Schnittstellen zu den Systemen der darunterliegenden Abstraktionen voraus, z.B. für Anwendungen (Apps) zur Ausführungsumgebung.

## 1.2.2 Entwicklungsstand am Markt

Die Betrachtung des aktuellen Entwicklungsstands am Markt erfolgt auf Basis der in dem vorherigen Abschnitt beschriebenen Kategorisierung.

### Betriebssysteme auf ECU-Abstraktionsniveau

ECUs – Computereinheiten in modernen Fahrzeugen – stellen die Hardwareumgebung zur Ausführung jeglicher Software im Fahrzeug dar. Je nach zur Verfügung gestellter Funktionalität muss eine ECU unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Für sicherheitskritische Funktionalität, deren Fehlfunktion eine Gefährdung von Menschenleben bedeutet, ist zentral, dass sie garantiert zeitgerecht und korrekt ausgeführt wird. Ein Betriebssystem solcher ECUs muss gewährleisten, dass benötigte Rechenressourcen im Bedarfsfall in jedem Fall verfügbar sind. Im Infotainment-Bereich kommt es dagegen auf eine möglichst flexible Ausführungsplattform an, die es ermöglicht, Funktionalität während des Betriebs nachzurüsten bzw. zu aktualisieren. Während die Reaktionszeit auf Benutzereingaben, z. B. das Umschalten eines Radiosenders, wesentlich die Benutzungserfahrung beeinflusst, stellt eine vereinzelte verzögerte Antwort kein Sicherheitsrisiko dar.

Wir unterscheiden im Folgenden zwischen Betriebssystemen, die durch statische Ressourcenallokation Garantien für hart echtzeitkritische Funktionalität gewährleisten, und solchen, die durch ihre dynamische Natur als flexible Integrationsplattform einer Vielzahl von Softwaremechanismen dienen. Im Zuge der zunehmenden Integration unterschiedlich priorisierter, zum Teil sicherheitskritischer Funktionalität auf wenigen ECUs gewinnen insbesondere hart echtzeitfähige Hypervisor-Betriebssysteme an Bedeutung. Diese dienen zum isolierten Betrieb mehrerer z.T. unterschiedlicher Betriebssysteme auf der gleichen ECU, wie in Kapitel 1.1 erläutert.

### Statische Betriebssysteme für hart echtzeitkritische Anforderungen

Betriebssysteme, die hart echtzeitkritische Aufgaben unterstützen, werden häufig nicht als solche wahrgenommen, da sie zumeist zusammen mit der eigentlichen Anwendung als Speicherabbild ausgeliefert werden. Die Betriebssystemfunktionalität steht hierbei als statische Bibliothek zur Verfügung. Als solche wird sie bereits während des Kompilervorgangs (bzw. während des anschließenden Linkings) mit der eigentlichen Anwendung vereint. Die entstandene Anwendung ist spezifisch für eine konkrete Hardwareplattform und wird häufig direkt mit dieser ausgeliefert. Beim Betrieb läuft der Anwendungscode mit der gleichen Berechtigung wie auch die mitausgelieferten Teile des Betriebssystems. Eine Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Berechtigungsmodi, insbesondere Kernel- und Usermode, findet bei statischen Echtzeitbetriebssystemen daher meist nicht statt.

### Bei statischen Echtzeitbetriebssystemen erfolgt die Allokation von Ressourcen, vor allem Berechnungszeit und Speicher, bereits während der Entwicklung.

Durch die statische Reservierung der Ressourcen kann gewährleistet werden, dass die notwendige Ressourcenkapazität im Bedarfsfall zur Verfügung steht. Die statische Reservierung hat andererseits zur Folge, dass ungenutzte Ressourcenkapazität nicht dynamisch anderen Funktionen zur Verfügung gestellt werden kann.

Der aktuelle Markt bietet ein breites Spektrum von Echtzeitbetriebssystemen, von denen viele sehr spezifische Zwecke erfüllen. Wir fokussieren uns im Folgenden einerseits auf Echtzeitbetriebssysteme, die dediziert für den Betrieb im Automobil entwickelt werden. Andererseits betrachten wir eine Reihe von aktiven Echtzeitbetriebssystemen aus der Open-Source-Community, die insbesondere für den Einsatz in Sensorknoten der Internet-of-Things(IoT)-Domäne konzipiert wurden.

Für Echtzeitbetriebssysteme, die für den Einsatz in eingebetteten Systemen im Automobilsektor ausgelegt wurden, existiert mit der Norm ISO-17356-3 (OSEK-OS) ein international gültiger Standard der OSEK/VDX (Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug/Vehicle Distributed Executive). OSEK-OS und die Erweiterung OSEK-TIME standardisieren die Schnittstellen eines Echtzeitbetriebssystems, um die Anwendungsentwicklung eingebetteter Systeme

von einer konkreten Betriebssystemimplementierung zu entkoppeln.

Die standardisierten Schnittstellen werden durch verschiedene kommerzielle Implementierungen sowie eine Reihe von in Open-Source-Projekten entwickelten Betriebssystemen bereitgestellt. Die OSEK-Standards stellen die Grundlage des ursprünglichen AUTOSAR Standards dar – mittlerweile als AUTOSAR Classic Platform bezeichnet.

Die AUTOSAR Classic Platform skizziert die in Abbildung 7 dargestellte Anwendungsarchitektur. Die Aufgaben des Betriebssystems sind aufgeteilt auf die sogenannte Basissoftware (BSW) und das Runtime-Environment (RTE). Erstere kapselt modular hardwarebezogene Dienste bzw. Treiber und untergliedert sich in die drei Schichten Services (Dienste), ECU-Abstraktion und Mikrocontroller-Abstraktion.

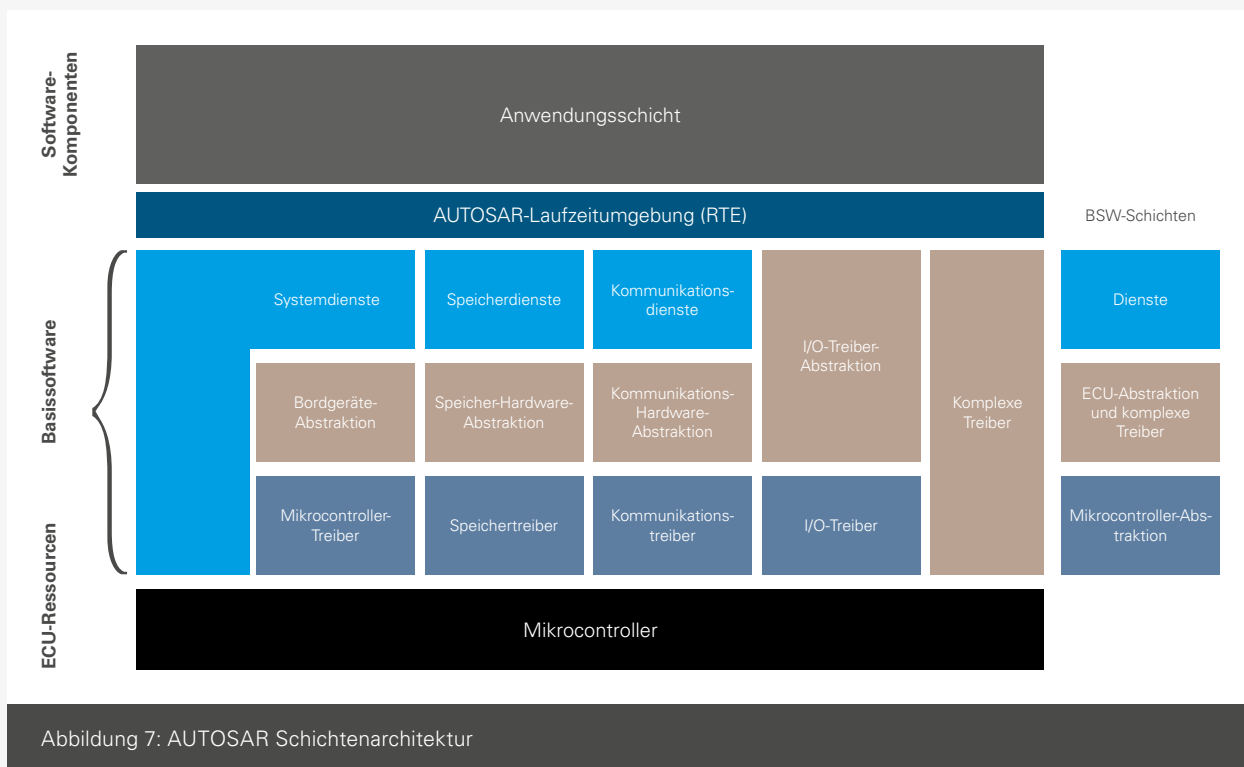
AUTOSAR standardisiert über die Komponenten des Betriebssystems hinaus den Entwicklungsprozess, um herstellerübergreifende Softwareentwicklung zu vereinfachen. Insbesondere Treiber der Mikrocontroller-Abstraktionsebene werden häufig durch die Hardware-Hersteller selbst zugeliefert.

In Tabelle 2 stellen wir eine Übersicht über aktuelle Implementierungen der Standards AUTOSAR Classic Platform sowie OSEK-OS/ISO-17356-3 dar.

Proprietär/Kommerziell	
RTA-OS	ETAS GmbH
MICROSAR.OS	Vector Informatik GmbH
EB tresos (AutoCore OsekCore)	Elektrobit Automotive GmbH
Capital VSTAR	Mentor Graphics
Julinar SPF	APTJ Co., Ltd.
eMCOS	eSOL Co.,Ltd.
AUBIST Classic Platform	AUBASS Co., Ltd.

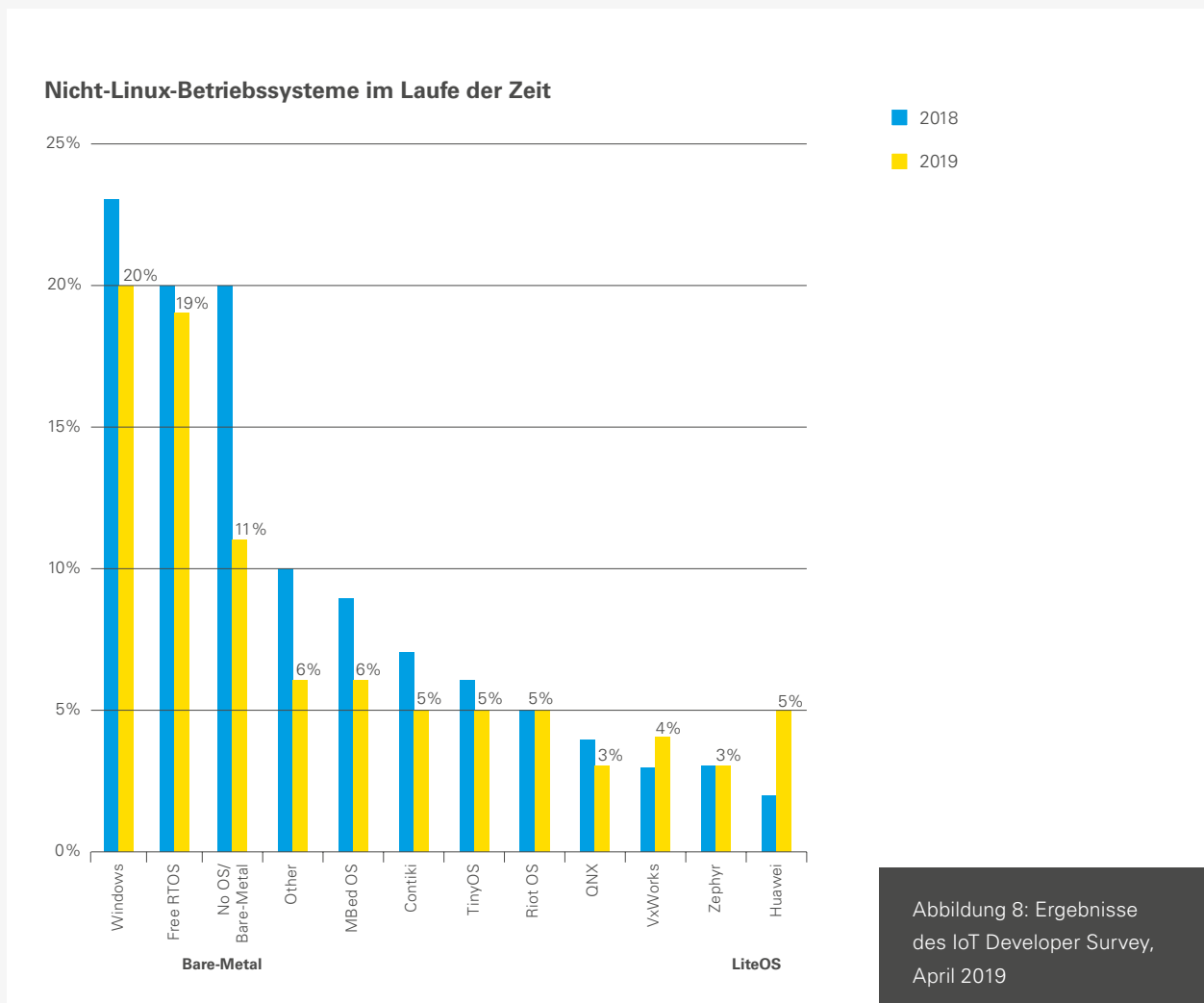
Tabelle 2: Übersicht aktueller AUTOSAR/OSEK-OS Implementierungen

Quelle: Eigene Darstellung



Quelle: Stefan Bunzel, AUTOSAR – the Standardized Software Architecture, 2010. Informatik-Spektrum

Abbildung 7: AUTOSAR Schichtenarchitektur



Quelle: Eclipse Foundation, <https://iot.eclipse.org/community/resources/iot-surveys/assets/iot-developer-survey-2019.pdf>

Alle betrachteten kommerziellen Implementierungen der AUTOSAR Classic Plattform bewerben Konformität zu aktuellen Versionen des AUTOSAR Standards. Alle eignen sich nach eigenen Angaben für sicherheitskritische Anwendungen, die nach ISO 26262 mit ASIL-D klassifiziert wurden.

Neben kommerziellen Plattformen existiert auch eine Reihe von Open-Source-Projekten, die das Ziel verfolgen, eine OSEK-OS- bzw. AUTOSAR-kompatible Implementierung bereitzustellen. Die Ansätze zielen auf unterschiedliche Nutzergruppen ab, die meisten primär auf den Bildungs- und Forschungsbereich. Zu nennen sind hier insbesondere Erika Enterprise RTOS, FreeOSEK und Trampoline RTOS. Während alle drei unter Open-Source-Lizenz (General Public License (GPL)) entwickelt werden, besteht bei Erika die Möglichkeit der kommerziellen Lizenzierung ohne die sich ergebenden Open-Source-Verpflich-

tungen. Möglich wird dies durch die kontrollierte Entwicklung durch das Unternehmen Evidence Srl. Neben den genannten gibt es weitere Ansätze freier OSEK-OS-Implementierungen zu Lern- und Evaluationszwecken, die sich auf spezialisierte Plattformen, z. B. aus dem Spielzeugbereich, fokussieren. Diese eignen sich durch ihre prototypische Natur nicht zum Einsatz in serienreifen Produkten.

Über den Bereich der OSEK- bzw. AUTOSAR-standardisierten Betriebssysteme hinaus besteht insbesondere für eingebettete Systeme des IoT eine Reihe sehr aktiver Softwareprojekte. Abbildung 8 stellt Ergebnisse einer von der Eclipse Foundation regelmäßig unter IoT-Entwicklern durchgeführten Umfrage dar. Gefragt wurde nach dem Betriebssystem, das bei den aktuellen IoT-Projekten zum Einsatz kommt. Linux wurde dabei ausgenommen und gesondert behandelt. Eine besonders interes-



<b>FreeRTOS</b>	GPL (V ≤ 9), MIT (seit V10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Seit 2017 unter Verwaltung von Amazon Web Services</li> <li>■ Kommerziell lizenziert als OperRTOS durch WITTENSTEIN high integrity systems (WHIS)</li> <li>■ Kompatible kommerzielle Implementierung SAFERTOS, zertifiziert nach ISO 26262 ASIL-D und IEC 61508-3 SIL 3</li> <li>■ Aktive Entwicklung (54 Commits durch 18 Entwickler im Zeitraum 09.08.–09.09.2020)</li> </ul>
<b>MBed OS</b>	Apache Version 2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entwicklung koordiniert durch ARM</li> <li>■ Ausschließlich für ARM Cortex-M-CPUs</li> <li>■ Aktive Entwicklung (405 Commits durch 41 Entwickler im Zeitraum 09.08.–09.09.2020)</li> </ul>
<b>Contiki (NG)</b>	3-Klausel-BSD-Lizenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mäßige Entwicklungsaktivität (4 Commits durch 3 Entwickler im Zeitraum 09.08.–09.09.2020)</li> </ul>
<b>TinyOS</b>	3-Klausel-BSD-Lizenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entwicklung von Anwendungen ausschließlich in eigener Programmiersprache necC</li> <li>■ Geringe Entwicklungsaktivität (keine Commits seit 26.05.2020)</li> </ul>
<b>RIOT OS</b>	GNU LGPL	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gefördert insbesondere durch FU Berlin, INRIA und HAW Hamburg</li> <li>■ Unterstützt 11 CPU-Architekturen</li> <li>■ Aktive Entwicklung (506 Commits durch 33 Entwickler im Zeitraum 09.08.–09.09.2020)</li> </ul>
<b>Zephyr</b>	Apache Version 2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entwicklung koordiniert durch Linux Foundation</li> <li>■ Sehr aktive Entwicklung (1.074 Commits durch 130 Entwickler im Zeitraum 09.08.–09.09.2020)</li> </ul>
<b>LiteOS</b>	3-Klausel-BSD-Lizenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entwicklung primär durch Huawei</li> <li>■ Dokumentation größtenteils auf Chinesisch</li> <li>■ Geringe Entwicklungsaktivität (keine Commits seit 31.07.2020)</li> </ul>

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3: Übersicht aktueller Betriebssysteme aus dem IoT-Umfeld

sante Erkenntnis ist der im Vergleich zu 2018 erkennbare Rückgang von IoT-Projekten, die auf ein Betriebssystem gänzlich verzichteten (von 20 % auf 11 %).

**Windows, Linux, QNX und VxWorks sind Betriebssysteme, die dynamisch und unabhängig von der eigentlichen Anwendung ausgeliefert werden.**

Diese Betriebssysteme werden im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet. Tabelle 3 stellt eine Übersicht über die verbleibenden relevanten Betriebssysteme aus dem IoT-Umfeld dar.

Alle betrachteten IoT-Betriebssysteme stehen unter einer vergleichsweise permissiven Lizenzierung. Mit Ausnahme von RIOT OS dürfen alle Betriebssysteme gebührenfrei und unein-

geschränkt in kommerziellen Anwendungen zum Einsatz kommen, ohne den Anwendungsquellcode offenlegen zu müssen.

Im Gegensatz dazu steht eine restriktive Offenlegungspflicht aller betrachteten Open-Source-OSEK-Varianten. Im AUTOSAR Umfeld existiert kein öffentlich zugänglicher Quellcode. Durch die Pflicht zur Mitgliedschaft in den jeweiligen Organisationen (AUTOSAR, COMASSO e. V.), sind Implementierungsartefakte ausschließlich einem sehr limitierten Benutzerkreis zugänglich.

## Dynamische Betriebssysteme

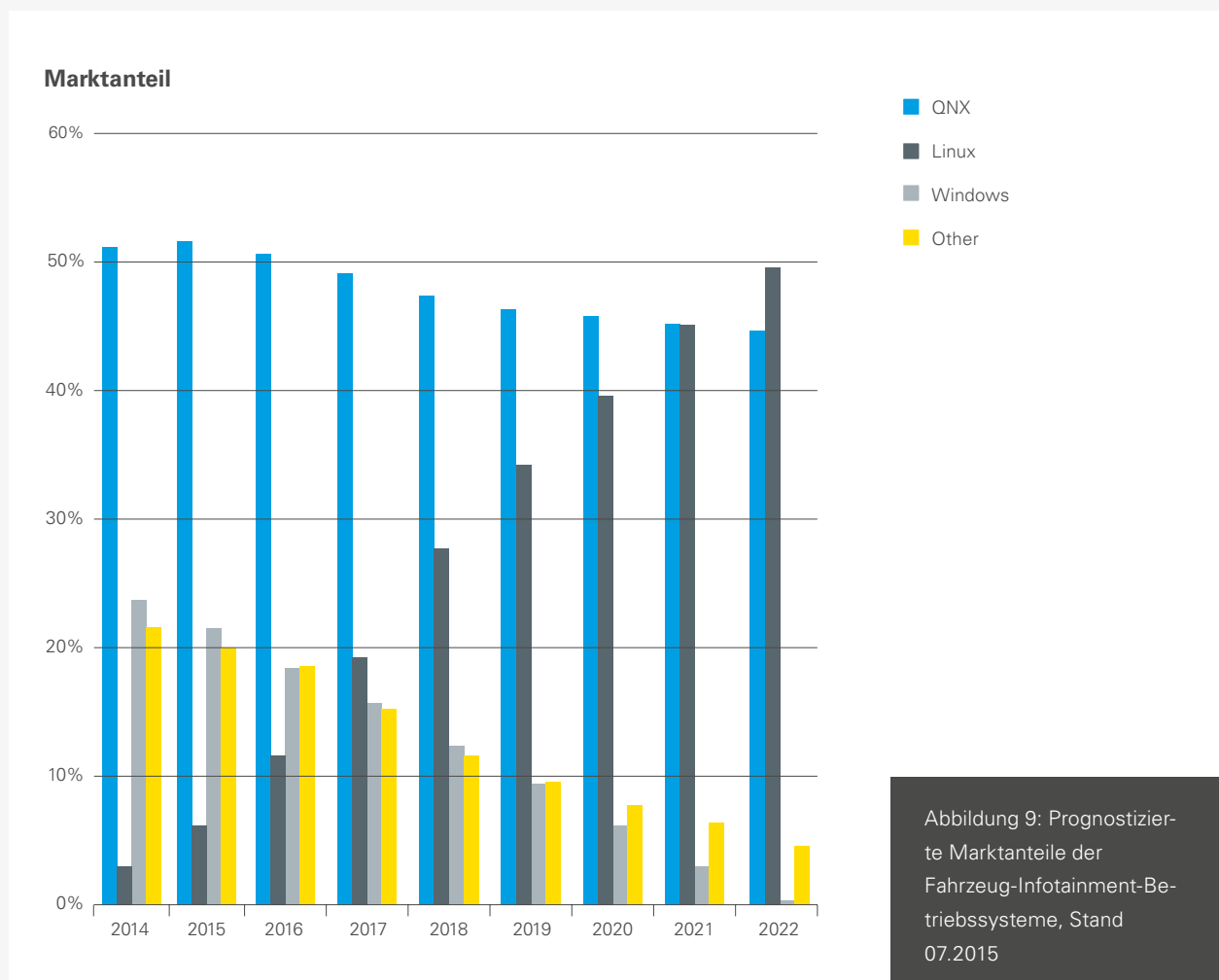
Dynamische Betriebssysteme für den Einsatz im Automobil unterscheiden sich von den im vorherigen Abschnitt betrachteten statischen Systemen.

**Bei dynamischen Betriebssystemen besteht die theoretische Möglichkeit der unabhängigen Auslieferung (Deployment) des Betriebssystems sowie der eigentlichen Anwendungen.**

Alle im Folgenden betrachteten dynamischen Betriebssysteme haben einen höheren Funktionsumfang im Vergleich zu den statischen Systemen. Dieser geht mit einem grundsätzlich höheren Ressourcenbedarf einher, der diese Betriebssysteme für den Einsatz auf sehr beschränkten Mikroprozessorumgebungen ungeeignet macht. Im Gegensatz zu sta-

tischen Betriebssystemen wird bei der Anwendungsausführung auf den im Folgenden betrachteten Systemen zwischen unterschiedlichen Berechtigungsmodi unterschieden. Diese dienen insbesondere dazu, eine Isolation verschiedener parallellaufender Prozesse zu gewährleisten. Die Menge aller Prozesse und Systemaktivitäten steht bei dieser Art Betriebssystem erst zur Laufzeit final fest. Ein dynamisches Hinzufügen, Entfernen und Aktualisieren von Anwendungen während des Betriebs sind zumindest theoretisch möglich.

**Im Zuge einer zunehmenden Konsolidierung von Funktionen sowie der durch die aktuellen Entwicklungen notwendigen höheren Integration vormals getrennter Funktionen stellen diese Betriebssysteme die Basis für domänenübergreifende Funktionen bzw. für fahrzeugeigene Gateways dar.**



In-Vehicle-Infotainment-Systeme setzen schon seit geraumer Zeit auf dynamische Betriebssysteme. BMW führte 2003 das CCC (Car Communication Computer) System, basierend auf WindRiver VxWorks, ein. Nach Aussage von BlackBerry Limited finden sich Teile des QNX Systems in 60 Millionen Fahrzeugen 40 verschiedener Hersteller. Die Ford Motor Company führte 2007 das auf Microsoft Windows Embedded Automotive basierende SYNC ein. Nach ABIresearch hatten QNX und Microsoft 2013 einen Anteil von 75–80 % des Automobil-Infotainment-Markts inne.

Abbildung 9 veranschaulicht den Trend zu vermehrtem Einsatz linuxbasierter Betriebssysteme für Infotainment-Systeme im Fahrzeug. In einer Befragung im Auftrag der Zeitschrift EETimes embedded unter Embedded-Software-Entwicklern gaben 2019 bereits 53 % der Entwickler an, in aktuellen Projekten auf Linux zu setzen. Die Prognose ist steigend (65 %, wenn gefragt, welches System im darauffolgenden Jahr in Betracht gezogen wird).

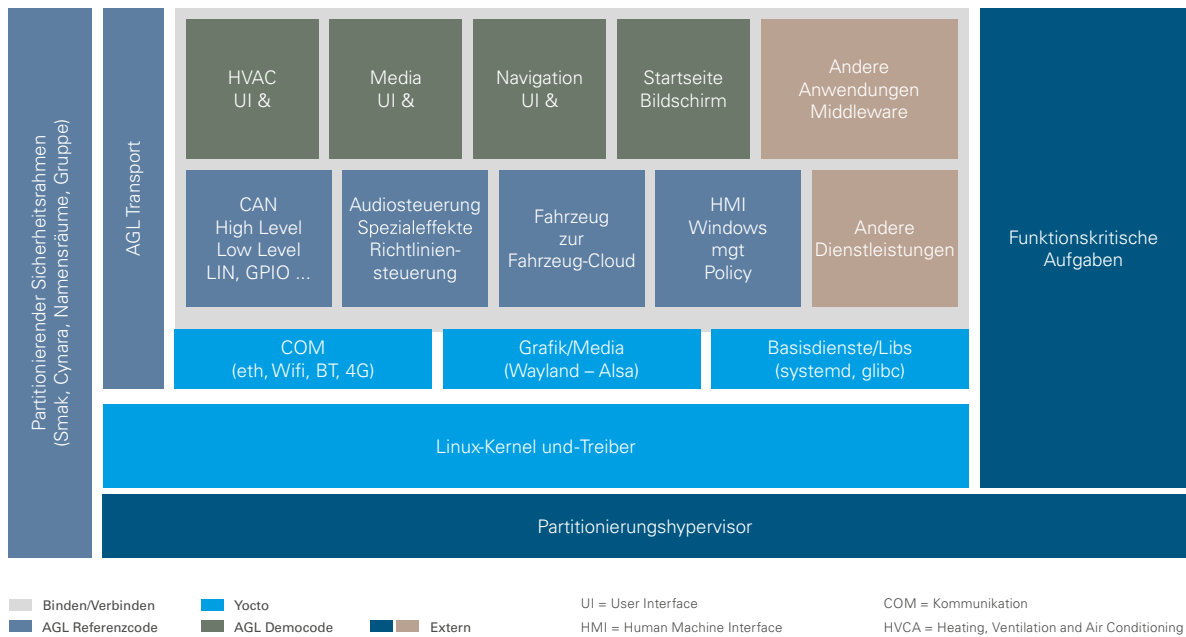
Durch die lizenzbedingte Offenheit des Linux-Kernel-Quellcodes sowie vieler grundlegender Anwendungen aus dem Linux-Universum gibt es zwei grundlegende Ansätze, ein nutzbares Linux-Betriebssystem auszuliefern. Die Kompilierung des Kernels und aller Anwendungen aus den öffentlichen Quellen bietet die größte Flexibilität zur Anpassung. Gleichzeitig erfordert dieser Ansatz weitreichende Entwicklerkompetenzen. Die notwendige Verwaltung der Abhängigkeiten zwischen Bibliotheken unterschiedlicher Versionen verursacht einen hohen Aufwand. Linux-Distributionen packen einen kompilierten Kernel mit ausgewählten Anwendungspaketen zu einer auslieferbaren Einheit. Während fertige Distributionen den notwendigen Aufwand zur Bereitstellung eines lauffähigen Betriebssystems wesentlich reduzieren, ist die Anpassbarkeit von Kernbestandteilen eingeschränkt. Bekannte Vertreter im Desktop-Bereich sind Ubuntu und Debian. Ubuntu Linux stellt auch die Basis des Frameworks zum hochautomatisierten Fahren von Baidu dar. Einen Mittelweg kennzeichnen Baukastensysteme, die das Zusammensetzen eines modularen Linux-Systems aus entsprechend paketierten Quellcode-Artefakten erlauben. Das Yocto-Projekt verfolgt einen auf den Embedded-Linux-Bereich fokussierten Ansatz unter der Regie der Linux Foundation.

Bei fokussierter Betrachtung des Automobil-Kontexts sind Automotive Grade Linux und Android Automotive die linuxbasierten Entwicklungsansätze mit dem höchsten Zuspruch. Zum aktuellen Zeitpunkt sind bereits elf OEMs Mitglied des

Automotive Grade Linux Projekts unter der Leitung der Linux Foundation. Das Ziel des AGL-Projekts ist es, Aufwände bei der Entwicklung eines fahrzeugeigenen Betriebssystems auf Linux-Basis zu bündeln. Neben AGL wird das primär von Google entwickelte Android als Android Automotive für den Einsatz als In-Vehicle-Infotainment (IVI)-Betriebssystem erweitert. Aktuell bestehen Kooperationen zu den OEMs Audi, Volvo, Renault, Nissan, Mitsubishi, General Motors und der Groupe PSA.

#### ■ Automotive Grade Linux und Embedded-Linux-Distributionen

Unter dem Dach der Linux Foundation sind 142 Firmen Mitglied des AGL-Projekts, davon elf OEMs sowie eine Vielzahl von Firmen aus dem Automobilzulieferbereich und dem Technologiesektor. Im AGL wird eine Linux-Distribution, genannt Unified Code Base (UCB), zum Einsatz im Fahrzeug entwickelt. Die UCB hat den Anspruch, 70–80 % der Grundlage eines serienreifen Produkts für Infotainment- bzw. Connected-Car-Anwendungen bereitzustellen.



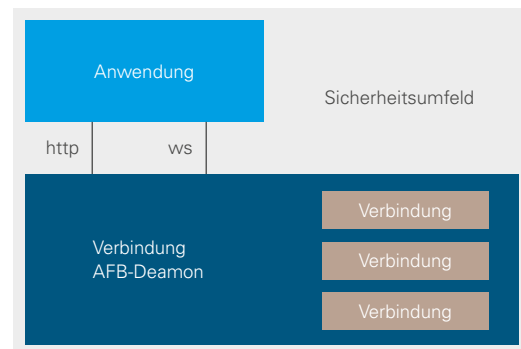
Quelle: <https://docs.automotivelinux.org/docs/en/master/architecture/reference/security/README.html>

Abbildung 10: Automotive Grade Linux System-Architektur

Abbildung 10 veranschaulicht die Systemarchitektur von AGL. AGL sieht den Einsatz eines Hypervisors vor, um sicherheits- bzw. echtzeitkritische Aufgaben zu entkoppeln. Auf Basis eines modularen Yocto-Linux-Systems stellt AGL die Grundlagen einer serviceorientierten Fahrzeugplattform bereit. Das durchgehende Sicherheitskonzept von AGL setzt auf Isolation der einzelnen Anwendungen und Dienste und soll unterschiedliche Berechtigungsebenen unterstützen. AGL enthält mit Wayland einen im Linux-Desktop-Bereich etablierten Windows-Manager für grafische Schnittstellen. Neben der Möglichkeit nativer grafischer Oberflächen, z. B. mithilfe von Bibliotheken wie QT, sieht AGL den Einsatz der W3C-Empfehlung Packaged Web Apps (Widgets) für grafische Anwendungen vor. Widgets setzen auf den im Internet etablierten, plattformunabhängigen Standard HTML5.

AGL ist stark serviceorientiert. Die zentrale Komponente des AGL-Anwendungsframeworks ist der Application Framework Binder (siehe Abbildung 11). Jede Anwendung interagiert über klar definierte APIs mit einer expliziten Auswahl an Diensten. Der Binder läuft als separater Prozess pro Anwendung und stellt die benötigten Dienst-APIs zur Verfügung. Im Falle einer HTML5-Anwendung agiert er auch gleichzeitig als Webserver

zur Bereitstellung der Anwendung selbst. Die benötigten APIs werden durch die Anwendung in Form von Bindings definiert. Dabei können Anwendungen eigene Dienste in Form dynamischer Bibliotheken mit ausliefern, die vom Binder-Prozess geladen und bereitgestellt werden. Gleichmaßen können Bindings auch gegen andere Dienste auf demselben bzw. einem über das Netzwerk erreichbaren System erfolgen.



Quelle: [https://docs.automotivelinux.org/docs/en/master/apis\\_services/reference/af-binder/afb-overview.html](https://docs.automotivelinux.org/docs/en/master/apis_services/reference/af-binder/afb-overview.html)

Abbildung 11: Serviceorientierte Anwendungen in AGL

Neben AGL existieren eine Reihe weiterer Linux-Distributionen, die im Fahrzeug zum Einsatz kommen. Der US-amerikanische Automobilkonzern Tesla setzt auf eine eigene Abspaltung vom Linux-Kernel. Aufgrund des bislang bestehenden hohen Anpassungsaufwands einer spezifischen Automotive-Linux-Distribution kommt im Forschungsumfeld zumeist eine Desktop-Linux-Distribution zum Einsatz. Hohe Verbreitung genießt hier Canonicals Ubuntu, da es auch zu den Desktop-Markt dominierenden Distributionen gehört.

■ Android im Fahrzeugeinsatz

Während das Betriebssystem Android an sich Open-Source, d. h. der Quellcode seiner Bestandteile frei verfügbar ist, gilt das nicht in gleichem Maße für zentrale Dienste des Betriebssystems. Zur klareren Unterscheidung bezeichnet AOSP (Android Open Source Project) die frei zugänglichen Quellen. Android ist eine von Google geschützte Marke und bezeichnet das durch Google kontrollierte Ökosystem.

Android Automotive (Abbildung 12) erweitert das AOSP Betriebssystem insbesondere um eine Fahrzeug-Abstraktionsebene (Vehicle Hardware Abstraction Layer, VHALL). Das VHALL definiert eine Menge von Eigenschaften, die den aktuellen Fahrzeugzustand repräsentieren (z. B. Ladezustand der Batterie) oder Fahrzeugfunktionen abstrahieren (z. B. Einstellung der Temperatur im Fond). Die Menge an Eigenschaften kann durch den OEM erweitert werden, um Spezifika der eigenen Fahrzeugplattform zu repräsentieren. Diese Anpassung, bzw. die Abbildung der VHALL-Schnittstellen auf Funktionalität im Fahrzeug, obliegt dem OEM bzw. dem Zulieferer des Infotainment-Steuergeräts.

Im chinesischen Raum besteht mit AliOS eine durch eine Tochterfirma der Alibaba Group vorangetriebene Abspaltung von Android, die auch im Bereich IVI zum Einsatz kommen soll. AliOS wird von Google als inkompatibel eingestuft, damit bleibt der Plattform die Möglichkeit Google-Dienste zu integrieren verwehrt.

■ POSIX-kompatible RTOS

Neben den aufkommenden linuxbasierten Ansätzen ist der Bereich dynamischer Betriebssysteme für den Einsatz im Automobil vor allem von dem Echtzeitbetriebssystem QNX Neutrino RTOS dominiert. Nach einer Analyse von IHS Markt setzen 2017 48% der Infotainment-Systeme in Fahrzeugen auf das Betriebssystem QNX. QNX ist ein proprietär entwickeltes Betriebssystem, das kompatibel zum POSIX-Standard ist.

Im Gegensatz zum umfangreichen monolithischen Kernel von Linux setzt QNX Neutrino auf einen Mikrokern-Ansatz. Mikrokern-Systeme reduzieren den Kern des Betriebssystems auf minimal notwendige Funktionalität und lagern alle sonstigen Systemdienste in eigenständige, nichtprivilegierte Prozesse aus. Durch die erheblich reduzierte Komplexität des Betriebssystemkerns fällt es leichter, diesen zu härten bzw. zu verifizieren. Die Verschlankung des Betriebssystemkerns führt zu einem erhöhten Kommunikationsaufwand zwischen Prozessen, in die Betriebssystemfunktionalität ausgelagert wird. Durch die Entkopplung der einzelnen Betriebssystembestandteile ist es möglich, diese unabhängig voneinander auszutauschen bzw. zu aktualisieren.

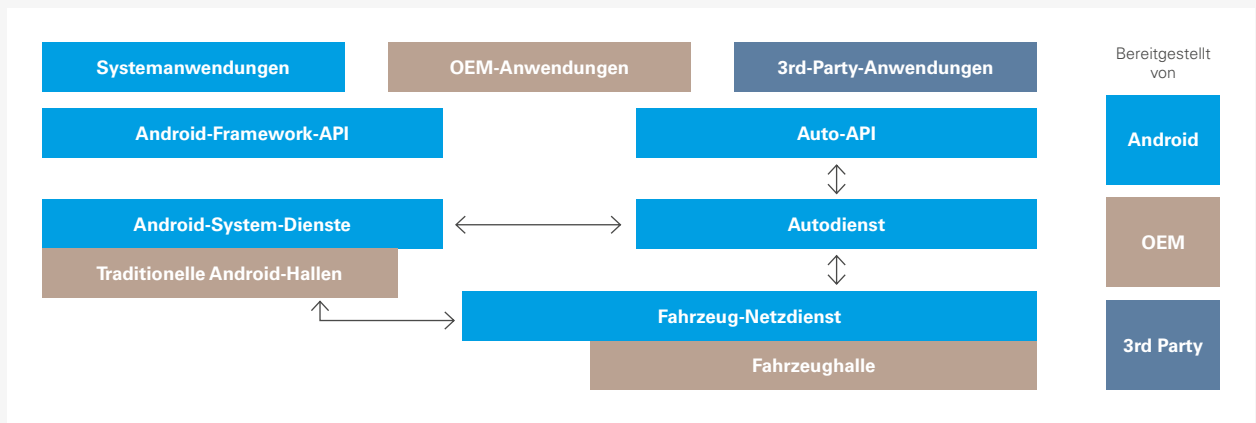


Abbildung 12: Architektur von Android Automotive

Quelle: <https://source.android.com/devices/automotive>

Bekannte Vertreter neben QNX Neutrino RTOS sind:

- Integrity von Green Hills Software
- VxWorks von Wind River
- Nucleus RTOS von Mentor

Alle o. g. Betriebssysteme werden unter proprietärer Lizenz vertrieben. Alle bewerben Unterstützung einer Zertifizierung für sicherheitsrelevante Systeme nach DO-178C, IEC 61508 SIL 3 oder ISO 26262 ASIL-D. Dieses Zertifizierungsniveau wird aktuell von keinem der linuxbasierten Ansätze erreicht.

Es existieren in diesem Bereich keine Open-Source-Entwicklungen, die sich für den produktiven Einsatz eignen. Letzteres ist auch durch den hohen Aufwand beeinflusst, der mit der Zertifizierung nach den unterschiedlichen Industrie-Standards (z. B. ISO 26262) einhergeht.

#### ■ Sonstige Entwicklungen

In einem 2020 gegründeten Joint Venture arbeiten LG Electronics und Luxoft an einer Softwareplattform für IVI-Anwendungen auf Basis von webOS. webOS wird heute primär von LG als Betriebssystem für Smart-TVs verwendet und setzt wie AGL und Android Automotive auf Linux als Betriebssystemgrundlage. Quellcode, Entwicklungswerkzeuge und weiterführende Dokumentation stehen ausschließlich Kunden und Partnern von LG zur Verfügung.

Bedingt durch die 2019 in den USA erlassenen Handelsbeschränkungen kündigte Huawei die Entwicklung eines eigenständigen Betriebssystems als Alternative zu Android an. Das Harmony OS (im chinesischen Sprachraum Hongmeng OS), basiert auf einem eigenen Mikrokern. Harmony OS ist nach Aussage von Huawei für ein breites Gerätespektrum ausgelegt, unter anderem auch für den Einsatz in Fahrzeugen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind außerhalb Chinas noch keine Geräte auf Basis von Harmony OS auf dem Markt erschienen. Den Einsatz in Fahrzeugen sieht Huawei nicht vor dem Jahr 2022.

### Automotive Grade Hypervisor

Durch die zunehmende Konsolidierung von Funktionalität auf einer abnehmenden Anzahl von ECUs entsteht der Bedarf, z. B. ein linuxbasiertes Infotainmentsystem zusammen mit sicherheitskritischer Funktionalität zu betreiben (Mixed Criticality). Virtualisierung der Ausführungsumgebung ist ein zentraler

Mechanismus bei der Umsetzung von Mixed-Criticality-Systemen.

### Durch Einsatz eines Hypervisors ist es möglich, mehrere Betriebssysteme unabhängig voneinander auf der gleichen ECU zu betreiben.

Der Hypervisor ist ein besonderes Betriebssystem, das die gesamten Hardware-Ressourcen verwaltet und sie eingeschränkt den parallel auszuführenden Gast-Betriebssystemen zur Verfügung stellt. Zu diesen Ressourcen zählen insbesondere Central-Processing-Unit(CPU)-Zeit und Hauptspeicher.

Um echtzeitfähige Gastssysteme gemäß deren Anforderungen auszuführen, muss auch der Hypervisor Echtzeitfähigkeit aufweisen. Darüber hinaus muss das für jeden Teil der zu konsolidierenden Funktionalität geforderte Zuverlässigkeitslevel (z. B. ASIL bei ISO 26262 oder SIL bei IEC 61508) vom Hypervisor erbracht werden.

Kommerzielle Hypervisor-Betriebssysteme für den Fahrzeug-einsatz sowie POSIX-kompatible RTOS bewerben die Grundlage zur Zertifizierung nach insbesondere IEC 61508 SIL 3 oder ISO 26262 ASIL-D. Beispiele solcher Hypervisoren sind:

- QNX Hypervisor von Blackberry
- PikeOS Certified Hypervisor von SYSGO GmbH
- EB corbos Hypervisor von Elektrobit Automotive GmbH
- COQOS Hypervisor von OpenSynergy GmbH
- Mentor Embedded Hypervisor von Mentor Graphics

Virtualisierung ist theoretisch transparent für das Gastsystem. Damit ist es möglich, jedes mit der virtualisierten Hardware kompatible System in einer virtuellen Maschine auszuführen. Zur Steigerung der Performance haben sich dedizierte Treiber für die virtualisierten Hardwareeinheiten im Gastbetriebssystem bzw. zum direkten Zugriff auf einzelne echte Hardwarekomponenten bewährt (Para-Virtualisierung). Eine Unterstützung des Gastsystems durch den Hypervisor ist dafür erforderlich. Alle o. g. Produkte bewerben Unterstützung für Linux, Android und AUTOSAR Classic Anwendungen.

### Betriebssysteme auf Fahrzeugniveau

Betriebssysteme im klassischen Sinn werden auf einer konkreten (ggfs. virtualisierten) Hardwareumgebung ausgeführt. Diese Hardwareumgebung ist durch die ECU bestimmt, auf der das System ausgeführt wird.



**Durch zunehmende Vernetzung bzw. höheren Integrationsgrad der einzelnen Funktionen entsteht der Bedarf eines übergeordneten Abstraktionsniveaus auf Fahrzeugebene.**

Dieses notwendige Abstraktionsniveau wird im AUTOSAR Classic Standard durch das Konzept des Virtual Function Bus realisiert, bei AUTOSAR Adaptive durch Functional Clusters. Beides stellt eine Abstraktion der eigentlichen Funktionalität von der zugrunde liegenden Hardware dar. Zu einem bestimmten Zeitpunkt muss eine Abbildung der Softwarekomponente, welche die Funktionalität realisieren, auf eine konkrete Ausführungsumgebung erfolgen. Zwischen miteinander kommunizierenden Komponenten muss eine Datenverbindung existieren. Beim AUTOSAR Classic Standard erfolgt die Festlegung der Kommunikationsverbindungen bereits während der Systementwicklung, z. B. durch Abbildung auf z. B. CAN-Bus-Signale zwischen ECUs. Durch Verwendung ethernet-basierter Protokolle kann bei AUTOSAR Adaptive der eigentliche Kommunikationsweg auch erst zur Laufzeit feststehen. Zur Realisierung höherwertiger Funktionalität ist daher auf Fahrzeugebene eine ECU-übergreifende Abstraktion der nachfolgenden Aspekte notwendig.

- Eigenschaften des Fahrzeugs bzw. Daten zum aktuellen Fahrzeugzustand
- Verfügbare Dienste durch Betriebssystem bzw. andere Softwarekomponenten
- ECU-übergreifende Kommunikation zwischen Softwarekomponenten und Diensten

Ausgehend vom wissenschaftlichen Sektor hat sich im Bereich hochautomatisierter Fahrfunktionen das Robot Operating System (ROS) etabliert. ROS kapselt Softwarekomponenten (genannt Nodes) und vermittelt die nachrichtenbasierte Kommunikation zwischen ihnen. ROS wird als Open-Source-Projekt unter Führung der Open Source Robotics Foundation entwickelt. Während ROS intensiven Einsatz in wissenschaftlichen Prototypen findet, gibt es zwei wesentliche Einschränkungen, die einen Einsatz in sicherheitskritischen Umgebungen verhindern.

- Zentraler Master notwendig, der als Service Registry eine Übersicht über alle Knoten im System behält; der Master stellt einen Single Point of Failure dar
- Kommunikation zwischen Knoten bzw. mit dem Master ist nicht echtzeitfähig

Diesen Limitierungen wurde in mehreren Ansätzen begegnet. ROS2, der direkte Nachfolger von ROS, setzt auf den Standard DDS (Data Distribution Service) der Object Management Group. DDS spezifiziert eine Kommunikationsmiddleware, für die sowohl kommerzielle (z. B. RTI Connex DDS) als auch Open-Source-Implementierungen (z. B. OpenDDS) verfügbar sind. DDS findet nach Angaben von RTI bereits vielfältig Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen der Luft- und Raumfahrt.

Apex.AI entwickelt das mit ROS2 kompatible, kommerzielle und unter proprietärer Lizenz stehende Apex.OS. Das erklärte Ziel ist, eine vollständig deterministische und echtzeitfähige Ausführung zu ermöglichen sowie die Zuverlässigkeit des gesamten Frameworks zu erhöhen. Apex.OS ist nach ISO 26262 für Anwendungen bis ASIL-D zertifiziert.

Neben Apex.AI entwickelt der chinesische Konzern Baidu die Open-Source-Plattform für autonomes Fahren Apollo. Abbildung 13 veranschaulicht die einzelnen Bausteine der Apollo-Plattform. Apollo setzt als Betriebssystem auf Ubuntu Linux, versieht dieses aber mit einem um Echtzeitfähigkeit ergänzten Linux-Kernel (Apollo Linux Kernel). Zur Kommunikation der einzelnen Softwarekomponenten setzt Apollo auf eine eigene, ROS-basierte Entwicklung. Diese adressiert das Problem des zentralen Master-Knotens und bringt spezifische Performance-Verbesserungen mit.

Neben apollo.auto existieren weitere Projekte, kommerziell und open-source, mit dem Ziel der Etablierung einer Plattform für hochautomatisiertes Fahren. NVIDIAs Drive OS realisiert unter Verwendung von QNX auf Basis eigener Hardware ein nach ISO26262 ASIL-C/D zertifiziertes System. Dabei liegt ein Schwerpunkt in der Unterstützung von Computervision, Bildverarbeitung und tiefen neuronalen Netzen.

Autoware.Auto setzt auf ROS2 auf und realisiert eine Open-Source-Plattform für hochautomatisiertes Fahren. Der Schwerpunkt liegt auf der Bereitstellung einer „All-in-one“-Lösung, d. h. einer Auswahl von Softwarekomponenten für alle wesentlichen Funktionen des hochautomatisierten Fahrens. Die Entwicklung von Autoware.Auto wird durch die Autoware Foundation gefördert.

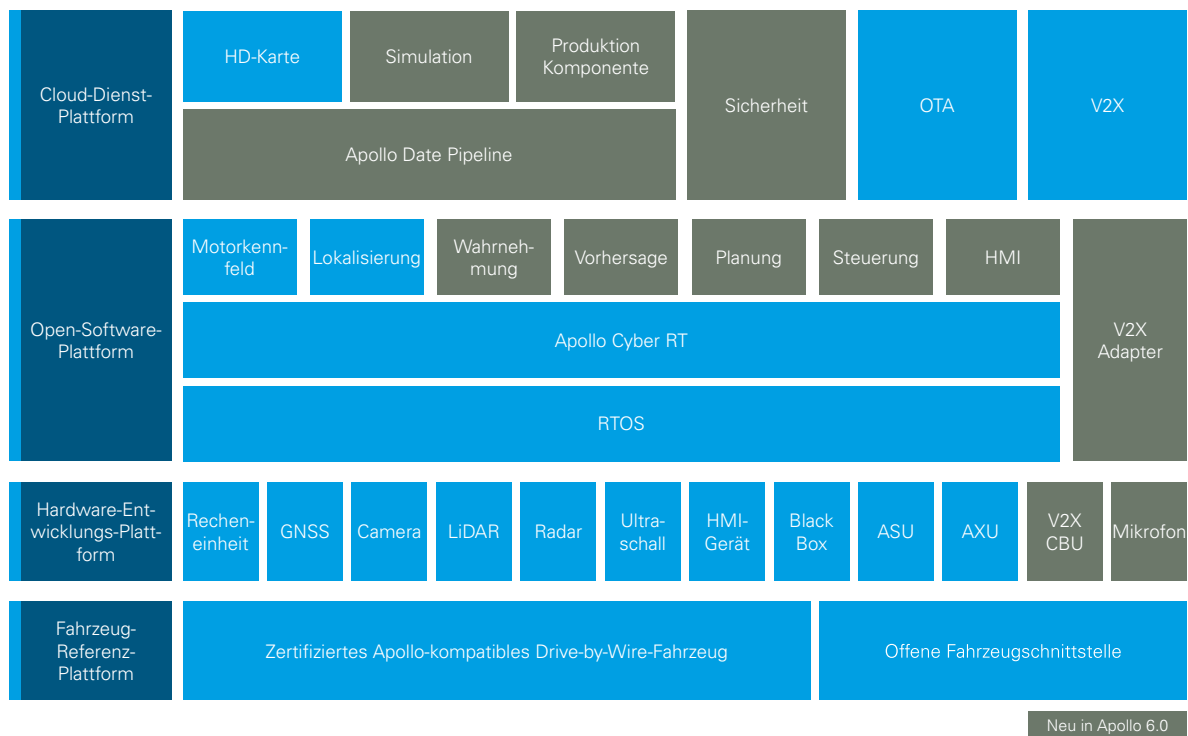
Quelle: <https://github.com/ApolloAuto/apollo>

Abbildung 13: Systembausteine der Apollo-Plattform

### Plattformökosystem

Neben der Betrachtung der Betriebssysteme auf ECU- bzw. auf Fahrzeugebene, die primär durch technische und funktionale Gesichtspunkte dominiert wird, bedarf es zusätzlich einer übergeordneten Betrachtung auf Ökosystemebene.

**Moderne Fahrzeuge stellen keine isolierten Einheiten mehr dar, da für Kunden, insbesondere im Premium-Segment, Connected-Car-Anwendungen zu einem wesentlichen Kaufkriterium werden.**

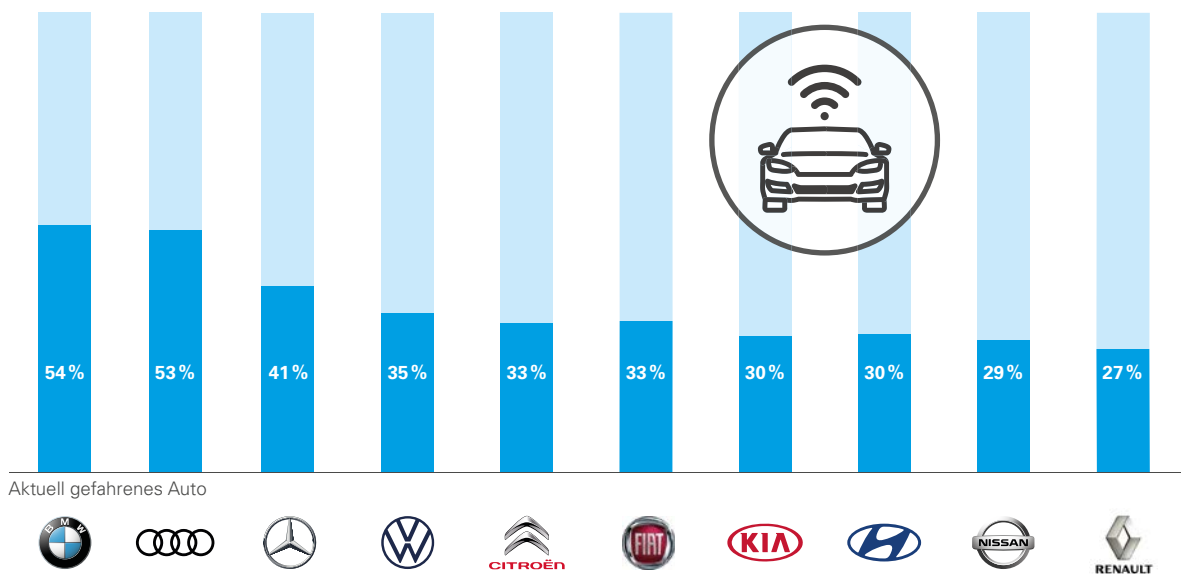
Abbildung 14 veranschaulicht die Ergebnisse einer diesbezüglichen Befragung von 2015 unter Pkw-Besitzern. Während sich im Smartphone-Markt mittlerweile ein Quasi-Duopol der Anbieter Apple und Google entwickelt hat, beginnt diese Entwicklung im Bereich der Connected Car Anwendungen erst.

Die funktionierende Expansion setzt voraus, dass es externen Entwicklern möglich ist, Anwendungen für den Einsatz auf einer Fahrzeugplattform zu entwickeln und über standardisierte Kanäle zu vertreiben. Ein damit zusammenhängender wesentlicher Punkt besteht in der Möglichkeit, Anwendungen bzw. Teile des Betriebssystems regelmäßig zu aktualisieren.

Durch die starke Positionierung im Smartphone-Markt hat Google zum jetzigen Zeitpunkt einen wesentlichen Vorsprung gegenüber möglichen OEM-Ökosystemen. Android Automotive entspricht in wesentlichen Teilen dem Smartphone-Betriebssystem Android, das um zusätzliche Schnittstellen ergänzt wurde. Es existieren bereits eine große Entwickler-Community sowie etablierte Vertriebswege.

### Premium-Marken-Fahrern ist Connected Car eher wichtig

Connected Car als Entscheidungskriterium beim nächsten Autokauf



Aktuell gefahrenes Auto

Befragt wurden 3.303 PKW-Besitzer (privates Fahrzeug und Dienstwagen), die einen Neuwagen fahren oder den Kauf eines Neuwagens demnächst planen

Quelle: <https://de.statista.com/infografik/3658/connected-car-als-entscheidungskriterium-beim-naechsten-autokauf/>

Abbildung 14: Relevanz von Connected-Car-Anwendungen

### 1.2.3 Standards, Patente, Open-Source-Initiativen und Projekte

Dieser Abschnitt widmet sich den etablierten Standards in Bezug auf die im vorherigen Abschnitt diskutierten Betriebssysteme sowie den dahinterstehenden Organisationen.

Im Hinblick auf Standardisierung von Software bzw. Softwareausführungsumgebungen im Fahrzeug ist die zentrale Organisation die Automotive Open System Architecture (AUTOSAR). Der AUTOSAR Standard definiert sowohl eine Entwicklungsmethodik als auch eine Software-Architektur für ECUs. Während die AUTOSAR Spezifikationen allgemein zugänglich sind, ist deren Einsatz bzw. der Zugriff auf Implementierungen den AUTOSAR Mitgliedern vorbehalten. Abbildung 15 zeigt die Mitgliederentwicklung seit Gründung 2003. Neben der relativ konstanten Anzahl von Kern- und Premium-Partnern ist

die kontinuierliche Zunahme von Development-Partnern erkennbar.

Der durch Bosch initiierte COMASSO e.V. hat das Ziel eine für alle AUTOSAR Mitglieder freie Basissoftware (BSW) zur Verfügung zu stellen. COMASSO möchte damit dem hohen Integrations-, Konfigurations- und Testaufwand begegnen, der sich beim Austausch verschiedener BSW-Implementierungen ergibt. Kritisiert wird die fehlende Differenzierung der einzelnen BSW-Implementierungen. Durch gemeinschaftliche Entwicklung einer BSW soll den einzelnen Mitgliedsfirmen mehr Entwicklungskapazität für eigentliche Innovationen übrigbleiben. Darüber hinaus regelt der Verein die frei kommerzielle Nutzung der entwickelten Komponenten für alle beteiligten Firmen. Die GENIVI Alliance ist ein Zusammenschluss verschiedener OEMs, Zulieferer sowie Technologieunternehmen mit dem Ziel, eine standardisierte linuxbasierte Middleware für IVI zu

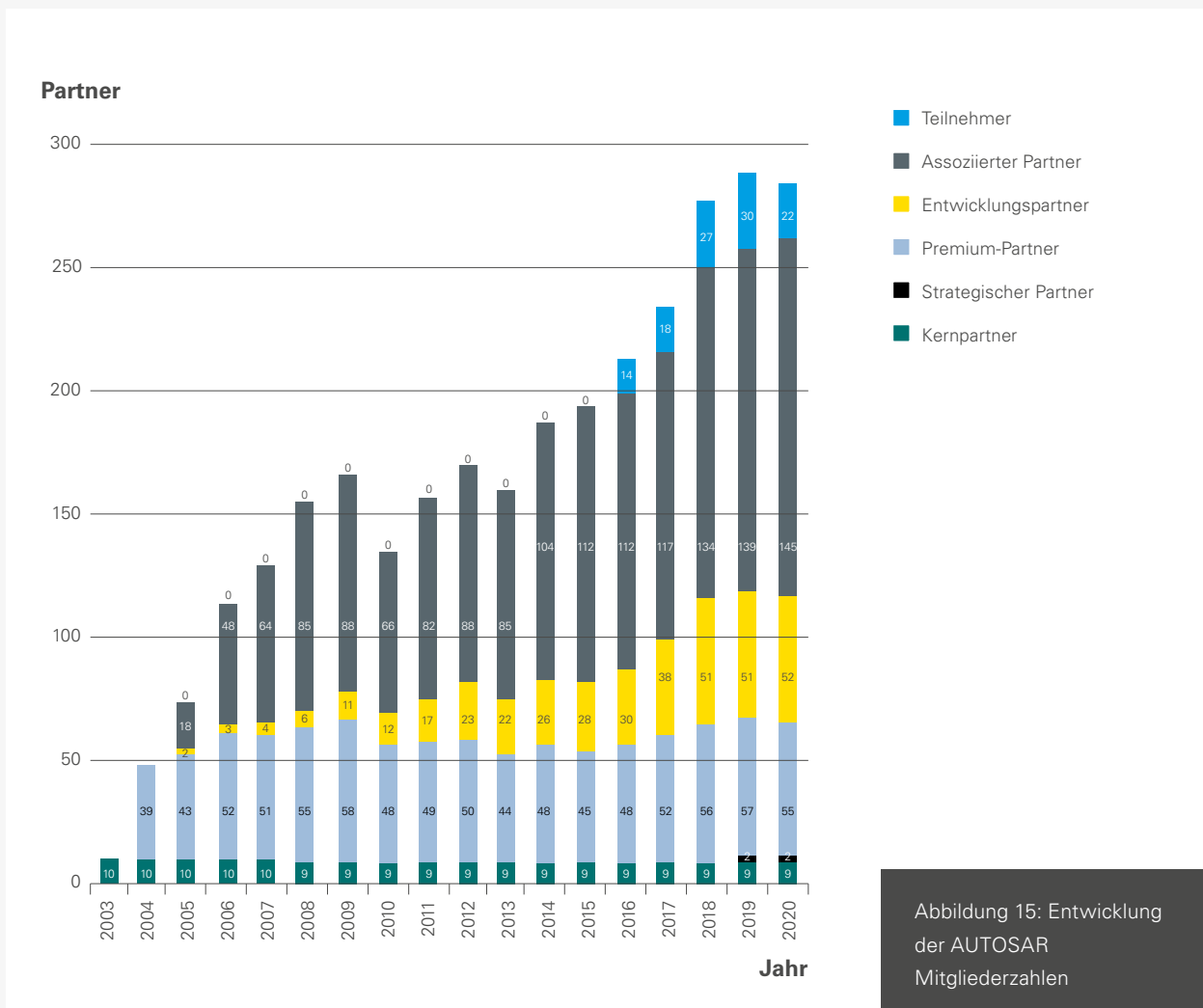


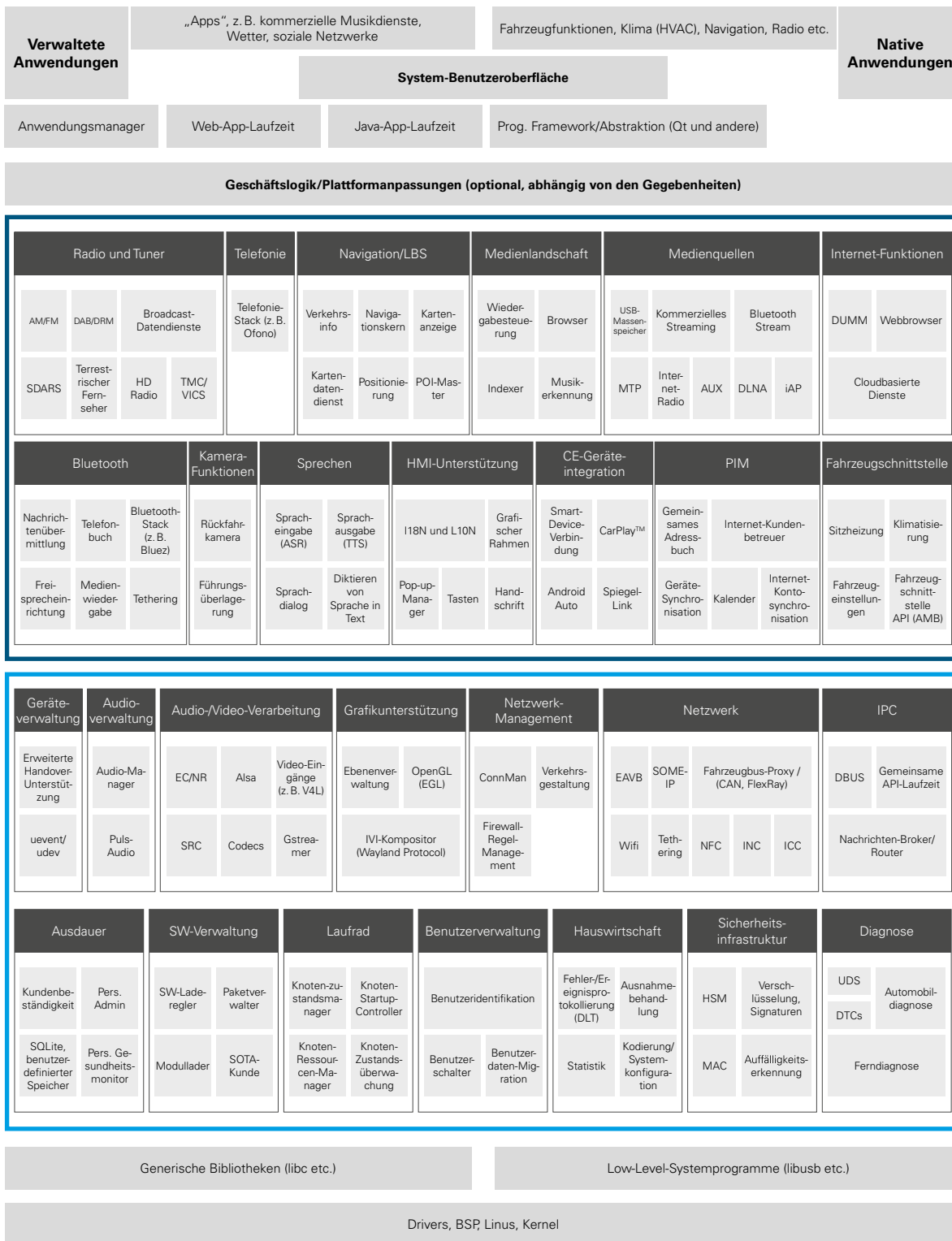
Abbildung 15: Entwicklung der AUTOSAR Mitgliederzahlen

Quelle: [https://www.autosar.org/fileadmin/ABOUT/AUTOSAR\\_EXP\\_Introduction.pdf](https://www.autosar.org/fileadmin/ABOUT/AUTOSAR_EXP_Introduction.pdf)

definieren. Zu diesem Zweck definiert GENIVI eine Referenzarchitektur sowie eine Reihe von Werkzeugen, um die Entwicklung von Anwendungen für IVI-Systeme zu vereinfachen (GENIVI Development Platform). Als Teil der Referenzarchitektur standardisiert GENIVI Softwarekomponenten anhand von Anforderungen bzw. ihrer Schnittstellen. Mitgliedsfirmen können ihre Softwarekomponenten nach der GENIVI Compliance Specification zertifizieren lassen und im Anschluss als GENIVI Compliant vermarkten. Diese Trademark der GENIVI Alliance soll die Integration von Softwarekomponenten unterschiedlicher Hersteller vereinfachen. Abbildung 16 veranschaulicht in Gelb und Violett die Elemente der durch GENIVI standardisierten Middleware. Ausführliche Spezifikationen und Architekturdokumentation stehen nur GENIVI-Mitgliedern zur Verfügung. Im Gegensatz zu implementierten Artefakten bei AUTOSAR

bzw. COMASSO geschieht die Entwicklung bei GENIVI öffentlich.

Drei Jahre nach Gründung der GENIVI Alliance wurde 2012 unter dem Dach der Linux Foundation das Automotive-Grade-Linux (AGL)-Projekt gestartet. Im AGL-Projekt kollaborieren die Mitglieder bei der Entwicklung einer linuxbasierten Plattform für Softwaresysteme im Fahrzeug. Im Gegensatz zu GENIVI fokussiert sich AGL mittlerweile nicht mehr ausschließlich auf die Entwicklung von IVI Systemen. Neben visuellen Systemen hat AGL das Ziel, die Entwicklung von Software insbesondere für Fahrerassistenzsysteme (ADAS) bzw. für hochautomatisiertes Fahren zu ermöglichen. Die Spezifikationsdokumente sowie die Unified Code Base (UCB) stehen frei zur Verfügung. Zusätzlich zur gemeinsamen öffentlichen



Quelle: [https://at.projects.genivi.org/wiki/display/GRK/2\\_Reference+Architecture+and+Compliance+Specification](https://at.projects.genivi.org/wiki/display/GRK/2_Reference+Architecture+and+Compliance+Specification)

Abbildung 16: Übersicht über die durch GENIVI adressierten Komponenten

Entwicklung der UCB bemüht sich das AGL-Projekt um die Vermittlung von Produkten und Diensten zwischen Firmen, die AGL-Mitglied sind.

Neben AGL stehen unter anderem auch die Projekte Yocto Linux sowie das Echtzeitbetriebssystem Zephyr unter der Verwaltung der Linux Foundation. Yocto Linux, ein Baukasten für eingebettete Linux Distributionen, stellt auch die Grundlage der GENIVI Developer Platform dar.

Während AGL unter der Verwaltung einer dem Open-Source-Gedanken verpflichteten Stiftung entwickelt wird, erfolgt die primäre Entwicklung von Android Automotive durch den Technologiekonzern Google. Die durch Google gegründete Open Handset Alliance (OHA) hat das Ziel, die einheitliche Entwicklung des Android Betriebssystems sicherzustellen. Mitglieder der OHA sichern zu, keine Geräte zu entwickeln, die auf einer von Google als inkompatibel erachteten Version von Android basieren. Im Gegenzug erhalten sie Zugang zu gemeinsamen Standards. Zum aktuellen Zeitpunkt beschränkt sich die OHA auf Mobiltelefone; mit zunehmender Verbreitung von Android Automotive ist es vorstellbar, dass auch bei Fahrzeugen eine Vereinheitlichung angestrebt wird.

Eine ausführliche Diskussion der Patentlage ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Dennoch wollen wir im Besonderen auf die Risiken eingehen, die sich aus der Verwendung von Open-Source-Software ergeben. Eine 2007 im Auftrag der Linux Foundation durchgeführte Patentstudie identifizierte in der US-Patentdatenbank 4.697 gewährte und 16.694 Patentanmeldungen, die auf Linux verwiesen. 2017 schätzte Endo Masato (Toyota) die Zahl der linuxbezogenen Patente auf über 300.000.

Zur Vereinfachung der linuxbezogenen Patentlage wurde 2005 von IBM, Novell, Philips, Red Hat und Sony das Open Innovation Network (OIN) gegründet. Firmen, die im OIN Mitglied sind, sichern einander zu, auf das Erheben von Ansprüchen auf den Linux Kernel und ausgewählter Linux-Anwendungen zu verzichten. Zum aktuellen Zeitpunkt stehen den ca. 3.300 Mitgliedern so über 2,5 Mio. Patente bzw. Patentanmeldungen zur Verfügung. Das OIN hält selbst ca. 1.300 Patente. Aus dem Automobilsektor sind als Mitglieder insbesondere Daimler, Ford, Honda, Hyundai und Toyota zu erwähnen, allesamt auch Mitglied des AGL-Projekts. Eine vergleichbare Initiative aus dem Android Umfeld ist das Android Networked Cross-License Agreement, indem sich die Mitgliedsfirmen, u. a. Google, gegenseitig Rechte auf Patente zu Android bzw. zu Android-

Anwendungen einräumen. Daneben existiert mit dem License on Transfer (LOT) Network eine gemeinnützige Organisation mit dem Ziel, die Mitglieder vor Patentklagen durch sogenannte Patenttrolle zu schützen. Patentroll bezeichnet eine Firma, die Patente erwirbt, einzig um Patentklagen gegen andere Firmen anzustreben. Laut LOT Network beteiligen sich bereits über 900 Firmen, darunter die sieben größten Automobilkonzerne.

#### 1.2.4 Erkenntnisse und zukünftige Anforderungen

Der Übergang von klassischer Verbrennungsmotor-Technologie hin zur Elektromobilität wirkt sich unmittelbar lediglich auf fachinhaltlicher Ebene auf die Softwaresysteme aus. So wird sowohl bei Verbrennungs- als auch bei E-Fahrzeugen zunehmend Software benötigt, deren Aufgabenspektrum sich zwar fachinhaltlich unterscheidet, jedoch keinen tiefgreifenden technologischen Wandel bedingt. Nach wie vor bedarf es der Umsetzung hart echtzeitkritischer regelungstechnischer Aufgaben sowie höherer Funktionalität. Auf fachlicher Ebene eröffnen sich neue Integrationspotenziale, wie z. B. die Einbindung des batterieelektrischen Fahrzeugs als temporärer Strompuffer in zukünftigen dezentralen Stromnetzen. Mittelbar steigt jedoch die Notwendigkeit einer leistungsfähigen und flexiblen Softwareplattform. Die prinzipbedingte Vereinfachung des Antriebssystems führt dazu, dass zukünftig Differenzierung vorwiegend durch in Software realisierte Funktionalität erreicht wird (Software-Defined Vehicle).

**Der parallel zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs verlaufende Trend zur zunehmenden Automatisierung von Aufgaben im Fahrzeug, weg von reinen Assistenzsystemen hin zu autonomen Planungs- und Entscheidungssystemen, schlägt sich in der zukünftigen Betriebssystemlandschaft im Fahrzeug nieder.**

So werden autonome Fahrzeuge künftig eigenständige Entscheidungen auf Grundlage verfügbarer Daten treffen, während automatisierte Fahrzeuge heute vorwiegend Vorschläge an den entscheidungsverantwortlichen Fahrer übermitteln.

Es ergeben sich unter anderem folgende zentrale Anforderungen an zukünftige Betriebssysteme.

- Zunehmende funktionale Integration vormals isolierter Komponenten erzeugt einen erhöhten Kommunikations- und Koordinierungsbedarf. SoA erleichtert die Entkopp-



lung von Softwarekomponente und ausführendem Steuergerät. Die zugrundeliegenden Betriebssysteme müssen bei der Umsetzung eines serviceorientierten Designs durch Bereitstellen der notwendigen Schnittstellen und grundlegenden Dienste unterstützen. Zu diesen grundlegenden Aufgaben gehört vor allem die Etablierung eines zuverlässigen und effizienten Kommunikationskanals zwischen Services bzw. die Zuordnung von Abhängigkeiten durch Service-Discovery.

- Steigende Softwarekomplexität durch die zunehmende Menge an in Software realisierter Funktionalität. Einerseits kann der Herausforderung durch den Einsatz leistungsfähigerer Hardware begegnet werden. Andererseits entsteht der Bedarf nach standardisierten System-schnittstellen, insbesondere zu Diensten des Fahrzeugs, um serienübergreifende Wiederverwendung von Softwarekomponenten zu ermöglichen.
- Steigende Komplexität durch neuartige Hardwarekomponenten. Insbesondere getrieben durch die Integration von neuronalen Netzen zur Realisierung zentraler Aufgaben steigt die Notwendigkeit spezialisierter Hardware, z. B. GPU (Graphics Processing Unit) und NPU (Numerical Processing Unit).
- Steigende Anforderungen an Systemzuverlässigkeit. Fail-safe ist nicht ausreichend, wenn keine direkte menschliche Rückfallebene gegeben ist. Stattdessen sieht das Softwaresystem des autonomen Fahrzeugs selbst Rückfallebenen und alternative Betriebsstrategien vor (fail-operational). Diese Anforderung muss auf mehreren Ebenen adressiert werden. Eine wesentliche Aufgabe des Betriebssystems ist es, unabhängige Funktionalitäten voneinander zu isolieren, sodass im Fehlerfall die Auswirkungen minimal gehalten werden können.

Das Anforderungsspektrum des autonomen Fahrzeugs kann nicht von einem Betriebssystem erfüllt werden. Für sicherheitskritische Aufgaben, insbesondere Sicherheitssysteme, die Gefahren für Leib und Leben verhindern, bedarf es auch weiterhin statischer, verifizierbarer Systeme. Höhere Funktionalitäten, wie Perzeption und Objekterkennung, bedürfen dagegen effizienter Kommunikationsmechanismen, da große Datenmengen zeitkritisch übertragen werden müssen. Durch Virtualisierung der leistungsstarken ECU-Hardware können Softwarekomponenten unterschiedlicher Kritikalitätsniveaus

kolloziert werden. Über diese Hardware-Virtualisierung wird ermöglicht, dass auf einer einzigen Hardwareressource voneinander separierte Anwendungen und Betriebssysteme ausgeführt werden können. Dies erfolgt über die Kapselung der einzelnen Systeme in sogenannten Virtuellen Maschinen und Hypervisoren. Eine zentrale Rolle spielt dabei die notwendige Härtung und Zertifizierung dieser Hypervisor-Systeme.

### 1.3 Over-the-Air-Updates

#### 1.3.1 Motivation für OTA-Updates

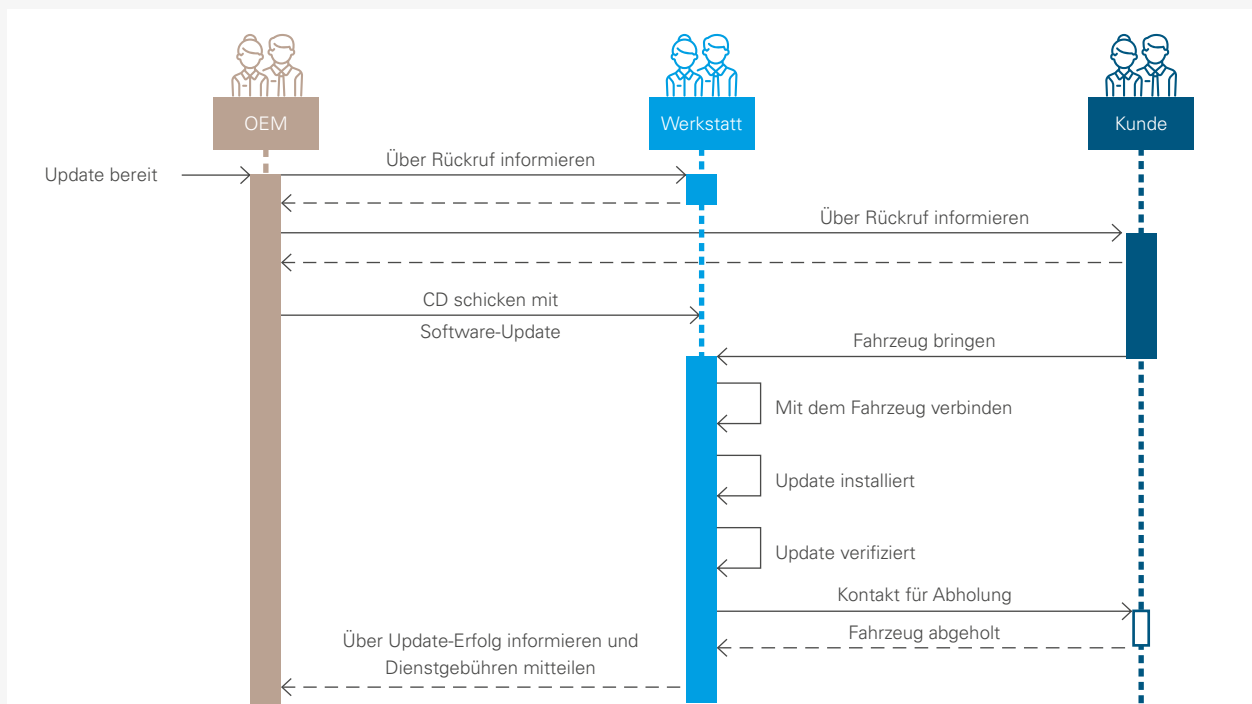
Mit den steigenden Softwareanteilen in modernen Fahrzeugen und der Verkürzung ihrer Lebenszyklen steigt der Bedarf an Wartung und Verbesserung dieser Anteile anhand von OTA-Updates, auch Software/Firmware OTA (SOTA/FOTA) genannt.

#### **OTA-Updates erlauben eine flexible und kostengünstige Funktionserweiterung und/oder Fehlerbehebung.**

Nach einem Technologiebericht der IHS Markit im Jahr 2015 aggregieren sich die Einsparungen von OEMs durch die Einführung von OTA-Updates bis zum Jahr 2022 auf einen Wert von 35 Mrd. USD, wobei der globale Marktwert für diese Updates bis dahin mehr als 7,1 Mrd. USD betragen wird (Bird, Jullussen, 2015).

Bisher wurden Updates oft nur in dringenden Fällen und im Rahmen von nationalen oder internationalen Rückrufaktionen durchgeführt, wie beispielsweise nach Auftritt von Softwarefehlern mit Auswirkungen auf die Betriebssicherheit (Safety) des Fahrzeugs. Allein in Deutschland wurden im Jahr 2019 390 solcher Prozesse gestartet, die ca. 3,2 Millionen Pkws betreffen haben (Kfz-Rueckrufe.de, 2020). Die dafür benötigten Prozesse verursachen jedoch erhebliche Kosten für den OEM und einen hohen Aufwand für den Kunden, der sein Fahrzeug in eine Werkstatt bringen und auf den Abschluss der Update-Installation warten muss. Abbildung 17 zeigt in der Form eines Sequenzdiagramms die in der Regel dafür erforderlichen Schritte. OTA-Updates ermöglichen eine Vereinfachung des Updateprozesses, indem der Werkstattbesuch entfällt, und führen somit zu wesentlichen Kosteneinsparungen.

#### **OTA-Updates eröffnen außerdem neue Geschäftsmodelle für die OEMs, die Funktionen on demand erweitern oder neu integrieren können.**



Quelle: Guissouma et al., 2018

Abbildung 17: Typische Schritte für die Durchführung eines Software-Updates in der Werkstatt

### 1.3.2 Stand der Technik von OTA-Updates

OTA-Updates basieren auf einer drahtlosen Kommunikation über eine Funkschnittstelle zwischen einem Backend, das auf einem OEM-Server betrieben wird, und einem Frontend – der im Fahrzeug integrierten Client-Software. Die Kommunikation erfolgt typischerweise über WLAN oder Mobilfunk (z. B. LTE und in Zukunft über 5G) und kann über sogenannte Access Points oder als Mesh-Netzwerk realisiert werden. Abbildung 18 zeigt eine Übersicht über die externen Kommunikationsschnittstellen eines modernen Fahrzeugs und die Schnittstellen, die für die OTA-Kommunikation verwendet werden können.

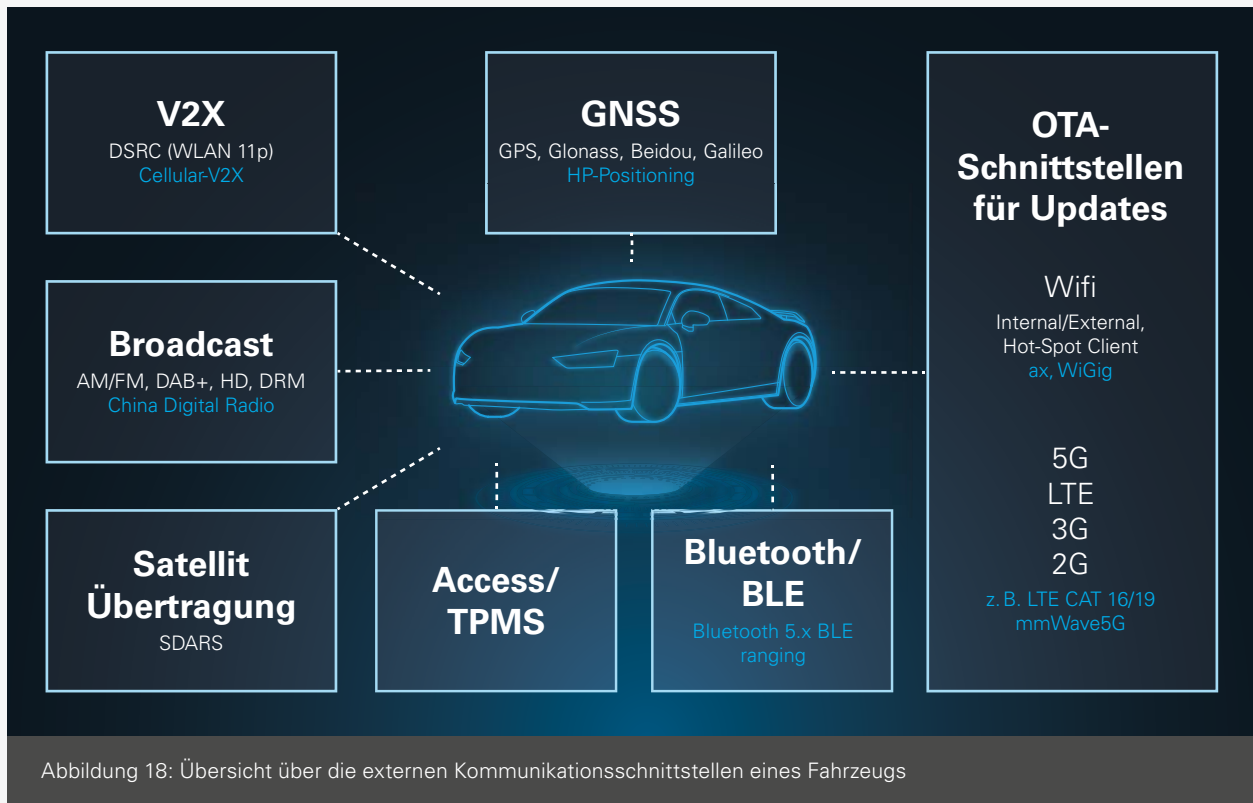
Ein Beispiel für die Umsetzung der OTA-Kommunikation ist die Anwendung vom WLAN-Standard IEEE 802.11s in einem Mesh-Netzwerk, wie in Steger et al., 2016, gezeigt. Bei diesem Ansatz kann jedes Fahrzeug mit jedem anderen Netzwerkteilnehmer in seiner direkten Umgebung kommunizieren und bildet somit einen dynamischen Pfad zum Updateserver. Die Mesh-Netzwerk-Methode eignet sich zwar für die Durchführung von parallelen Updates für eine Produktlinie während der Produktion oder für mehrere Fahrzeuge in einer größeren

Werkstatt, weist jedoch für eine globale Verteilung von OTA-Updates Grenzen auf. Für diesen Anwendungsfall eignet sich eher die Realisierung anhand von Access Points und einer Server-Client-Kommunikation über das Internet (wie z. B. in Guissouma et al., 2018; Kögel, Wolf, 2018 beschrieben). Für beide Arten der Umsetzung ist eine möglichst standardisierte Unterstützung von OTA-Updates des verwendeten Betriebssystems der Steuergeräte eine essenzielle Voraussetzung.

**OTA-Updates beeinflussen die Automobilsysteme nicht nur während ihrer Laufzeit, sondern verändern ihren gesamten Lebenszyklus – besonders den der Software.**

Deshalb fasst der Begriff Backend alle Aktivitäten zusammen, die für die Entwicklung, Verwaltung und Verteilung von Updates notwendig sind.

Für den Entwurf, die Implementierung und die Absicherung der Updates stehen verschiedene Entwicklungsserver zur Verfügung, die vom OEM in Kooperation mit verschiedenen Zulieferern, aber auch zukünftig mit App-Drittanbietern, verwaltet werden (Rassner, 2016).



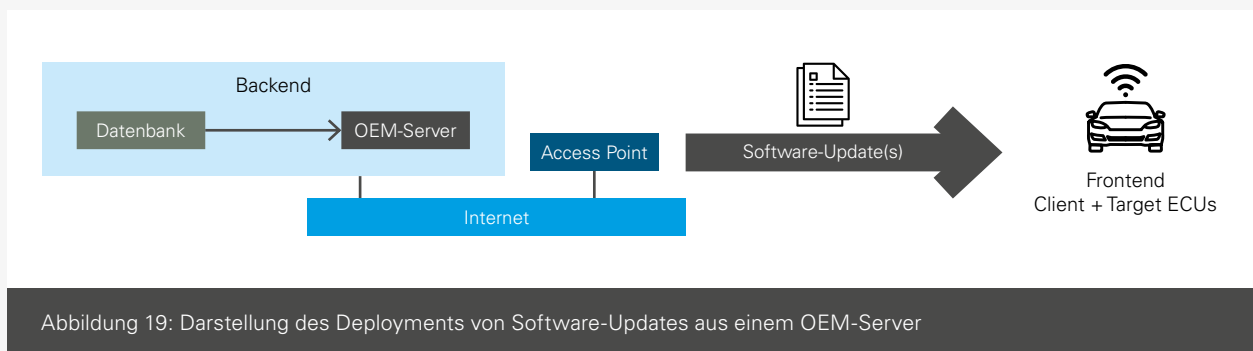
Quelle: Müschenborn, 2019

Abbildung 18: Übersicht über die externen Kommunikationsschnittstellen eines Fahrzeugs

**Es ist eine Umstellung der Wertschöpfungs- und Lieferkette notwendig, um die Potenziale von OTA-Updates auszuschöpfen und ihre Herausforderungen zu beherrschen.**

Zusätzlich zu den klassischen Entwicklungsaktivitäten, wie dem Requirements Engineering und der Software-Programmierung, spielt das Felddatenmanagement eine essenzielle Rolle bei der Verwaltung der Releases und Updatekampagnen entlang der Lebenszyklen der Fahrzeugflotten. Anhand dieser gesammelten und gesicherten Daten können Abhängigkeiten

innerhalb der existierenden Fahrzeugvarianten untersucht und bei der Updatevalidierung berücksichtigt werden. Nach abgeschlossener Entwicklung werden die Updates inklusive ihrer zugehörigen Metadaten, wie z. B. Version, Betriebssystemtyp oder kompatibler Steuergeräte auf dem Update-Server, auch OEM-Server genannt, in dedizierten Datenbanken gespeichert. Zu den anderen Aktivitäten dieses Servers gehören das Konfigurationsmanagement der Flotten, die Verwaltung von Admin/Client-Zugriffen, das Signieren und Verschlüsseln der Updates sowie die Gruppierung von Updates in installierbaren Packages (siehe Abbildung 19, Guissouma et al., 2018).



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19: Darstellung des Deployments von Software-Updates aus einem OEM-Server

Das Frontend besteht aus dem Update-Client, der mit dem Server kommuniziert und die zentrale Verwaltung der Updates innerhalb des Fahrzeugs übernimmt, sowie den aktualisierbaren Steuergeräten (ECUs). Der Update-Client ist typischerweise auf einem möglichst zentralen Steuergerät, also dem zentralen Gateway des Fahrzeugs installiert. Die OTA-Kommunikation mit den notwendigen Security-Checks übernimmt eine Telematik-Einheit, die in direkter Verbindung mit dem Update-Client steht. Die Updates werden innerhalb des Fahrzeugs durch die Bussysteme, z. B. Ethernet, CAN oder FlexRay, übertragen, und anschließend über den Bootloader automatisch in den Flash-Speicher (EEPROM) geschrieben.

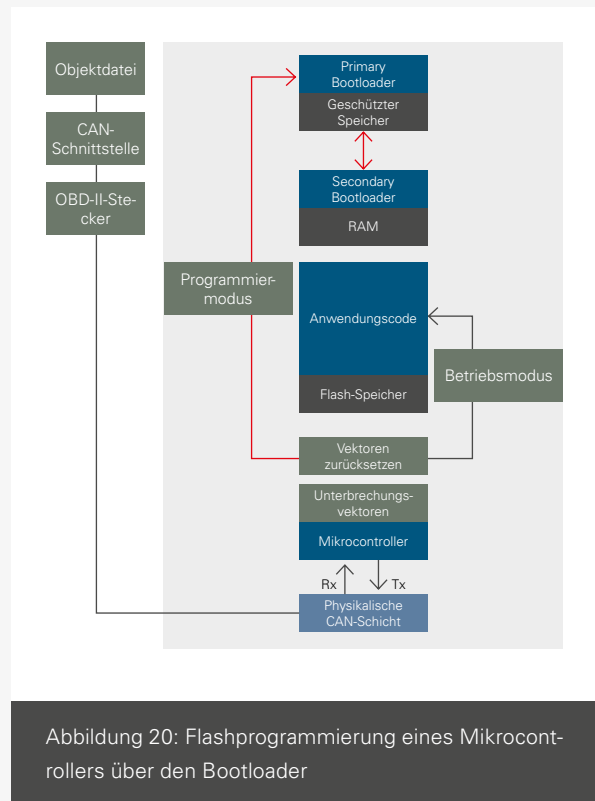
Bei der Installation der Updates können die alten Versionen der Softwarekomponenten entweder vollständig oder nur zum Teil in dem ECU-Speicher ersetzt werden. Somit wird zwischen drei Updatekategorien unterschieden (Kögel, Wolf, 2018).

- **Vollupdates:** neuer ECU-Programmcode und neues ECU-Datensegment
- **Partielle Updates:** neues ECU-Datensegment
- **Differentielle Updates:** neue Bytestrings in ECU-Datensegment basierend auf einer vordefinierten Delta-Programmierungsmethode

**Die Reprogrammierung des Steuergerätes erfolgt mit Hilfe des Bootloaders, der bei jedem Start der zugehörigen Steuerungsplattform ausgeführt wird, um das Betriebssystem sowie weitere Firm- und Softwaremodule zu laden.**

Die Kommunikation mit dem jeweiligen Steuergerät kann beispielsweise über die On-board-Diagnostics (OBD II)-Schnittstelle und einen CAN-Bus stattfinden (Zaman, 2015). Der sogenannte Primary Bootloader stellt die Verbindung mit der externen CAN-Schnittstelle her, wohingegen der Secondary Bootloader die Speicheroperationen Lesen, Schreiben, Löschen und Verifizieren verantwortet (Zaman, 2015). Nach Abschluss der Code-Aktualisierung versetzt ein externer Tester oder ein OTA-Modul das Steuergerät wieder in Operationsmodus und das Modul startet die Ausführung des neuen Codes (siehe Abbildung 20).

Nach dem Herunterladen der Updates auf einem zentralen Steuergerät oder Gateway, das über eine Telematik-Einheit mit dem Update-Server kommuniziert, gibt es verschiedene Möglichkeiten für die Speicherung, Verteilung und Installation der



Quelle: Zaman, 2015

Updatepakete. Die Updates können entweder aus einem zentralen oder aus einem lokalen Speicher innerhalb der E/E-Architektur an die jeweiligen ECUs übertragen werden. Bei der Installation können die alten Versionen entweder komplett ersetzt werden oder die neue Version wird in die zweite Hälfte des EEPROM-Speicherbereiches geschrieben und anschließend kann über einen „Swap“-Ansatz zwischen den Versionen gewechselt werden. Dieser Ansatz erlaubt auch eine einfache Rollbackfunktion, indem bei Fehlverhalten oder Versagen der neuen Softwareversion zur alten Version zurückgegangen wird. Abbildung 21 stellt die sich ergebenden Realisierungsmöglichkeiten abhängig von Speicherort und -konfiguration dar.

Eine der wichtigsten Herausforderungen für die Einführung und Verbreitung von OTA-Updates für alle Fahrzeugdomänen sind die strengen Anforderungen an die Datensicherheit.

Diese Datensicherheit wird mit dem englischen Begriff Security bezeichnet. Damit das Fahrzeugsystem als ausreichend „secure“ eingestuft werden kann, müssen Methoden und Mechanismen angewendet werden, die die folgenden Eigenschaften garantieren (Nilsson, Larson, 2008).

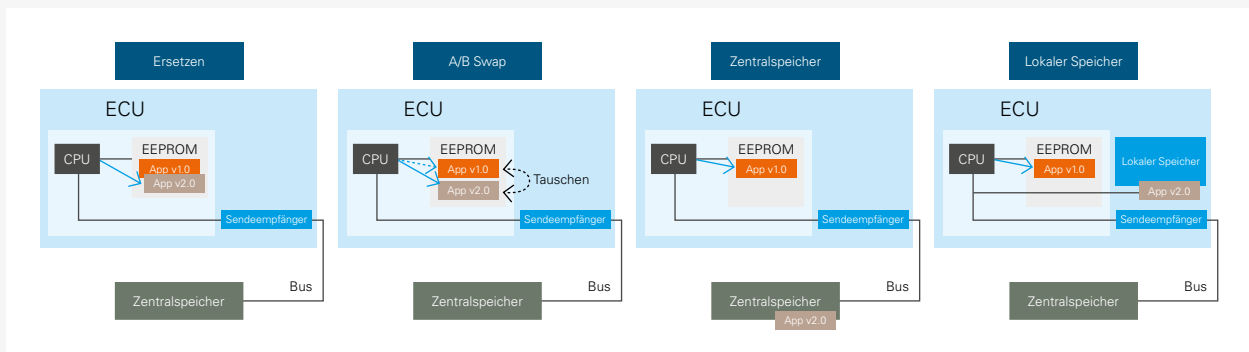


Abbildung 21: Realisierungsalternativen von OTA-Updates innerhalb einer E/E-Architektur

- **Datenintegrität:** überprüfen, dass die Datenpakete nicht modifiziert wurden.
- **Datenauthentizität:** Der Empfänger (Client) verifiziert, dass die Daten vom offiziellen Sender (z. B. OEM-Server) stammen. Diese Eigenschaft liefert gleichzeitig Datenintegrität und kann durch eine digitale Signatur wie beispielsweise den gängigen Algorithmus Elliptic-Curve Cryptography (ECC) 256, der digitale Schlüssel basierend auf elliptischen Kurven generiert, erreicht werden.
- **Datenkonfidentialität:** Verschlüsselung der Daten gegen das Risiko eines potenziellen Datendiebstahls via beispielsweise symmetrischem Schlüssel wie den Advanced Encryption Standard (AES) 128.
- **Datenaktualität:** verhindert das Abspielen alter Pakete Dritter.

Um diesen Security-Anforderungen gerecht zu werden, werden zusätzlich dedizierte Hardware-Module, wie das Hardware Security Module (HSM) von AURIX™, für eine effiziente Speicherung und Verwaltung der Schlüssel benötigt. Zu den weiteren Maßnahmen zählen die Anwendung einer eingebetteten Automotive-Firewall, Intrusion Detection Systems (IDS) zur frühzeitigen Einbruchserkennung und Intrusion Prevention Systems (IPS), die entdeckte Angriffe abwehren können. Die Firma ESCRYPT GmbH (ESCRYPT GmbH, 2020) bietet End-to-End-Security-Lösungen für OTA-Updates sowohl server- als auch clientseitig. Die hierfür verwendeten Methoden wie Übertragungsverschlüsselung, Verschlüsselung und Schlüsselmanagement sowie die Authentifizierung anhand von Signaturen sind in Abbildung 22 dargestellt.

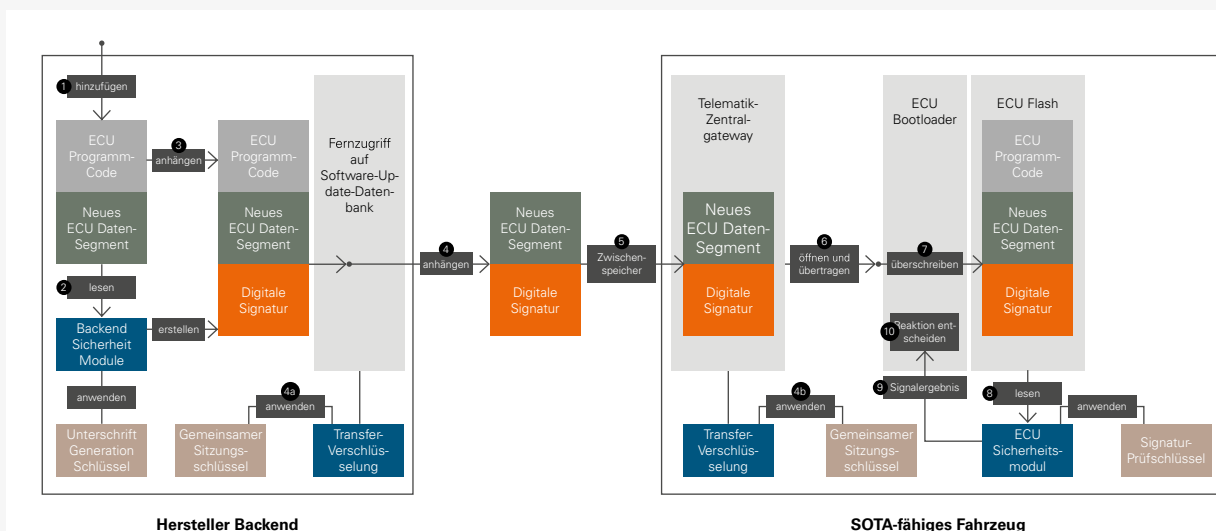


Abbildung 22: Funktionale Übersicht eines OTA-Updates mit begleitenden Security-Maßnahmen

### 1.3.3 Gremien und Standards

Wegen der schnellen Entwicklung von OTA-Updates, insbesondere für Safety-kritische Systeme, existieren heutzutage mehrere Gremien- und Standardisierungsarbeiten mit dem Ziel, die gesetzlichen und technischen Anforderungen zu vereinheitlichen. Im Folgenden werden vier dieser Lösungsansätze erläutert.

■ UNECE WP. 29, Draft Recommendation on Software Updates

Um die Regulierungen für Cybersicherheit und OTA-Updates in Zukunft möglichst einheitlich zu halten, wird innerhalb der Arbeitsgruppe für intelligente Transportsysteme und automatisiertes Fahren (IWG ITS/AD) der Vereinten Nationen aktuell ein Regelwerk entwickelt, das die Genehmigung von OTA-Updates regulieren soll. Hierzu wurde eine Task Force aus verschiedenen Prüfinstituten und Nichtregierungsorganisationen wie FIA, CITA und ITU gegründet (GRVA, 2018). Das entwickelte Regelwerk gilt als Kandidat für die zukünftige Zertifizierung von OTA-Updates für eine Mehrzahl von Mitgliedsländern in Europa, Nordamerika und Asien (Fox, 2020). Außer den Anforderungen an die Entwicklung und Verteilung der Updates

beschreibt es Anforderungen an die Art und Weise, wie Softwareänderungen verwaltet werden müssen, damit sie funktional und datensicher durchgeführt werden können.

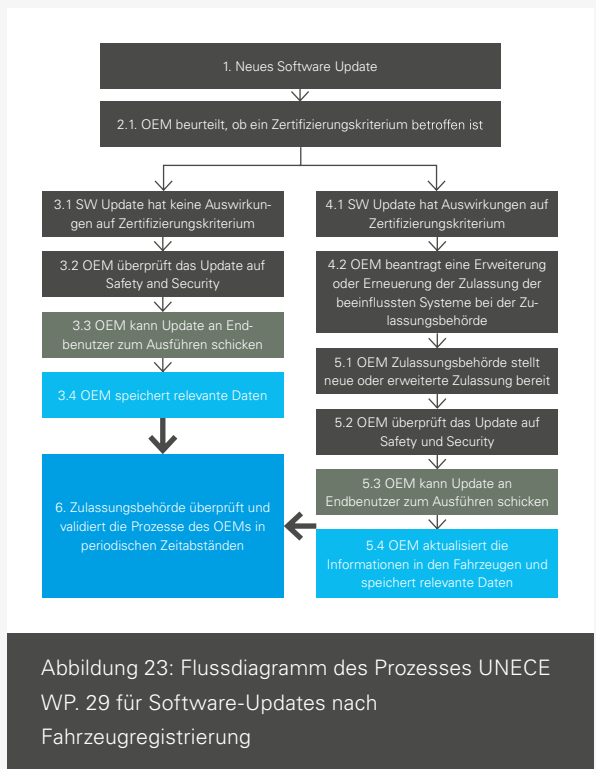
**Die Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA) führt in dem Dokument ein Prozessmodell ein, das die Entwicklung und die Zertifizierungskriterien von OTA-Updates regulieren soll.**

Nachdem ein OEM die Zulassung für die Durchführung von Software-Updates basierend auf der Qualität seiner Prozesse für Konfigurations- und Qualitätskontrolle sowie für die Absicherung bezüglich Safety und Security (siehe Abbildung 23, Schritt 1) erhält, werden die Auswirkungen des Updates auf die Zulassungskriterien der integrierten Subsysteme beurteilt (vgl. Schritt 2). Falls es eine Auswirkung gibt, muss der OEM eine neue oder erweiterte Typzulassung des Systems bei der Zertifizierungsbehörde beantragen (vgl. Schritt 4). Ist die Zulassung erteilt, wird das Update anschließend gegenüber Safety- und Security-Anforderungen validiert, und an den Endbenutzer OTA übertragen (vgl. Schritt 5). Der OEM ist verpflichtet, die relevanten Updateinformationen der Fahrzeuge zu speichern. Für die eindeutige Identifizierung der zugelassenen Updates sollte laut UNECE WP.29 eine sogenannte RX Software Identification Number (RXSWIN) verwendet werden, die die relevanten Zulassungsinformationen der ECU-Software repräsentiert (GRVA, 2018).

Zusätzlich zu UNECE WP.29 wird in Abstimmung mit der UNECE der neue Standard ISO/SAE 21434 „Road vehicles – Cybersecurity engineering“ entwickelt, der technische Anforderungen mit spezieller Betrachtung der Datensicherheit spezifiziert, um die erwartete neue Regulierung für Typzulassungen einzuhalten.

■ Update-Service in der AUTOSAR Adaptive Middleware

Die AUTOSAR Adaptive Platform beschreibt ein Update- und Konfigurationsmanagement(UCM)-Funktionscluster. Die Hauptaufgabe dieses Clusters ist das Aktualisieren, Installieren und Entfernen von Software unter spezieller Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten (AUTOSAR Adaptive, 2018). Es unterstützt eine serviceorientierte Architektur durch Offenlegung der Funktionalität über die generischen ara::com-Dienstschnittstellen von AUTOSAR. Vor der Verarbeitung der Updates durch die UCM-Einheit werden die Softwarepakete, zum Beispiel aus der OTA-Client-Applikation auf dem zentralen Gateway, an das UCM über die bereitgestellte ara::com-Schnittstelle über-



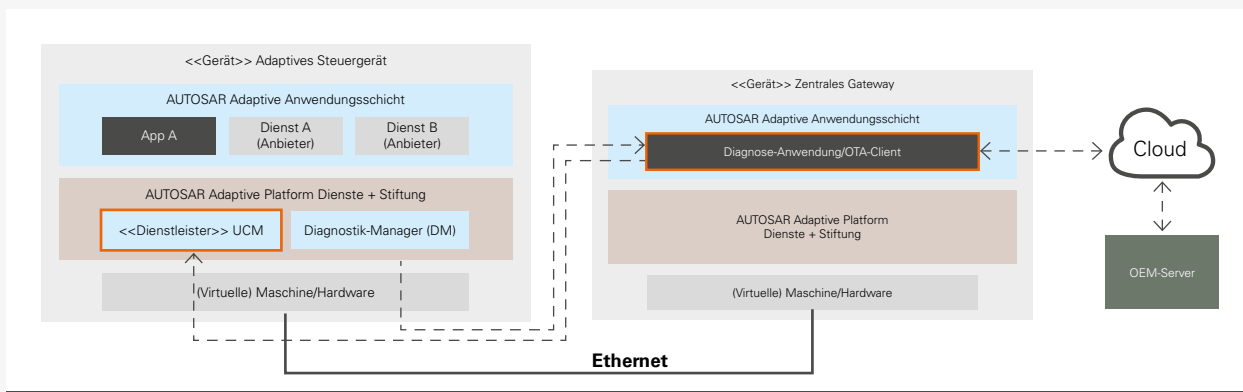


Abbildung 24: AUTOSAR-Architektur mit integriertem OTA-Updates-Service (UCM)

tragen. Das UCM verwendet die Krypto-Schnittstelle von der Adaptive Platform zur Überprüfung der Integrität und Authentizität der Pakete und zur Entschlüsselung der Daten (AUTOSAR Adaptive, 2018). Die technische Architektur für die Realisierung eines Updates auf einer AUTOSAR-Plattform ist in Abbildung 24 dargestellt.

■ UPTANE (Focus Security) – OTA-Prozess

UPTANE ist ein Open Source Framework für die Datensicherheit und die Konfigurierbarkeit von automotiven Software-Updates. Es unterscheidet zwischen zwei Typen von ECUs: primäre ECUs, die direkt OTA mit dem Server kommunizieren und vollständige Security-Checks durchführen, und sekundäre ECUs, die die Metadaten der primären ECUs als zweite Verifikationsstufe überprüfen (Kuppusamy et al., 2018). In UPTANE gibt es außerdem serverseitig ein Image und ein Director Repository. Das Image Repository beinhaltet alle Versionen der ECU-Softwarekomponenten des OEMs und die dazugehörigen notwendigen Metadaten für ihre Authentifizierung (Kuppusamy et al., 2018). Das Director Repository hingegen ist verantwortlich für die Ermittlung der Software-Images, die für eine bestimmte ECU-Kombination innerhalb einer Fahrzeugkonfiguration als Nächstes installiert werden sollen (Kuppusamy et al., 2018). Basierend auf diesem Framework führt UPTANE außerdem einen Prozess mit drei Hauptphasen für die Durchführung von OTA-Updates mit Fokus auf der Security-Sicht ein.

■ eSync Alliance

eSync Alliance ist ein Konsortium aus Industrieunternehmen im Automotive-Bereich für die Entwicklung und Etablierung einer einheitlichen und standardisierten Daten-Pipeline für OTA-Updates (Excellfore, 2020). Excellfore hat im Rahmen die-

ses Konsortiums ein neues Software Development Kit (SDK) auf den Markt gebracht, das eine schnelle Realisierung von OTA- und Datenaggregationsprogrammen ermöglicht (Excellfore, 2020). Der hierfür entwickelte prototypische Demonstrator besteht aus einem Gateway, der die eSync Client-Software hostet, und einem externen Edge-Gerät, das die Rolle einer zu aktualisierenden ECU einnimmt (Excellfore, 2020). Auf jedem updatebaren Gerät wird ein eSync-Agent ausgeführt, der Zugriff auf den Bootloader hat und in der Lage ist, die Software zu ersetzen. Zusätzlich zu diesem Basis-SDK bietet Excellfore zwei weitere Erweiterungskits für CAN-Bus-Erweiterung für AUTOSAR-Steuergeräte und einen Fahrzeugstatus-Emulator (Excellfore, 2020). Der Aufbau und die Komponenten des eSync Client sind in Abbildung 25 dargestellt.

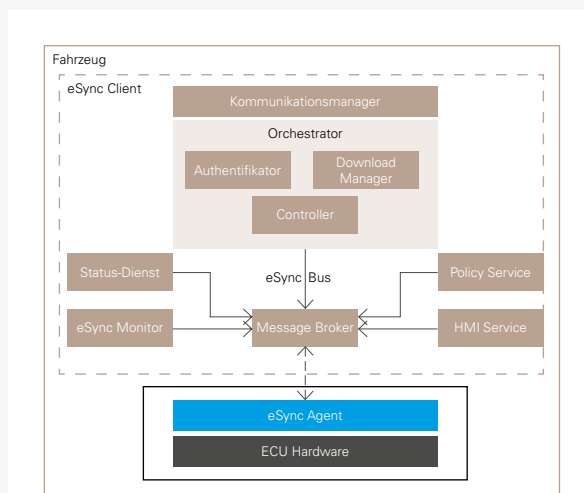


Abbildung 25: Struktur eines eSync Client für OTA-Updates

Quelle: AUTOSAR Adaptive, 2018

Quelle: eSync Alliance (<https://esyncalliance.org/>)



## 2.

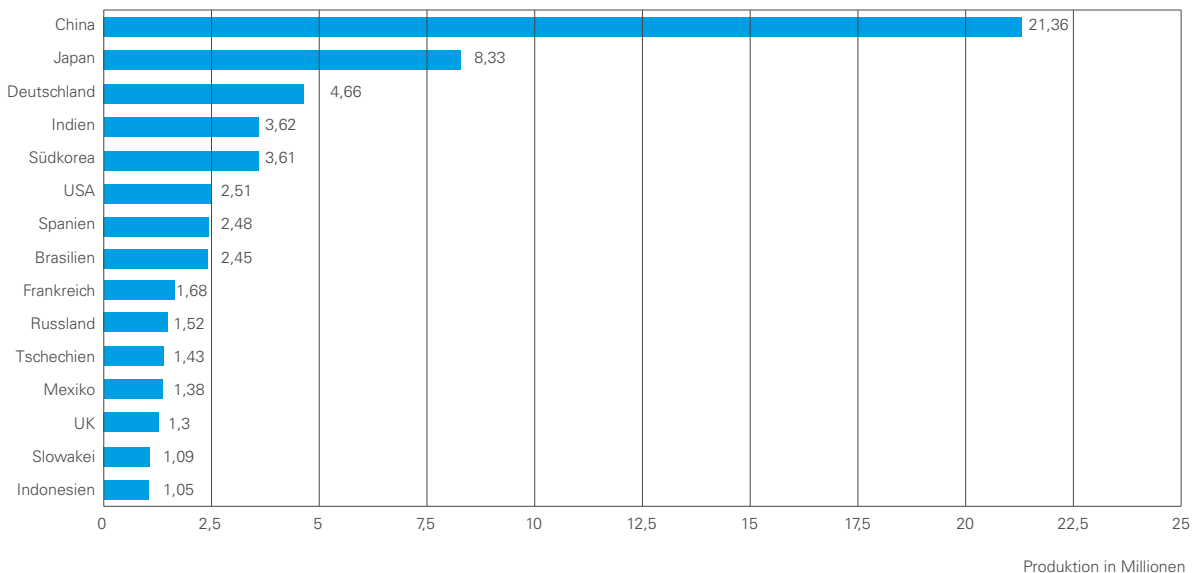
# Analyse und Vergleich der dominierenden Märkte

### 2.1 Marktentwicklung und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich

Der globale Markt für Fahrzeuge teilt sich hauptsächlich in die Regionen Asien, Europa und den NAFTA-Raum (USA, Kanada, Mexiko) auf. China (~26 % der Produktion im Jahr 2019), die USA (~13 %), Japan (~10 %) und Deutschland (~6 %) stellen die größten Produzenten dar. Diese vier Nationen sind gleich-

zeitig die weltweit größten Absatzmärkte für Automobile (siehe Abbildungen 26 – 28). Die umsatzstärksten OEMs weltweit sind Toyota (Japan), Volkswagen (Deutschland), Ford (USA) und Honda (Japan).

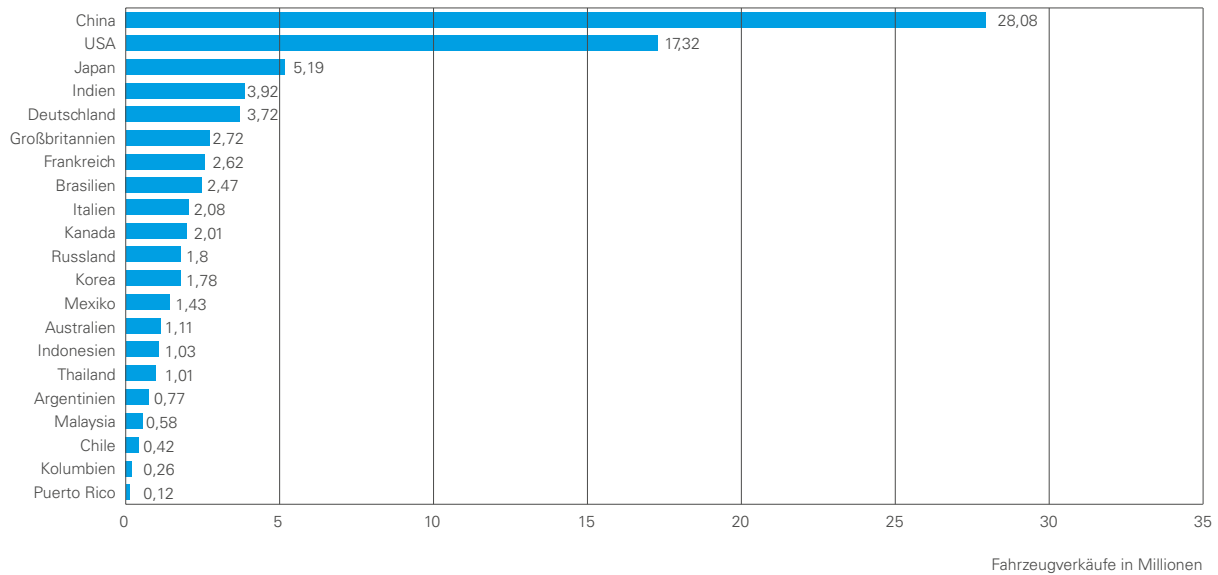
Geschätzte Pkw-Produktion in ausgewählten Ländern im Jahr 2019



Quelle: Statista, 2020a

Abbildung 26: Anteile von Staaten/Regionen an weltweiter Pkw-Produktion 2019

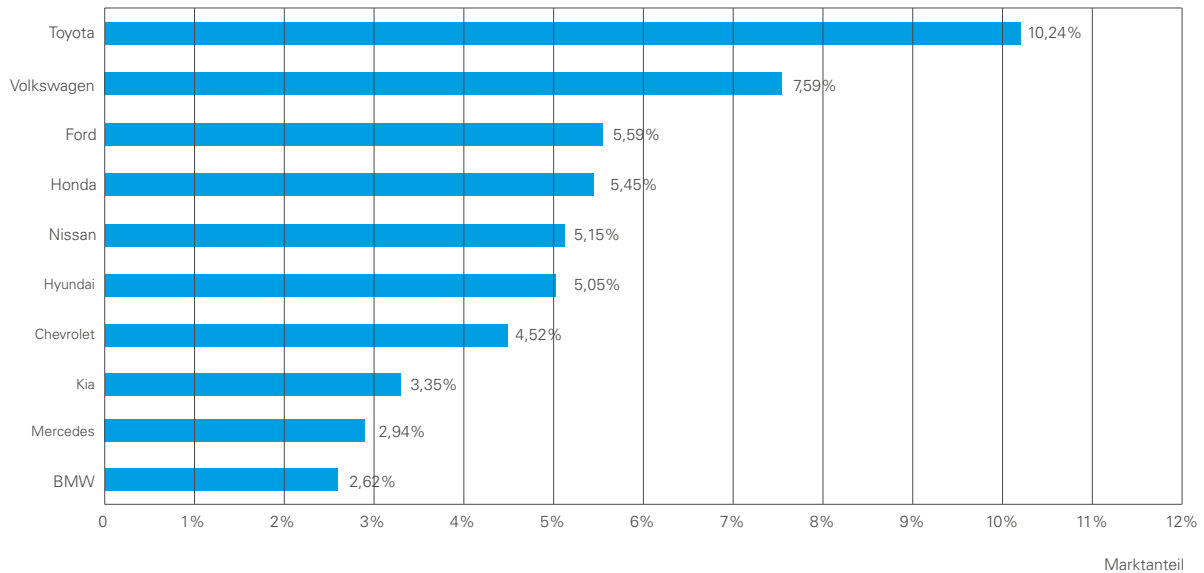
Anzahl verkaufter Automobile nach ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2018



Quelle: Statista, 2019

Abbildung 27: Anzahl verkaufter Automobile nach ausgewählten Ländern weltweit (2018)

Weltweiter Automobilmarktanteil im Jahr 2019, nach Marken



Quelle: Statista, 2020b

Abbildung 28: Globale Marktanteile verschiedener Marken im Vergleich (2019)

Die Märkte haben sich in der Historie unterschiedlich schnell entwickelt. Neben dem Wachstum herrscht auch bezüglich der vertretenen Produzenten, der verbreiteten Marken und der technologischen Entwicklungen ein heterogenes Bild. Unterschiedliche gesetzliche Vorgaben, politische Gegebenheiten sowie staatliche Förderprogramme sind dabei entscheidende Randbedingungen. Der Vergleich der Märkte im Hinblick auf die Entwicklungsfortschritte im Bereich der Fahrzeugelektronik ist daher vielschichtig. Im Folgenden werden die technologischen und ökonomischen Marktentwicklungen sowie soziale, politische und rechtliche Gegebenheiten im Bezug darauf untersucht.

### 2.1.1 Wichtigste Marktteilnehmer und Technologien

Die OEMs und deren Tier-1-Lieferanten werden als bedeutendste Akteure im Fahrzeugmarkt wahrgenommen. Sie sind insbesondere die Wissensträger der Branche und zumindest im Premiumsegment einer starken Markenrelevanz unterlegen. Historisch war der Anteil immaterieller Wertschöpfung im Automotive-Segment vergleichsweise gering. Bei Betrachtung des Gesamtmarkts fallen die zukünftigen Anstiege dieses Anteils im Bereich von Fahrzeugen überdurchschnittlich hoch aus (Jäger, Dawid, 2019). Diese Prognose deckt sich mit den in Kapitel 1 beschriebenen Entwicklungen im Bereich der Softwarefunktionalitäten. In Europa, den USA und China wird in den kommenden Jahren noch ein Wachstum bei der Anzahl verkaufter Fahrzeuge prognostiziert. Europa erreicht demnach aber bereits 2025 einen Höhepunkt und auch in den USA nimmt die Wachstumsrate künftig weiter ab. Lediglich in China werden weiterhin mehr Fahrzeuge verkauft. Insgesamt entfällt über die Hälfte der verkauften Fahrzeuge auf vernetzte Automobile, die Services wie Car Sharing und integrierte Mobilitätsplattformen ermöglichen. Dies unterstreichen auch Vorhersagen über zukünftige branchenweite Umsatz- und Gewinnverteilungen. Demnach entfällt weniger als die Hälfte auf den klassischen Fahrzeugverkauf, jedoch wird ein Großteil über Mobility-as-a-Service (MaaS)-Leistungen und Zulieferleistungen aus dem Hightech-Bereich erwirtschaftet (PwC, 2019). Die größten Herausforderungen und Umbrüche, die die Automobilindustrie dominieren, sind mit technologischen Bestrebungen im Bereich der Fahrzeugelektronik verbunden. Im Folgenden werden zunächst die in Anlehnung an Kapitel 1 vorherrschenden Technologien, verbauten Systeme und technischen Rahmenbedingungen betrachtet. Die finanzielle und

wettbewerbsentscheidende Bedeutung von Elektronik und Softwarekomponenten nimmt stark zu, siehe Abbildung 29. Das Marktwachstum bei Leistungselektronik und anderen Elektronikkomponenten, die in der E/E- Architektur verbaut sind, ist sehr hoch. Sie können häufig schnelle Skaleneffekte realisieren, vor allem durch den wachsenden E-Fahrzeug-Markt. Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge und eine Zunahme der Fahrassistenzsysteme verursachen das Marktwachstum von Software und Sensorik. Steuergeräte und Domänensteuergeräte machen 2030 noch den größten Kostenfaktor aus. Die großen langfristigen Einsparpotenziale, die durch Zentralisierung und Konsolidierung entstehen, verursachen im Vorfeld den entsprechenden Entwicklungsaufwand. Insgesamt ist in diesem Markt aber kein Wachstum zu erwarten, die Wachstumsrate von 5 % liegt lediglich in dem noch wachsenden Absatz an Fahrzeugen begründet (vor allem in China).

Regional lassen aktuelle Entwicklungen darauf schließen, dass China, Europa und der NAFTA-Raum auch 2030 die vorherrschenden Märkte bleiben (siehe Abbildung 29), dementsprechend werden diese Märkte nun eingehend betrachtet.<sup>1</sup> In China wird vor allem der Großteil der Elektronik produziert (Burkacky et al., 2019). Dies spiegelt sich auch in der aktuellen Marktsituation wider (Abbildung 30). Neben diesen Komponentenlieferanten und der Halbleiterindustrie etablieren sich jüngere Unternehmen und Serviceanbieter. Der chinesische Markt für vernetztes Fahren wird in drei Hauptkategorien unterteilt:

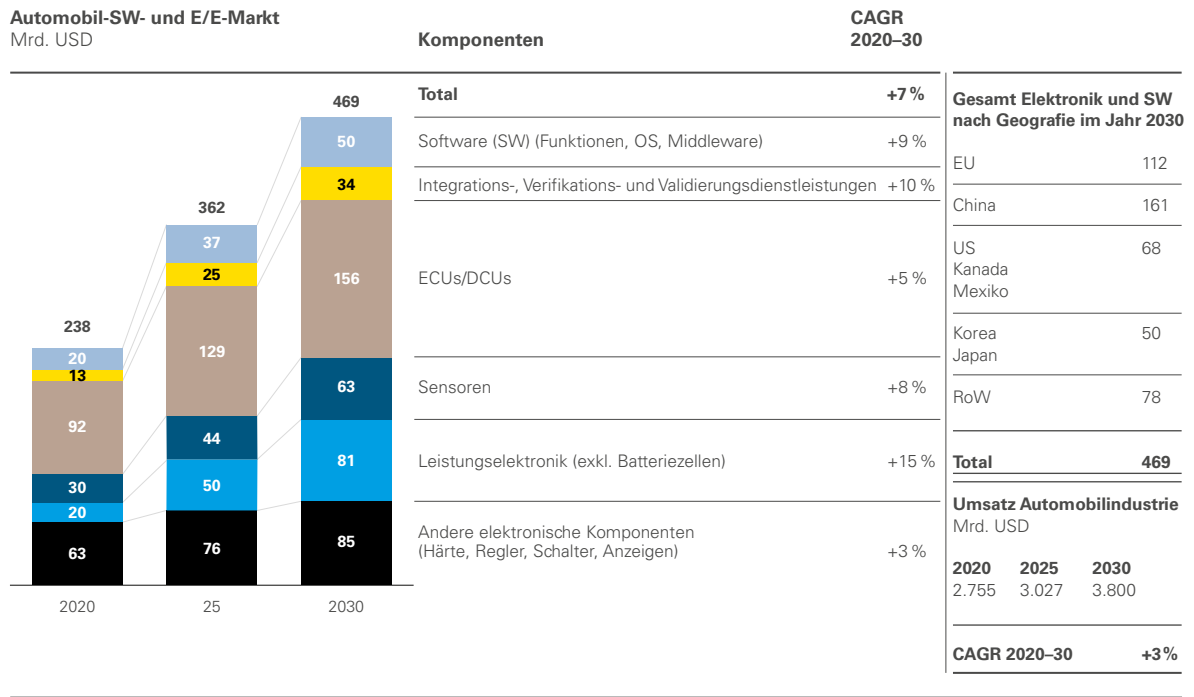
- Komponentenhersteller für bspw. LiDAR-Sensoren und Chips für KI-Funktionen
- chinesische OEMs und Fahrzeughersteller
- Plattformen für Mobilitätslösungen und Fahrzeugdienste

**Auffallend sind die Aktivitäten der Tech-Unternehmen wie Baidu, Tencent, JD.com, DiDi und Alibaba, die neben ihren Kerngeschäften auch in der Fahrzeugbranche aktiv sind.**

Dabei übernehmen sie meist die Entwicklung von Plattformen und Mobilitätsservices, gemeinsam mit OEMs aus China, aber auch in Partnerschaften mit ausländischen Automobilherstellern und Tier-1-Zulieferern. Zudem wurden viele Start-ups im Bereich der vernetzten Fahrzeuge gegründet (Schlobach, Retzer, 2018).

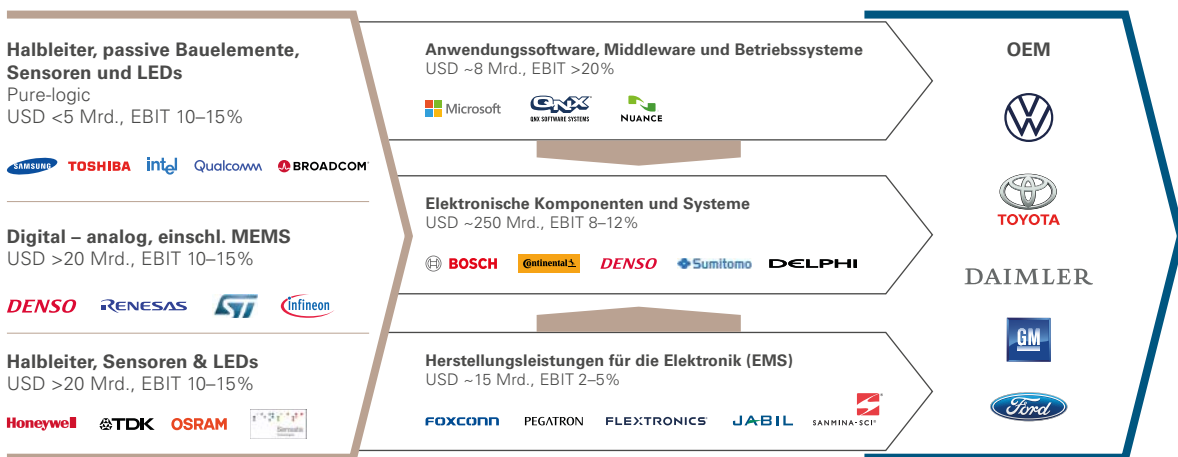
<sup>1</sup> | Japan und Korea beheimaten ebenfalls bedeutende Unternehmen in der Automobilindustrie, diese werden aber im weiteren Verlauf nicht näher untersucht.

**Automobiler Software- und E/E-Markt mit einer CAGR von 7 % p. a. bis 2030, hauptsächlich getrieben durch Leistungselektronik, SW und ECUs/DCUs**



Quelle: Burckey et al., 2019

Abbildung 29: Automotive-Software- und E/E-Markt bis 2030



Quelle: Alexander et al., 2017

Abbildung 30: Elektronik-Wertschöpfungskette Automobi

Das Start-up Pony.ai wurde unter anderem mit 400 Millionen USD von Toyota unterstützt und gilt als wertvollstes Jungunternehmen Chinas. In Partnerschaft arbeitet der japanische OEM mit Pony.ai an einer Plattform für autonomes Fahren und Mobilitätsdienste. Mit Hyundai wurde bereits ein Robotaxi-Dienst mit dem Namen „BotRide“ in den USA getestet. Auffallend ist, dass in China eine große Anzahl von sowohl OEMs als auch Komponentenherstellern in den letzten zehn Jahren gegründet wurden.

**Alibaba konnte 2016 mit dem Automobilhersteller SAIC ein vernetztes Fahrzeug auf den Markt bringen, Baidu ließ einen umgebauten BMW in Peking fahrerlos verkehren.**

Das Fahrzeug von Alibaba und SAIC, der RX5, wurde mit dem unabhängigen Betriebssystem YunOS ausgeliefert, das inzwischen AliOS heißt. Durch die Vernetzung mit Alibabas eigenen Daten und Diensten wurden bereits 2017 intelligente Parkplatzsuche und Zahlungsdienste angeboten. Baidu brachte 2017 die Open-Source-Plattform Apollo 1.0 auf den Markt (Floemer, 2017). Gemeinsam mit über 50 Partnerunternehmen, darunter auch deutsche OEMs wie Daimler und VW sowie Zulieferer (Bosch, Continental, ZF u. a.), sollte eine Plattform und Referenz-Hardware für autonomes Fahren entwickelt werden. Ziel

ist, die Herausforderung des autonomen Fahrens als Gemeinschaftsaufgabe der gesamten Automobilindustrie anzunehmen. Inzwischen ist Apollo 5.0 verfügbar und im Juli 2019 konnten die ersten Robotaxis (Level 4) in China mit Apollo produziert werden.

Insgesamt sind in China zumindest in der Vergangenheit weniger evolutionär stattfindende Innovationen zu beobachten, häufig werden disruptive Technologiesprünge durch zuvor weniger präsenste Marktteilnehmer erzielt. Trotz staatlich angestrebter Forschungsinitiativen wird vergleichsweise wenig Grundlagenforschung in China publiziert.

Der chinesische OEM XPengMotors brachte 2020 das elektrische Modell P7 auf den Markt. Das Level-3-Fahrzeug beherrscht autonome Fahrfunktionen auf Autobahnen und im Stadtverkehr sowie autonome Parkservicefunktionen. Die Basis des Fahrzeugs bildet die Plattform NVIDIA Drive AGX Xavier. Auch die Basis für das Betriebssystem XPilot3.0 des P7 stammt von NVIDIA (Tao, 2020). Chinas Unternehmen (Abbildung 31–32) beherrschen damit nicht die gesamte Wertschöpfungskette – eine Folge der Fragmentierung der weltweiten Fahrzeugindustrie. Die Herstellung von Chips, die wesentlich für die Rechenleistung zukünftiger Fahrzeuge sind,

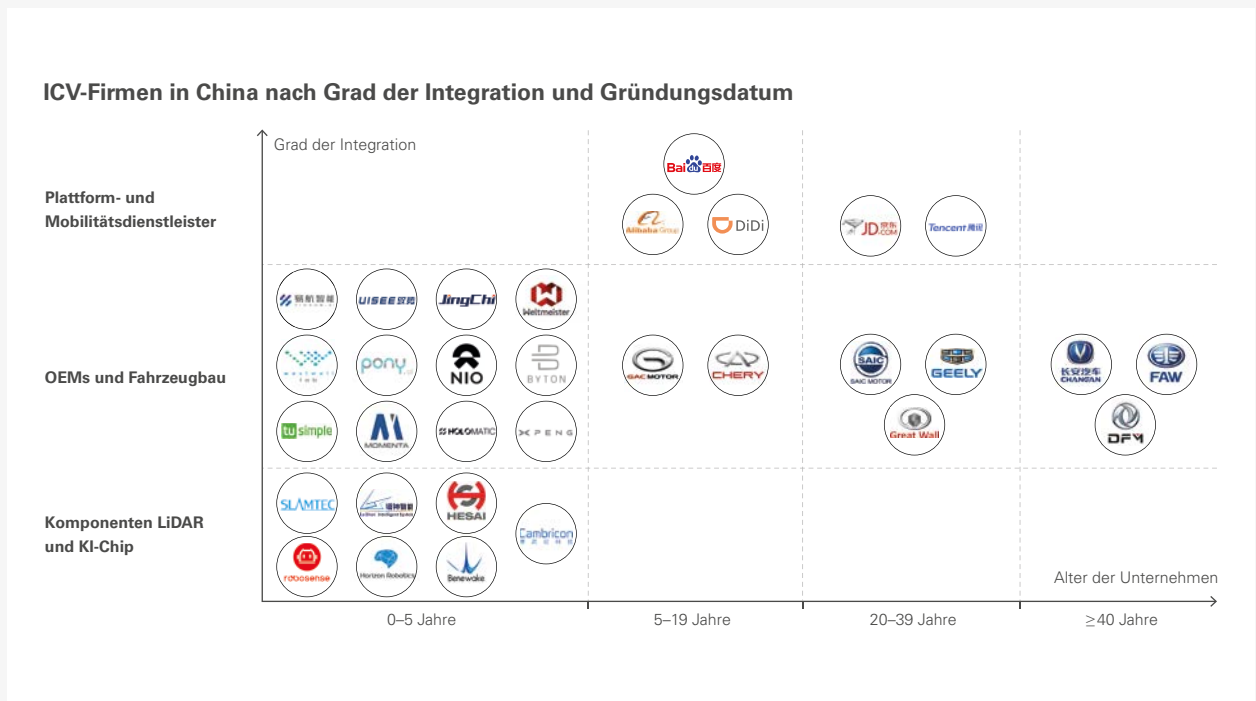


Abbildung 31: Firmen der vernetzten Mobilität in China nach Integrationslevel und Gründungsdatum

Quelle: Schlobach, Retzer, 2018

wird vor allem von US-amerikanischen Firmen dominiert. Dies stellt die technologischen Innovationen in Bezug auf KI in China vor Herausforderungen, da politische Spannungen mit den USA wiederum die Industrie beeinträchtigen (Mayer, 2018). Auch leistungsfähige Sensoren und Steuergeräte werden eher im Rahmen von Kooperationen und Partnerschaften realisiert.

**Der US-amerikanische Automobilsektor besteht aus einem breiten Spektrum an Marktteilnehmern.**

General Motors, Ford und Fiat-Chrysler dominieren als heimische OEMs den nationalen Absatzmarkt, insbesondere die hohe Quote an Kleinlastwagen ist kennzeichnend für die USA. Das am meisten verkaufte Modell stammt wiederum vom japanischen Hersteller Toyota, der den zweithöchsten Marktanteil innehält (Janson, 2019). Neben weiteren asiatischen Marken kommen deutsche OEMs für knapp 10 % der Fahrzeuge auf. Die traditionellen amerikanischen OEMs sind hinsichtlich der Bestrebungen, innovative Fahrzeuge auf den Markt zu bringen, ähnlich wie deutsche OEMs von Partnerschaften abhängig. GM und Ford investieren hohe Summen in automatisierte Fahrfunktionen und konnten bereits Testfahrzeuge realisieren.

**Starke Wettbewerber sind in den USA vor allem jüngere Unternehmen wie Tesla, die Alphabet-Tochter Waymo (Gründung 2016) und zahlreiche Mobilitätsplattformen wie Lyft und Uber.**

Waymo gilt in diesem Bereich als besonders aktiv und konnte bis 2018 bereits acht Millionen Testkilometer autonom zurücklegen, davon durchschnittlich ca. 20.000 km ohne menschlichen Eingriff. Dennoch ist eine Marktreife nicht abzusehen. Waymo hat eine enge Partnerschaft mit Fiat-Chrysler, Jaguar und Honda etabliert. Mit Honda sind vor allem Gütertransportlösungen geplant, während Jaguar Partner für einen autonomen Fahrdienst ist. Waymo entwickelt darüber hinaus Services mit Walmart, AutoNation, Lyft und Avis. Technologisch sollen die Fahrzeuge mit Intel-Chips und NVIDIA Prozessoren ausgestattet sein (Mayer, 2018). Die Partnerschaften sind damit stark auf amerikanische Unternehmen fokussiert.

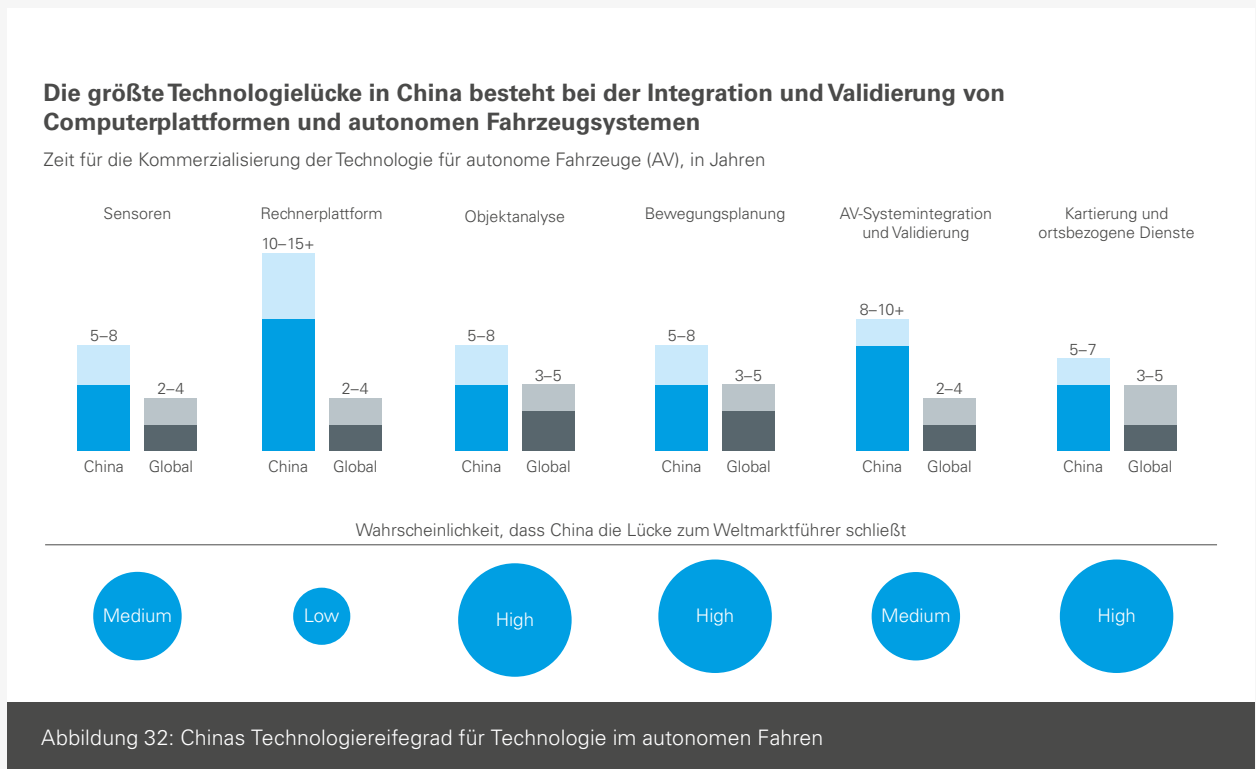


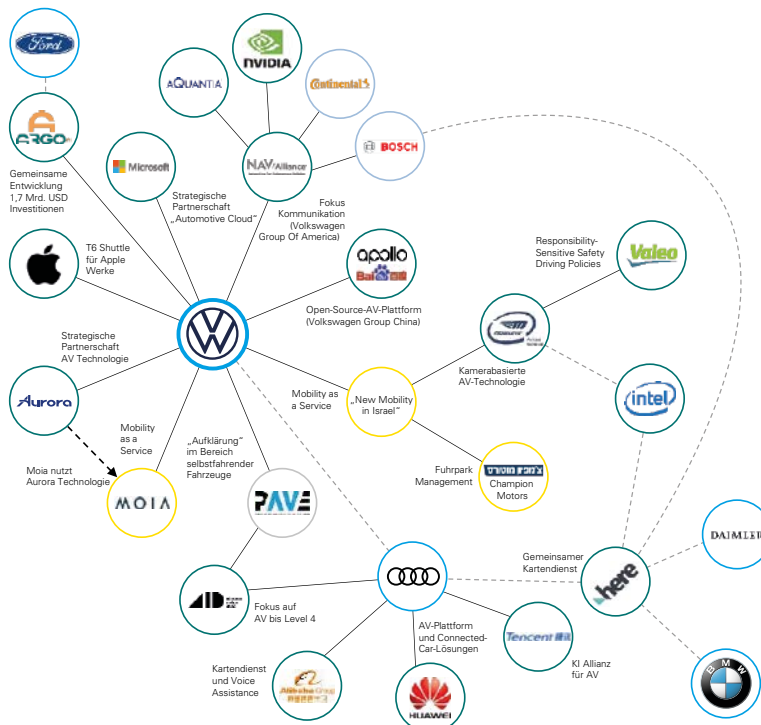
Abbildung 32: Chinas Technologiereifegrad für Technologie im autonomen Fahren

Quelle: Pizzuto et al., 2019

### Autonomes Fahren: Initiativen/Partnerschaften

Volkswagen AG

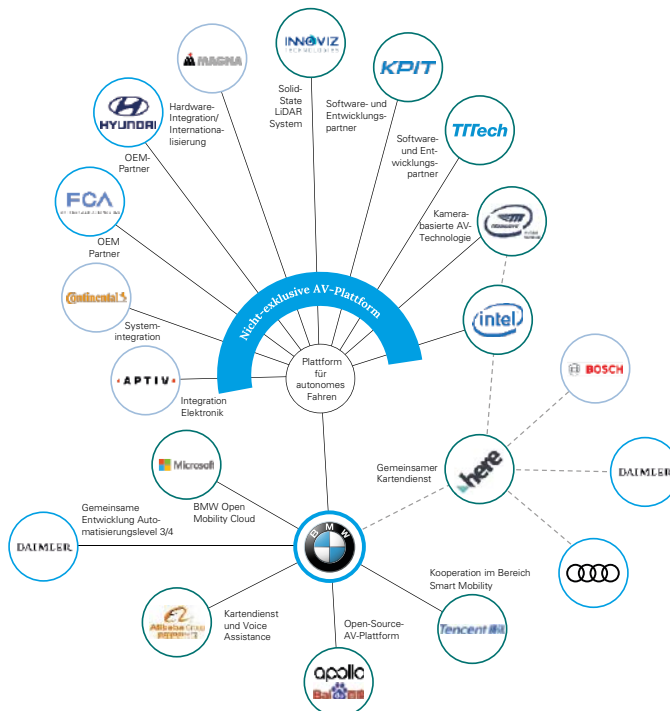
- OEM
- Automobil-Zulieferer
- Technologieanbieter
- Dienstleister



### Autonomes Fahren: Initiativen/Partnerschaften

BMW AG

- OEM
- Automobil-Zulieferer
- Technologieanbieter
- Dienstleister



Quelle: Windisch, 2019

Abbildung 33: Partnerschaften für vernetztes Fahren im Überblick (Stand: Februar 2019)



## Autonomes Fahren: Initiativen/Partnerschaften

Daimler AG



Neben Waymo sind General Motors, Apple und Tesla die Unternehmen mit der größten autonomen Testflotte. Tesla gilt als führende Marke im E-Mobilitätsmarkt und hat mit dem elektrischen Model 3 eines der weltweit am häufigsten verkauften Elektrofahrzeuge auf den Markt gebracht. Tesla wurde 2003 gegründet und gilt heute als weltweit wertvollster Fahrzeughersteller (Routley, 2020). Im Unterschied zu den Wettbewerbern entwickelt das Unternehmen nahezu alle Komponenten selbst. Insbesondere beendete die Firma die Partnerschaft mit dem Chip-Hersteller NVIDIA, um selbst in die Entwicklung und Produktion von Hochleistungschips zu investieren. Technologisch auffallend ist zudem, dass Tesla auf LiDAR-Sensoren verzichtet und stattdessen Radarsensoren verbaut. Weitere technologische Besonderheiten sind in Kapitel 1 bereits aufgeführt. Tesla ermöglicht als erster OEM OTA-Updates für alle Fahrzeugdomänen, inklusive des Autopiloten. Verfügbare Updates werden dem Fahrzeugnutzer dabei über das interne Display oder am Smartphone angezeigt – mit der Option, den Installationszeitpunkt zu bestimmen. Die Fahrzeuge können während des Updates nicht bewegt werden. Die Inhalte des jeweiligen OTA-Updates werden in Release Notes dokumentiert. Von 2019 bis 2020 wurden 18.525 Updates ausgerollt. Neben der Chip-Herstellung und OTA-Updates sind amerikanische Unternehmen und Start-ups auch in

vielen weiteren Mobilitätssektoren vertreten. Das Silicon Valley beheimatet neben Tesla und Waymo als Hersteller von elektrischen bzw. autonomen Fahrzeugen auch Mobilitätsplattformanbieter und Anbieter weiterer Komponenten und Softwarelösungen (Windisch, 2019).

### Deutschland ist geprägt von der klassischen „Old Economy“.

In Deutschland bestimmen vor allem weltweit nachgefragte Premium-OEMs (Volkswagen, Daimler, BMW) und deren etablierte Zulieferer (Bosch, Continental, ZF etc.) die Automobilindustrie. In der Vergangenheit genoss die deutsche Automobilindustrie mit vielen Patenten und Innovationskraft hohe Anerkennung und neben Europa auch in den USA und Asien (insbesondere China) eine starke Nachfrage. In den letzten Jahren zählten Volkswagen, BMW und Daimler mit ihren Marken zu den 15 OEMs mit der höchsten Anzahl an verkauften Modellen und damit ebenfalls zu den umsatzstärksten Automobilherstellern weltweit.

### Insbesondere im Premiumsegment dominieren deutsche Hersteller.

Die Kompetenzen der deutschen OEMs liegen historisch bedingt in der Antriebsdomäne, jedoch verschiebt sich diese Dominanz durch alternative Antriebe zunehmend. Trotz technischer Innovationen der Tier-1-Lieferanten sind diese im internationalen Vergleich in den Bereichen Software und Elektronikkomponenten nicht führend. Deutschland beheimatet bisher nur wenige Technologieunternehmen oder Start-ups in den entscheidenden Mobilitätsbereichen. Die deutsche Automobilindustrie verfolgt bei neuen Technologien häufig einen evolutionären Ansatz, bei dem Fortschritte sukzessive erzielt werden. Die Stärke Deutschlands lag in der Vergangenheit vor allem in technologischer Grundlagenforschung.

Deutschland bildet ein historisch gewachsenes Unternehmensökosystem mit Tätigkeitsfeldern der klassischen Automobilindustrie ab. Zulieferer neuer Technologien sind häufig außereuropäische Unternehmen (Windisch, 2019).

**Die Netzwerke der OEMs und Tier-1-Lieferanten erstrecken sich von Forschungsinstitutionen bis hin zu IT-Dienstleistern aus den USA oder Asien.**

Die Kooperationslandschaft von Daimler, BMW und VW ist in Abbildung 33 dargestellt. BMW ermöglicht dem Fahrzeughalter mit Automobilen des Betriebssystemes BMW 7 seit Juli 2020 die Installation neuer Services über OTA-Updates, deren Inhalte einsehbar sind. Diese Funktionserweiterungen sind mit In-App-Käufen in einer Smartphone Applikation vergleichbar und erschließen neue Umsatzpotenziale. Realisiert wird die Kommunikation zum Server über eine verbaute SIM-Karte. BMW arbeitet in einer industrieweiten Partnerschaft mit internationalen Unternehmen wie Aptiv, Continental, Magna und Fiat Chrysler sowie Hyundai zur Entwicklung autonomer Fahrfunktionen. Die Allianz verfügt über Kompetenzen in den Bereichen Software-, Sensor- und Elektronikentwicklung sowie Fahrzeugbau, Chiptechnologien und System- und Hardwareintegration.

Daimler verbaut in der Hardware des Mercedes Me Connect eine SIM-Karte, die über eine Smartphone-App Updates ermöglicht, zu denen jedoch keine Prozessinformationen geliefert werden. In Kooperation mit NVIDIA sollen ab 2024 mehrere verteilte ECUs als ein integriertes System realisiert werden, das Updates von Fahrassistenzsystemen und KI-Funktionen auf Abruf anbietet.

Die Kooperation von BMW und Daimler für Mobilitätsplattformen, die insgesamt fünf Joint Ventures umfasst (Reach

Now, Share Now, Free Now, Charge Now und Park Now), wurde 2019 geschlossen. Ursprünglich planten die Konkurrenten für zukünftige Technologien weitere gemeinsame Projekte. Die geplante Zusammenarbeit im Bereich hochautomatisiertes Fahren wurde jedoch wieder beendet. Die Unternehmen streben damit weiter einzelne Lösungen an (Daimler AG (2020).

Insgesamt zeigt die Kooperationslandschaft in der Automobilindustrie, dass die Herausforderungen Zusammenarbeit erfordern, diese jedoch nicht zwingend gelingt. Tesla demonstriert, wie innovative Fahrzeuge in nahezu kompletter Eigenleistung realisierbar sind, andere Akteure positionieren sich klar in der Wertschöpfungskette und fokussieren sich auf eine Kernkompetenz. Schlüsselakteure wie NVIDIA, Intel Mobileye und Microsoft beschreiben, wie die Anwendung jahrelanger Erfahrung in unbekanntem Branchen gelingen kann und zur Erschließung eines gesamten Marktes führt. Dabei realisieren sie als Partner diverser OEMs ein breites Branchenwissen, das wiederum zu Entwicklungsvorsprung führen kann.

Die traditionelle Automobilunternehmenslandschaft in Deutschland ist auf internationale Kooperation angewiesen, um zukünftige Formen der Mobilität technisch zu realisieren. Kooperationen, die OEM-übergreifend stattfinden, zeigen Schwierigkeiten auf. Nach Analyse der oftmals ähnlichen Zuliefererkette und organisatorisch verwandter Strukturen, sind die Gründe nicht offensichtlich zu identifizieren.

## 2.1.2 Politik und Wirtschaft

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Entwicklungen erklären sich auch durch unterschiedliche politische und rechtliche Rahmenbedingungen in den einzelnen Ländern.

Die Zulassungsprozesse für Fahrzeuge sind national unterschiedlich. Dominierend sind zwei Ansätze: Die behördliche Zertifizierung und die Selbstzertifizierung. Die behördliche Zertifizierung ist in Deutschland, Europa und Asien weit verbreitet, während der Prozess der Selbstzertifizierung hauptsächlich in Nordamerika (USA und Kanada) dominiert. In Deutschland folgt auf die erfolgreiche Prüfung eines repräsentativen Fahrzeugs (z. B. durch den TÜV) ein Zertifizierungsprozess durch eine Genehmigungsbehörde wie das Kraftfahrt-Bundesamt. Erst im Anschluss daran ist ein Fahrzeug für den Betrieb zugelassen. Die nordamerikanische Selbstzertifizierung kann durch unternehmensinterne Prozessoptimierung sehr viel schneller durchgeführt werden. Bei nachfolgend negativen Stichprobentests durch Behörden droht jedoch eine kosten-

intensive Rückrufaktion verbunden mit einem sehr hohen Haftungsrisiko für den OEM.

Konsequenzen der schnelleren Time to Market durch den Selbstzertifizierungsprozess in den USA sind am Beispiel Tesla beobachtbar. Die neuen Modelle der Marke können meist erst deutlich später im europäischen Markt angeboten werden (Reid, 2019). Der Fahrzeughersteller führt mehrmals jährlich OTA-Updates durch, die nur einen internen Test durchlaufen haben, was zwar mit hohen Risiken verbunden ist, aber der Marke zu einem technologischen Vorsprung in der Kundenwahrnehmung verhilft (Beta Breakers, 2017). Der US-Kongress sicherte der Automobilindustrie ca. 100 Millionen USD zu, um an autonomen Fahrzeugen zu forschen. Die Summe wurde ausschließlich an öffentliche Einrichtungen und akademische Institutionen vergeben, nicht aber an Industrieunternehmen (Shepardson, 2019).

Wirtschaftlich wurde der Automobilhersteller Tesla mit rund 5 Mrd. USD gefördert, diese wurden unter anderem in Form von Rabatten und Steuervergünstigungen realisiert. Zudem bestehen in den USA Kaufanreize in Form von Steuergutschriften von bis zu 7.500 USD beim Kauf eines Elektrofahrzeugs. Dies gilt nur für den Kauf von Fahrzeugen von Herstellern, die weniger als 200.000 Fahrzeuge pro Jahr veräußern. Bisher haben nur General Motors und Tesla diese Grenze erreicht, die Fahrzeuge dieser Marken werden daher nicht weiter gefördert (Richarz et al., 2019).

Die USA sind mit den genannten Firmen und Mobilitätsdienstleistern weltweit führend hinsichtlich angemeldeter Patente im Bereich autonomes Fahren (Stegmaier, 2019). Zudem vereinen sie die weltweit größten Investitionen in Mobilitäts-Startups.

**Inbesondere gegenüber Europa dominiert die amerikanische Gründungslandschaft, begründet wird dies häufig mit kulturellen Unterschieden bezüglich Risikoaversion und Investmentsummen.**

Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung der amerikanischen Konzerne Amazon, Alphabet und Microsoft liegen unter den fünf höchsten der Welt (Skillicorn, 2019). Bezogen auf die Gesamtwirtschaft investieren US-amerikanische Firmen rund 300 Mrd. Euro in Forschung und Entwicklung, während deutsche etwa 60 Mrd. Euro dafür ausgeben und chinesische Unternehmen lediglich 35 Mrd. Euro. Trotzdem haben die europäischen IT- und Automobilkonzerne auf Branchenebene eine

höhere FuE-Intensität (Verhältnis: FuE-Ausgaben zu Umsatz) als die asiatischen und nordamerikanischen Unternehmen. Volkswagen zählt zu den zehn FuE-intensivsten Unternehmen der Welt (Ernst & Young, 2019). In den USA sind große Unterschiede zwischen den 50 Bundesstaaten ein Grund für die starke Zentrierung innovativer Firmen auf das Silicon Valley und die liberalen Bedingungen für Teststrecken für autonome Fahrzeuge in einigen wenigen Staaten wie beispielsweise Arizona (KPMG, 2019). Es bestehen streng regulierte Lizenzierungsregelungen hinsichtlich der Technologien, falls Entwicklung und Test in unterschiedlichen Bundesstaaten stattfinden. Der „SELF DRIVE Act“ und der „AV START Act“ sind zwei Gesetzgebungen, die zur Abstimmung in einigen Staaten gelten und autonome Fahrzeuge behandeln. Trotzdem gelten die USA als fortschrittlich bezüglich der rechtlichen Konditionen vernetzter und autonomer Fahrzeuge, da kommerzielle Nutzung dieser Fahrzeuge bereits legal ist (Mittereder, 2018). In Kalifornien dürfen vier Unternehmen Ride-Hailing Services mit autonomen Fahrzeugen testen: AutoX, Pony.ai, Waymo und Zoox. Zudem dürfen Level-5-Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen getestet werden, was in China und Europa verboten ist.

**Den niedrigen Ausgaben für Forschung und Entwicklung im chinesischen Markt stehen hohe Summen an politischen Subventionen gegenüber.**

Die Strategie „Made in China 2025“ und der „Mid-and Long-Term Plan for the Automotive Industry“ von 2017 formulieren hohe Ziele für alternative Antriebe, intelligente, vernetzte Fahrzeuge und Energieeffizienz. Es wurden Investmentfonds für Industrie, Wissenschaft und Technologie im Automobilkontext eingerichtet. Zudem geht aus den Dokumenten die Forderung hervor, dass Behörden und Banken die finanzielle Unterstützung der Automobilindustrie mittragen sollen. 2018 erfolgte die Verabschiedung einer weiteren Strategie zur Entwicklung intelligenter Fahrzeuge, die insbesondere Schlüsseltechnologien, Fahrzeugökosysteme, Infrastruktur und gesetzliche Regelwerke adressiert.

Darauffolgend wurden die Regularien für das Testen autonomer Fahrzeuge überarbeitet, die sich im Vergleich zu den USA und Europa trotzdem noch sehr konservativ gestalten. Lediglich regionale Behörden erlauben liberalere Testkonditionen mit eingriffsbereitem Fahrer bis Level 4, was den regionalen Wettbewerb erhöht und die Entstehung von Kompetenzclustern forciert. Ausländische Unternehmen können nur dann Tests in China durchführen, wenn sie dort einen Unternehmensstandort oder ein Joint Venture vorweisen. Die kommer-

zielle Nutzung hochautomatisierter Fahrzeuge ist nicht gestattet. Da China lediglich nationalem Recht unterliegt, sind die Regelungen jedoch schnell anpassbar. Obwohl die Datenschutzverordnungen und Cybersecurity-Bedingungen in China im internationalen Vergleich wenig strikt wirken, strebt die Regierung stärkere Einschränkungen von Datenverwendung und Schutzbedingungen an. Grund hierfür sind vor allem öffentlich gewordene Missbrauchsfälle und Datenskandale in den vergangenen Jahren. Die gesetzlichen Regularien für personenbezogene Daten bleiben weiterhin sehr liberal, was gesellschaftlich zu niedrigem Datenschutz führt, aus wirtschaftlicher Sicht jedoch der schnelleren Entwicklung von Innovationen im Bereich der KI stärken soll (Zhao, 2019). Strenge Regularien bleiben aber vor allem im HD-Mapping bestehen, außerdem haben ausländische Unternehmen bislang sehr eingeschränkte Rechte bezüglich der Sammlung und Nutzung von Daten.

Die staatlichen Eingriffe und Initiativen in China waren im Bereich der E-Mobilität bereits sehr konsequent. Es wurden neben staatlichen Fördermitteln teilweise zusätzliche regionale Mittel ausgegeben und weiterhin Steuererleichterungen und Vorteile bei Instandhaltungsmaßnahmen eingeführt. Neben dem Ausbau der Ladeinfrastruktur führte die Regierung Restriktionen für die Anzahl konventionell betriebener Fahrzeuge in Form von hochpreisigen Zulassungslotterien ein.

Die konsequente Strategie der chinesischen Regierung führte dazu, dass in China bis heute die meisten E-Fahrzeuge verkauft wurden, allerdings wurde der Markt aufgrund der hohen Anreize teilweise mit Elektrofahrzeugen minderer Qualität geflutet. Einige Start-ups und Unternehmen konnten sich nur durch die staatlichen Förderungen am Markt halten.

Dennoch konnten viele Unternehmen Innovationen auf den Markt bringen. Darüber hinaus zeigt die chinesische Bevölkerung ein überdurchschnittlich hohes Interesse an neuen Mobilitätsangeboten und Technologien. Dies gilt auch für autonome, vernetzte Fahrzeuge. Für diesen Markt ist das Potenzial in China zum aktuellen Zeitpunkt allerdings in weiten Teilen durch niedrige Infrastrukturstandards limitiert.

In Deutschland sind zwischen 2012 und 2017 fast 800 Millionen Euro Bundesausgaben an heimische Fahrzeughersteller geflossen, zwischen 2007 und 2017 wurden darüber hinaus 969 Millionen Euro für Forschung und Entwicklung bereitgestellt. Die Landesmittel, die Baden-Württemberg für Initiativen

zur Elektromobilität bereitstellt, lagen mit 123,5 Millionen Euro im Bundes-Vergleich am höchsten (2010–2018). Weiterhin existieren Kaufprämien für Elektro- und Hybridfahrzeuge und weitere Förderungsmaßnahmen der Elektromobilität (Becker, 2017).

Deutschland ist eines von 73 Ländern, die das „Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr“ von 1968 unterzeichnet haben. Seit 2014 sind durch eine Erweiterung Fahrerassistenzsysteme erlaubt.

**Auf Basis eines Beschlusses des Deutschen Bundestags ist seit 2017 das Testen autonomer Fahrzeuge des Levels 4 auf öffentlichen Straßen erlaubt, unter der Bedingung eines wahrnehmungsbereiten Fahrers, womit Level-5-Fahrzeuge nicht erlaubt sind (Gesetz zum automatisierten Fahren (Achstes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes, 21. Juni 2017)<sup>2</sup>.**

Der Verkauf und die kommerzielle Nutzung automatisierter Fahrzeuge über Level 2 sind jedoch durch das Straßenverkehrsgesetz unterbunden (DPMA, 2020). Diese Bedingungen gelten im globalen Vergleich als fortschrittlich, die Einschränkungen ergeben sich jedoch aus internationalem Recht, daher ist dessen Änderung eine Voraussetzung für weitere Liberalisierung.

Eine für vernetztes Fahren gegründete Ethikkommission legte diesbezüglich Richtlinien vor, die in praktischer Anwendung jedoch Schwierigkeiten bereiten. Strikte Regelungen gibt es zusätzlich durch die Datenschutz-Grundverordnung (DS-GVO), die auf europäischem Recht beruht. Sie regelt, dass ausschließlich nicht personenbezogene Daten ohne Einschränkung genutzt werden dürfen. Die technische Infrastruktur zur Anonymisierung dieser Daten ist allerdings nicht durchgehend gegeben.

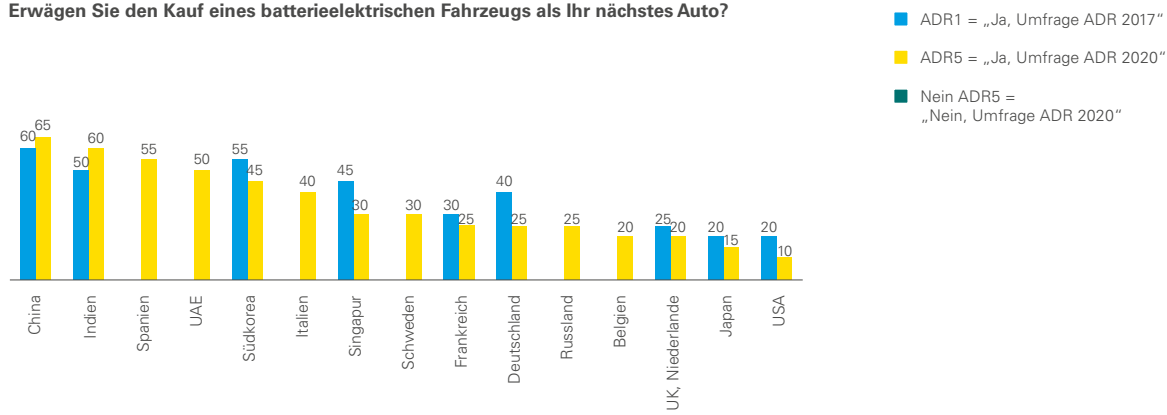
**Für die Automobilbranche erfordern die Regelungen, Fahrzeugarchitekturen und Softwaresysteme über „Privacy by Design“ datenschutzkonform zu gestalten.**

Zudem ist bei Weiterverarbeitung aufgenommener Daten eine Datenschutzfolgeabschätzung notwendig.

Zusammenfassend differenzieren sich die USA insbesondere durch die Privatisierung der Zertifizierung für Fahrzeuge und Fahrfunktionen. Es wird eine kürzere Time to Market ermög-

2 | Anmerkung: Das vorliegende Themenpapier adressiert den Stand zum Zeitpunkt September 2020. Aktuelle Diskussionen um eine Änderung des Gesetzes zum automatisierten Fahren sind somit nicht berücksichtigt.

**Erwägen Sie den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeugs als Ihr nächstes Auto?**



**Würden Sie sich trotzdem wieder ein Auto kaufen, wenn vollständig autonome Robocabs zu geringeren Kosten pro Fahrt im Vergleich zu Ihrem eigenen Auto eingesetzt werden könnten?**



Abbildung 34: Kaufbereitschaft E-Fahrzeuge bzw. Verzicht auf eigenes Fahrzeug bei billigerem Robotaxi-Angebot im Ländervergleich

Quelle: Bernhart, Riederle, 2019

licht und bei Erfolg kann ein Technologievorsprung erzielt werden. Gleichzeitig birgt diese Regelung ein hohes Unfall-, Schadens- und Haftungsrisiko. In Europa ist die Einheitlichkeit der Regelungen für automatisierte Fahrzeuge und deren Testbetrieb über Landesgrenzen hinweg ein Vorteil, der im Vergleich zu den anderen Nationen heraussticht. Auf der anderen Seite sind behördliche Zertifizierungsprozesse und strenge Datenschutzregelungen häufig Faktoren, die die Geschwindigkeit innovativer Entwicklungen und deren Vermarktung drosseln.

China zeigt auf, welch massiven Einfluss die staatlich forcierte Förderung von Technologien auf die Wirtschaft haben kann. Die Geschwindigkeit des technologischen Wandels und die rasante Transformation der Industrie hat jedoch unter anderem Überkapazitäten zur Folge. Somit zeigen die drei Regionen klare Unterschiede in der Art und Weise auf, die Zukunft der Mobilitätssysteme zu gestalten. Diese Ansätze gilt es zu untersuchen, um darauf aufbauend individuelle Entscheidungen zu treffen.

**2.1.3 Gesellschaft**

Das soziale und demografische Umfeld ist unabhängig von der

Größe der drei betrachteten Regionen sehr divers. China als im betrachteten Vergleich bevölkerungsreichster Staat hat mit ca. 1,4 Mrd. Einwohnern und rund 130 Metropolen eine sehr urbanisierte Gesellschaft (Rösch, 2020). Der zunehmende Wohlstand der Bevölkerung in den letzten Jahrzehnten führte zu einer höheren Nachfrage nach Mobilität und hohem Konsum. Aufgrund der großen städtischen Bevölkerung gehören Mobilitätslösungen in Großstädten zu den am meisten gefragten Lösungen in China, die durchschnittliche Wegstrecke ist ca. 50 km pro Tag. Die Nachfrage nach E-Fahrzeugen mit höherer Reichweite ist daher gering, die Nachfrage nach Mobilitätsdiensten für innerstädtischen Verkehr und autonomen Taxis jedoch hoch.

**Während die Anzahl verkaufter Fahrzeuge in Europa und den USA aber weiter abnimmt, fragen asiatische Länder zwar verstärkt Fahrzeuge nach, präferieren dabei aber elektrische Antriebe.**

Unter den 20 am häufigsten verkauften E-Fahrzeugen sind nur drei deutsche Modelle der Marken BMW und VW. Dominiert wird der Markt von Tesla, das etwa 17 % aller E-Fahrzeuge weltweit verkauft hat (Shahan, 2020).

Abbildung 34 zeigt die Bereitschaft, beim nächsten Fahrzeugkauf ein E-Fahrzeug vorzuziehen (der linke Balken zeigt die Bereitschaft im Jahr 2017, der rechte im Jahr 2019). In den USA ist die Erwägung eines E-Fahrzeug-Kaufs im internationalen Vergleich sehr gering und in den letzten Jahren sogar rückläufig. Auch in Deutschland nimmt die Bereitschaft ab.

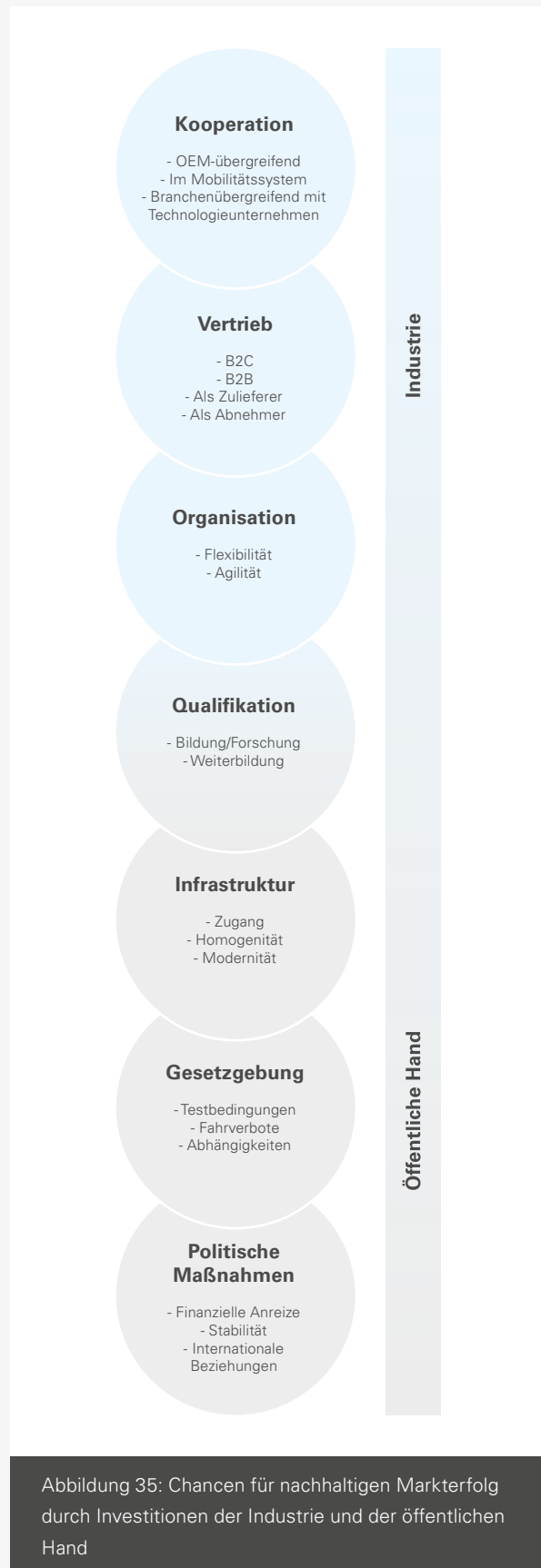
**Wenn es Robotaxis geben würde, die günstiger wären als das eigene Fahrzeug, würden jedoch 50% der Deutschen kein eigenes Fahrzeug mehr besitzen wollen; dies ist nur bei 35% der Chinesen und US-Amerikaner der Fall (Bernhart, Riederle, 2019).**

In Deutschland ist damit ein Fokus auf Kosten zu unterstellen, während in China das Fahrzeug häufig noch als Prestigeobjekt gilt. Zudem ist in Deutschland die Nachfrage nach autonomen Angeboten im öffentlichen Verkehr höher als die nach autonomem Individualverkehr (Fluhr, 2015).

## 2.2 Chancen für nachhaltigen Markterfolg

In der gesamten Automobilindustrie sind Neuordnungen und Transformationen zu beobachten. Neben politischen Herausforderungen, die die globale Automobilwirtschaft beeinflussen (Brexit, Zölle etc.), verändern regulatorische Vorgaben wie CO<sub>2</sub>-Flottenvorgaben Umsatz- und Gewinnentwicklung etablierter Unternehmen. Diese Veränderungen im Industrieökosystem erfordern eine klare Strategie. Im Folgenden werden daher die Chancen durch Investition und Förderung in der technischen, wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Dimension aufgezeigt. Technologischer Hintergrund dieser Maßnahmen sind die bedeutenden Entwicklungen, die in Kapitel 1 umfassend beschrieben sind.

Übergreifend für alle Regionen können sieben Stellschrauben für Investitionen und Förderungen formuliert werden. Neben den von den Unternehmen zu beeinflussenden Faktoren wie Kooperationen, Vertriebskanäle, Unternehmensorganisation und Qualifizierungsmaßnahmen gibt es staatliche Fördermöglichkeiten. Diese erstrecken sich ebenso auf den Bereich Qualifizierung, ferner ist die öffentliche Hand verantwortlich in den Bereichen Infrastruktur, Gesetzgebung und politische Maßnahmen (Abbildung 35).



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 35: Chancen für nachhaltigen Markterfolg durch Investitionen der Industrie und der öffentlichen Hand

In Deutschland liegen die Chancen vor allem im großen Ansehen der Industrie und ihrer bisherigen Marktmacht im Premiumsegment. Der erste Pfeiler, um in der deutschen Automobilindustrie auch zukünftig nachhaltigen Erfolg zu erreichen, ist Kooperation. In den vergangenen Jahren zeigte sich, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, bereits ein hoher Trend zur Zusammenarbeit. Diese hat mehrere Ausprägungen.

**Zunächst ist es von Bedeutung, dass die etablierten deutschen OEMs und das zugehörige Lieferantenumfeld in den traditionellen Geschäftsbereichen noch stärker kooperieren.**

Bisher wird das klassische Geschäft mit konventionell betriebenen Fahrzeugen als wettbewerbsentscheidend wahrgenommen. National gemeinsame Aktivitäten auf allen Stufen der Produkterstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren können jedoch hohe kostenbezogene Synergieeffekte erzielen. Hierüber wären für die einzelnen Unternehmen finanzielle Ressourcen für Zukunftsinvestitionen geschaffen. Gestützt wird dies durch die hohe Standardisierung hinsichtlich der Prozesse, Methoden und Entwicklungswerkzeuge in der gesamten Industrie, begleitet durch ähnliche Organisationsstrukturen und Denkmuster. Innerhalb des VW Konzerns mit diversen Marken ist darüber hinaus sichtbar, dass die markenspezifischen Charakteristika trotzdem im Markt wahrgenommen werden.

Keiretsu-Lieferanten (Roßmann, 2003) nach asiatischem Vorbild bilden die höchste Stufe der Einbindung zum OEM. Die Unternehmen sind zwar rechtlich voneinander unabhängig, jedoch wirtschaftlich in enger Kooperation voneinander abhängig. Dies schlägt sich in organisatorischer oder EDV-seitiger Zusammenarbeit nieder. Vorteile für den OEM bestehen in einer geringen Produktionstiefe und der Nutzung von Kompetenzen und Know-how des Zulieferers, während sich Nachteile im hohen Koordinationsaufwand, im Risiko des eigenen Know-how-Transfers und in einem hohen Maß an gegenseitiger Abhängigkeit ergeben. Die wechselseitige Abhängigkeit ermöglicht beiden Parteien, Druck auf die Gegenseite auszuüben, weshalb aus der Perspektive des OEMs eine moderate Abhängigkeit vom Zulieferer besteht.

**Weiterhin ist stärkere Kooperation zwischen den etablierten Akteuren und darüber hinaus mit weiteren Unternehmen wie ÖPNV- und Mobilitätsplattformanbietern empfehlenswert, um gemeinsame Lösungen für intermodale Verkehrssysteme zu entwickeln.**

Vorteilhaft an solchen gemeinschaftlichen Entwicklungen ist die Gewinnung von Kunden für ein Gesamtsystem und damit die Verhinderung der Kannibalisierung von einzelnen Akteuren in diesem System. Schließlich kann nur ein gesamtheitliches Verkehrskonzept mit möglichst lückenloser Abdeckung Kundenzufriedenheit garantieren.

Die dritte Kooperationschance liegt in der Zusammenarbeit mit Technologieunternehmen zur gemeinschaftlichen Erprobung und Entwicklung zukünftiger Technologien. Dies wird heute beispielsweise über die Integration von Betriebssystemen ansatzweise realisiert, könnte aber intensiviert werden.

**Gemeinsame Standards, die Integration von wettbewerbsdifferenzierenden Services und die Möglichkeit, über Erprobung eine große geteilte Datenbasis für KI-Anwendungen zu gewinnen, sind entscheidende Potenziale.**

Beispielhaft für diese Form der Kooperation, die die ersten beiden Kooperationsarten gewissermaßen miteinschließt, ist die gemeinsame Übernahme des Kartendienstes Here durch Daimler, BMW und Audi.<sup>3</sup> Daimler konnte insbesondere mithilfe dieser Akquisition das Infotainment-Betriebssystem MBUX weiterentwickeln, das beispielsweise führend im Bereich der Sprachassistenten ist (Gulde, 2019). Damit wird deutlich, dass die Kooperation zwischen OEMs und Technologieunternehmen entscheidend in Bezug auf zukunftsfähige Produktentwicklungen sein kann. Die USA beheimaten ein von Deutschland zu unterscheidendes Automobilökosystem und zusätzlich sind politisch, geografisch und demografisch andere Ausgangspunkte festzumachen. Für die klassische Automobilindustrie, die sich primär aus OEMs wie General Motors und Ford zusammensetzt, gelten ähnliche Ansätze wie für die deutschen Premiumhersteller. Allerdings werden diese Unternehmen mit einem anderen Markenimage assoziiert. Im Heimatmarkt stehen sie stellvertretend für die dort vorrangig nachgefragten SUV-Modelle und Pick-up-Trucks, deren Anteil an Fahrzeugverkäufen in den letzten zehn Jahren entgegen dem weltweiten Trend zunahm. Nachhaltiger Erfolg auf dem Weltmarkt gilt in dieser Kategorie aufgrund von globalen und geopolitischen Vorgaben als unwahrscheinlich. Dadurch kann hauptsächlich eine durch Effizienzsteigerungen in Produktion und Ressourceneinsatz entstehende Kostensenkung bei sinkender Nachfrage als Umsatzstabilisator wirken. Die Empfehlungen zu Kooperation, Veränderung des Vertriebskanals und Reorganisation gelten für diese Unternehmen entsprechend denen für deutsche Premium-OEMs.

3 | Inzwischen sind u. a. auch Continental, Bosch, Intel und Tencent Teil der Kooperation bzw. Anteilseigner.



Chinas Automobilindustrie ist wie die meisten Unternehmen im Mobilitäts- und Technologiesektor des Landes erst in den vergangenen Jahren zu enormer Größe herangewachsen. Damit ist der historische Traditionswert der Industrie weniger tiefgreifend als in Deutschland oder den USA. Während diese OEMs zunächst Vorbild der chinesischen Konkurrenz waren, sind nun zahlreiche chinesische Fahrzeughersteller und insbesondere E-Fahrzeughersteller auf dem Markt. Bereits 2017 wurde über die Hälfte aller verkauften rein elektrisch betriebenen Autos in China verkauft, dominierend dabei die nationalen Modelle von BAIC oder Geely.

**Exporte chinesischer Marken finden bis dato weltweit nur in geringem Umfang statt, daher ist die chinesische Automobilwirtschaft bisher stark national orientiert.**

Die nationale Stärke, die durch finanzielle Anreize, strenge Verbote und Sanktionen in China dominiert, begründet im aktuellen Markt den Fokus auf nationale Kooperation. Insbesondere gilt dies für Dienste, die auf Kartendaten basieren und automatisierten, vernetzten Fahrzeugen. Trotzdem gibt es Beispiele grenzüberschreitender OEM-Zusammenarbeit. Der OEM Geely hat in seiner Kooperation mit Volvo die E-Fahrzeug-Marke Polestar entwickelt und bereits zwei Modelle auf den Markt gebracht. Darüber hinaus sind chinesische Technologiekonzerne als Plattformanbieter in zahlreichen ausländischen Partnerschaften vertreten (siehe Kapitel 2.1). Deutsche OEMs sind unter der Bedingung chinesischer Joint Ventures in China erlaubt, daher entstanden beispielsweise Kooperationen von Daimler mit BAIC und BYD sowie zwischen JAIC, FAW, SAIC und Volkswagen.

Die Zusammenarbeit von Mobilitätsplattformen ist sowohl in China als auch international sehr stark. Alibaba hat eine Kooperation mit Audi, Tencent bildet mit Audi eine Allianz im Bereich der KI für vernetzte Fahrzeuge. Auch BMW und Daimler sind über Softwareplattformen mit Tencent, Alibaba und Baidu kooperativ verbunden.

Kooperationen führen zu einer weiteren strukturellen Veränderung, vor der vor allem OEMs stehen – der des Vertriebskanals. Es sind mehrere Szenarien denkbar, deren Vorteilhaftigkeit jeweils von der konkreten Ausgestaltung abhängig ist. Der klassische Business-to-Customer(B2C)-Vertrieb für kundenspezifische Fahrzeuge im Individualverkehr stellt den Absatzkanal dar, der in den nächsten Jahren mit großer Sicherheit weiteren Umsatz generieren wird. Insbesondere die dement-

sprechende Erweiterung des Umsatzpotenzials auf OTA-Updates und On-demand-Services über den Gesamtlebenszyklus ist erfolgversprechend. Dieser Absatzkanal verspricht langfristig aber keinen ausreichenden Erfolg, um die Automobilkonzerne in ihrer heutigen Organisationsstruktur zu erhalten. Weitere Absatzpotenziale sollten demnach erschlossen werden. Im Business-to-Business(B2B)-Markt ist der Vertrieb einer Shared-Mobility-Flotte an entsprechende Plattformanbieter möglich. Dies ermöglicht, wie bereits bei der Kooperation im Entwicklungszyklus, entsprechende Datennutzungs- und Erprobungsmöglichkeiten. Dieser Vertriebskanal ist jedoch stark von der Ausgestaltung und der Verhandlungsposition des OEMs und des zugehörigen Plattformanbieters abhängig.

**Es ist zu erwarten, dass sich die Bewegung des Wertschöpfungsanteils vom Hardware- hin zum Software- und Dienste-Bereich weiter beschleunigt. Heutige OEM werden somit in ihrer Marktposition herausgefordert und sollten über Kompetenzen und Kooperationen Wertschöpfungsanteile in den Bereichen Software und Dienste sichern.**

In den USA sind Fiat-Chrysler und Jaguar für Waymo vermehrt als Lieferanten zu betrachten, da die zugelieferten Modelle von der Alphabet-Tochter automatisiert und in deren Testflotte aufgenommen werden. Mit Honda forscht Waymo hingegen kooperativ an automatisierten Nutzfahrzeugen.

Innerhalb der chinesischen Kooperationslandschaft im Bereich vernetzter Fahrzeuge kann die Rolle der OEMs als Zulieferer der Technologieunternehmen interpretiert werden. Dies liegt an der weniger relevanten Markenmacht und an der Präferenz für innovative Softwarefunktionen im Abnehmermarkt.

Eine weitere Chance ergibt sich durch die Veränderung interner Organisationsstrukturen bei den Unternehmen der klassischen Automobilindustrie. Um die marktbeherrschenden Trends zu realisieren, ist auch eine Anpassung an die Ablauforganisation von Technologieunternehmen empfehlenswert. Klassische Architektorentwicklungsparadigmen wie das V-Modell kommen gegenüber den Anforderungen an Flexibilität an ihre Grenzen.

**Für die Realisierung von inkrementeller Architektorentwicklung und für kontinuierliche Funktionserweiterung über OTA-Updates sind bestehende Prozesse und deren Organisation zu transformieren.**

Nachhaltiger Erfolg bedingt die Gewinnung von Beschäftigten mit Kompetenzen in den zukünftig entscheidenden technischen Bereichen. Die bisher ingenieurdominierte Fahrzeugbranche in Deutschland benötigt einen immer stärker werdenden Anteil an IT-Spezialisten. Ihre Gewinnung stellt sich herausfordernd dar. Neben der Automobilindustrie fragen auch viele weitere Wirtschaftszweige IT-Spezialisten nach.

**Aktuell ziehen viele Spezialisten in den relevanten technischen Fachgebieten eine Tätigkeit in anderen Branchen einer Beschäftigung in der Fahrzeugbranche vor.**

Verstärkt wird das Defizit an Fachkräften durch bisher nicht ausreichend vorhandene Bildungsmöglichkeiten in diesem Bereich. In der Schulbildung finden IT-Inhalte bislang nur in geringem Umfang Beachtung, zu wenige Schulabgänger entscheiden sich für eine entsprechende Berufsausbildung oder ein Studium in diesem Bereich. Zusätzlich gibt es bisher kaum Weiterbildungsangebote für Quereinsteiger und die Incentivierung solcher Programme für Beschäftigte. Die Chance in der Entwicklung von Kompetenzträgern im Bereich der zukünftig relevanten Technologien gilt es zu nutzen, da die Effekte vor allem langfristig Vorteile versprechen.

Der in diesem Bereich wahrgenommene Fachkräftemangel zeigt exemplarisch, dass eine Verknüpfung von Aktivitäten der Industrie mit Förderungen durch die öffentliche Hand empfehlenswert ist. Bildungs- und Forschungsinstitutionen sollten neue Aktivitäten ausgerichtet an den Qualifizierungsbedarfen entwickeln, zudem kann Unternehmen bei interner Umstrukturierung kooperativ Unterstützung angeboten werden.

In den USA werden die Kompetenzgewinnung und die Bildung nationaler Kooperationen durch den starken Informationstechnologie-Cluster im Silicon Valley, Kalifornien, erleichtert. Dort ansässig sind vor allem die erfolgreichsten Unternehmen in den Bereichen Digitalisierung, Vernetzung, Elektromobilität, Automatisierung und Hightech sowie diverse Mobilitätsplattformanbieter. Sieben dieser Technologieunternehmen gehören zu den zehn weltweit wertvollsten Unternehmen. Das Ausbildungsniveau für IT-Fachkräfte in den USA wird allgemein jedoch nicht als qualitativ hochwertiger betrachtet. Die internationale Ausrichtung der Unternehmen, die global Fachkräfte rekrutieren, erleichtert jedoch den Zugang zu entsprechenden Kompetenzträgern. Hohe Verdienstmöglichkeiten, innovative Start-ups mit flexiblen Arbeitsbedingungen in Kombination mit der englischen Sprache als zu vernachlässigende Barriere, erhöhen die Attraktivität zusätzlich. Im Bereich der KI sind knapp

unter einem Drittel der Wissenschaftler national rekrutierte Beschäftigte, fast 70 % aller Wissenschaftler kommen jedoch aus China, Europa oder Indien. Um nachhaltigen Erfolg in den Technologiebranchen zu gewährleisten, ist für die Vereinigten Staaten der globale Zugriff auf entsprechende Talente ausschlaggebend. Entsprechende Visaregularien, hohe Lebensqualität und stabile politische Bedingungen gelten als entscheidend, um dies zu ermöglichen. Die US-amerikanische Regierung ist jedoch zunehmend besorgt im Wettbewerb um hochqualifizierte Technologiekompetenzträger und verschärft seit 2019 die Visabedingungen. Die Begründungen weisen insbesondere die Risiken des Wissensabflusses und der nationalen Sicherheit aus.

Eng mit den bestehenden Technologieclustern verknüpft ist die Verfügbarkeit entsprechender Produkte. Durch die bereits existierenden Mobilitätsanbieter und Services in diesem Zusammenhang besteht ein Vorsprung gegenüber Europa. Diesen zu konservieren und in Kooperation mit weiteren Partnern auszubauen, gilt als Chance für US-amerikanischen Erfolg.

Auch in den USA ist der demografische Wandel eine Herausforderung: Prognosen zufolge werden im Jahr 2050 über 35 Millionen Amerikaner älter als 80 Jahre sein. Um diesen Wandel als Chance zu ergreifen, ist es bedeutend, entsprechende Mobilitätsdienste und -produkte anzubieten und zudem den entstehenden Bedarf an Arbeitskräften sowie unbesetzte Arbeitsplätze durch Bildungsprogramme oder technologische Entwicklungen auszugleichen.

In China wurde zur Jahrtausendwende eine umfassende, staatlich finanzierte Bildungsoffensive für Technologiekompetenzen eingerichtet, insbesondere mit dem Fokus, chinesische Arbeitskräfte über den Elektronikkomponentenmarkt hinaus wertvoll zu machen. In den vergangenen Jahren wurden insbesondere Universitätsabschlüsse in Software- und Technologiebereichen gefördert, die einen bedeutenden Anstieg an hochqualifizierten Absolventen in China hervorbringen. Darüber hinaus werden junge Menschen in China motiviert, an ausländischen Top-Universitäten zu studieren. Nach dem Abschluss locken monetäre Anreize, wieder zurück nach China zu kommen.

Die Bereitstellung und der Erhalt hinreichender Infrastruktur sind eine wichtige Basis für Innovationen. Dies beinhaltet sowohl Verkehrswege und deren Ausstattung mit benötigten Anlagen als auch die Bereitstellung von öffentlichen Verkehrsmitteln und relevanten Flächen. Die Einheitlichkeit dieser Kom-

ponenten erleichtert deren barrierefreie Nutzung.

**Bezüglich der Straßeninfrastruktur ist Deutschland durch die geringe Fläche und höhere Standards besser aufgestellt als andere Länder.**

Die Infrastruktur in Deutschland zählt im globalen Vergleich zu den besten zehn. Die Netzabdeckung, die zukünftige Betriebssysteme und die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ermöglicht, fehlt jedoch zu einem entscheidenden Teil. Auch die Integration neuer Plattformen und Mobilitätsangebote in das bestehende Ökosystem erfolgt nur vereinzelt. Das World Economic Forum (WEF) kommt im Report von 2019 zu dem folgenden Schluss:

**Die Breitband-Erschließung in Deutschland hat bis dato nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt, die Informations- und Kommunikationstechnologie kann dadurch nicht die zwingend notwendigen Fortschritte machen.**

In den USA und China sind vor allem große Distanzen eine infrastrukturelle Herausforderung, bedingt durch die im Vergleich zur EU um jeweils über 50 % größere Fläche. Die USA verfügen über ein weites, über die 50 Bundesstaaten unterschiedlich ausgeprägtes Straßennetz. Um effiziente Entwicklungsprozesse bei automatisierten Fahrfunktionen zu verbessern, bedarf es der Angleichung von Straßenschildern und -ausstattung. Zudem ist der amerikanische ÖPNV sehr rudimentär. Nahtlose Intermodalität, flächendeckende Zuganbindung oder regelmäßige ÖPNV-Verbindungen in ländliche Gebiete sind nicht vorhanden. Die von den US-Mobilitätsplattformen entwickelten Lösungen sind dementsprechend auf Ride-Hailing und Carsharing sowie autonome Taxis in Großstädten spezialisiert. Intermodale ÖPNV-Einbindung über Stadtbezirke hinaus wird kaum verfolgt.

Auch in China liegt der Fokus von Mobilitätsplattformen hauptsächlich auf autonomen Taxifahrten, was sich mit der Nachfrage der Bevölkerung deckt. Allerdings steht der Weiterentwicklung von Automatisierung schlechte Straßeninfrastruktur im Weg. Im Gegensatz dazu wurde die Ladeinfrastruktur für E-Mobilität durch hohe staatliche Beteiligung schnell ausgebaut. Da die zunehmende Urbanisierung in China teilweise eine Neuordnung in der Städte- und Raumplanung erfordert, können Infrastrukturdefizite im Rahmen dieser Maßnahmen ausgeglichen werden. Dies bietet in Verbindung mit dem flächendeckenden Mobilfunkstandard in China eine Chance für einen Innovationssprung.

**Eindeutige, übergreifend geltende rechtliche Vorgaben und Randbedingungen erleichtern die Verbreitung von neuen Verkehrskonzepten.**

Ihre Ausgestaltung sollte dabei an den Bedarf angepasst werden, falls dies technisch notwendig und sinnvoll ist. Insbesondere regional übergreifende und transnationale Vorgaben sind hierbei erfolgsentscheidend. Über Verbote, Abgaben und Grenzwerte kann zusätzliche Steuerung im Verkehr erreicht und bestimmte technische Mindestanforderungen umgesetzt werden.

In den USA ist eine uneinheitliche Regelung zu Testbedingungen, Haftung und Garantien hinderlich. Chancen liegen in der schnell zu erreichenden Marktreife von Innovationen durch die Zertifizierungsprozesse, die weniger Regularien unterworfen sind.

Rechtlich bietet die enge Anknüpfung an die chinesische Politik und deren Durchsetzungskraft eine Chance, schnelle technologische Erfolge zu unterstützen. Zudem unterliegt China weder der Wiener Konvention noch den UNECE-Regularien. Ob dies jedoch nachhaltigen Erfolg bedeuten kann, ist aus gesellschaftspolitischen Gesichtspunkten kritisch. Rechtliche Stellschrauben für größere Chancen zu nachhaltigem Erfolg liegen in China hauptsächlich in der Liberalisierung der Testbedingungen für automatisierte Fahrzeuge und die Kartendatennutzung. Einheitlich nationales Recht ist eine weitere Grundlage für Erfolg, die momentan nicht gegeben ist. Das Datenschutzrecht bietet in seiner aktuellen Gültigkeit viel Spielraum für die Nutzung von Daten, was eine Chance für chinesische Plattformanbieter sein kann, besonders schnell neue Technologien zu entwickeln. Demgegenüber stehen allerdings hohe Risiken des Missbrauchs sowie das Verbot der Datennutzung durch ausländische Unternehmen.

In Deutschland ist die Rechtslage flächendeckend am einheitlichsten, zudem gelten die liberalen Testbedingungen als förderlich.

**Mitunter lange Bearbeitungsprozesse und -fristen in Rechtsprechung sowie Abhängigkeiten von internationalen Vorgaben können ein Hindernis für schnelle Technologiesprünge darstellen.**

Ein Beispiel dafür ist auch die Zulassung von Ride-Sharing-Diensten und Carpooling, die zu Beginn ihrer Tätigkeit mit ausbleibenden Genehmigungen konfrontiert waren.

Stabile politische Verhältnisse sind hinsichtlich zukünftig zu erreichender Ziele Voraussetzung für richtungsweisende Innovationen. Gleichmaßen wirken beständige Zölle, Exportbedingungen und weitere internationale Bestimmungen. Als Ergänzung politischer Steuermechanismen können finanzielle Anreize Veränderungen beschleunigen.

Eine bedeutende Stellschraube in den USA ist die regulatorische und politische Ausrichtung als Basis für nachhaltigen Erfolg. Die Abkehr von weltweiten Klimazielen unter der Trump-Administration widersprach zumindest der Weiterentwicklung von alternativen Antrieben und nachhaltigen Geschäftsmodellen. Ebenso sind politisch riskante Handelsbeziehungen zu ausländischen Staaten Risikofaktoren für den technologischen Fortschritt der Nation.

In China besteht keine traditionelle Automobilindustrie, daher sind die politischen Maßnahmen hauptsächlich an der Unterstützung der neuen Unternehmen und im Konsumentenverhalten anzusetzen.

Zusätzlich zu den Investitionen, die auf Seiten der OEMs und der Automobilindustrie in Deutschland getätigt werden, zeigen sich von Seiten öffentlicher Hand entsprechende Förderfelder.

**Die öffentliche Förderung sollte verstärkt an Innovationen und den notwendigen Veränderungen durch vorherrschende Trends ausgerichtet sein, um nachhaltigen Erfolg zu ermöglichen.**

In der Vergangenheit hat die hohe Bedeutung der Automobilindustrie, von der die gesamte deutsche Wirtschaft und damit auch die Politik und die Wahlergebnisse abhängig sind, häufig zu Bestrebungen geführt bestehende Industriestrukturen zu stärken. Zukünftig sollten Fördermittel in Bildung, Forschung und Projekte in die zukunftsrelevanten Bereiche der Automatisierung, Robotik, Informatik und Künstliche Intelligenz, sowie das Themenfeld digitaler Geschäftsmodelle fließen. Dies steht in engem Zusammenhang mit übergeordneten politischen Zielen wie Klimaschutz. Um nachhaltig Chancen in wirtschaftliche Erfolge zu transformieren, sind vor allem langfristig wirksame Maßnahmen zu ergreifen und kurzfristige Begleitsymptome nicht als Ausschlusskriterium zu bewerten. Die daraus entstehenden Handlungsfelder werden in Kapitel 4 konkretisiert.

## 3. Trend- und Prognoseanalyse

### 3.1 Megatrends und ihr Einfluss auf die Automobilindustrie

Durch die zunehmenden softwarebasierten Funktionen im Fahrzeug ergeben sich neue Megatrends im Bereich der Automobilindustrie. Diese Trends sind einerseits durch politische Initiativen getrieben, etwa die Elektrifizierung als Folge der strengeren Abgasgesetzgebungen, andererseits leiten sie sich aus neuen technologischen Innovationen sowie aus Kundenwünschen ab. Hinzu kommt der Wunsch nach mehr Sicherheit und Fahrgastkomfort. Diese Megatrends (Abbildung 36) lassen sich zu den folgenden Kernthemen zusammenfassen:

- **Elektrifizierung:** Um die lokalen und globalen Emissionen zu begrenzen, werden Fahrzeuge zunehmend mit elektrischer Energie betrieben.
- **Digitalisierung:** Der Anteil der Software an der Umsetzung von Fahr- und Komfortfunktionen im Fahrzeug gewinnt stetig an Bedeutung. Dies lässt sich sowohl mit der kostengünstigeren Umsetzung von Funktionen in Software als auch mit den erweiterten Möglichkeiten, die sich aus dem Einsatz von Software ergeben, begründen.

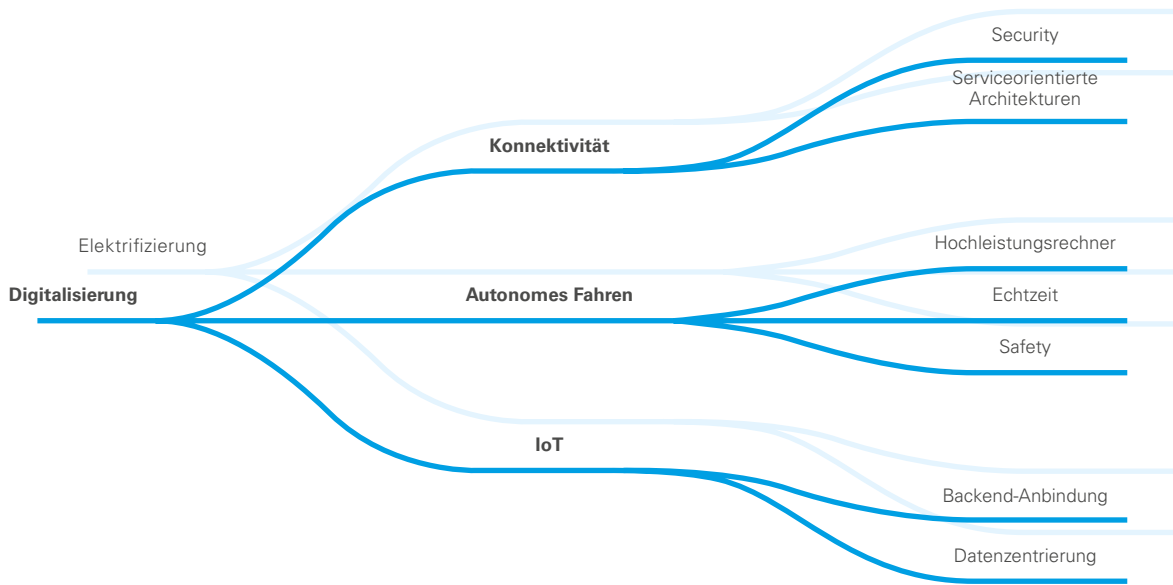
Der Megatrend Digitalisierung beruht grundlegend auf drei Kernthemen: Connected Car, IoT und autonomes Fahren (Köhler, Wollschläger, 2014). Die Effekte dieser Megatrends verschwimmen stark und lassen sich schwer getrennt voneinander betrachten. Die Digitalisierung und die Elektrifizierung gehen Hand in Hand.

### 3.1.1 Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung

Die Strukturstudie von 2019 (e-mobil BW, 2019) befasst sich unter anderem mit den Auswirkungen der Megatrends Digitalisierung, Automatisierung und Elektrifizierung auf die Automobilindustrie als Ganzes. Bezüglich der Elektrifizierung werden die folgenden Punkte diskutiert: Die Elektrifizierung verändert grundlegend die Wertschöpfungs- und Beschäftigungsstrukturen in der Automobilbranche. Mit teil- und voll-elektrischen Systemen verändern sich oder entfallen gar viele Komponenten des Fahrzeugs. Dies betrifft primär den Antriebsstrang, aber sekundär auch andere Komponenten. Gerade die Abhängigkeit von Batterien führt zu Bedenken bezüglich der Verfügbarkeit von Rohstoffen. So lassen sich jetzt schon Probleme mit dem Rohstoff Kobalt vorhersagen (Lindinger, 2018). Folglich hat die Batterieindustrie im Allgemeinen essenziellen Einfluss auf die Automobilindustrie.

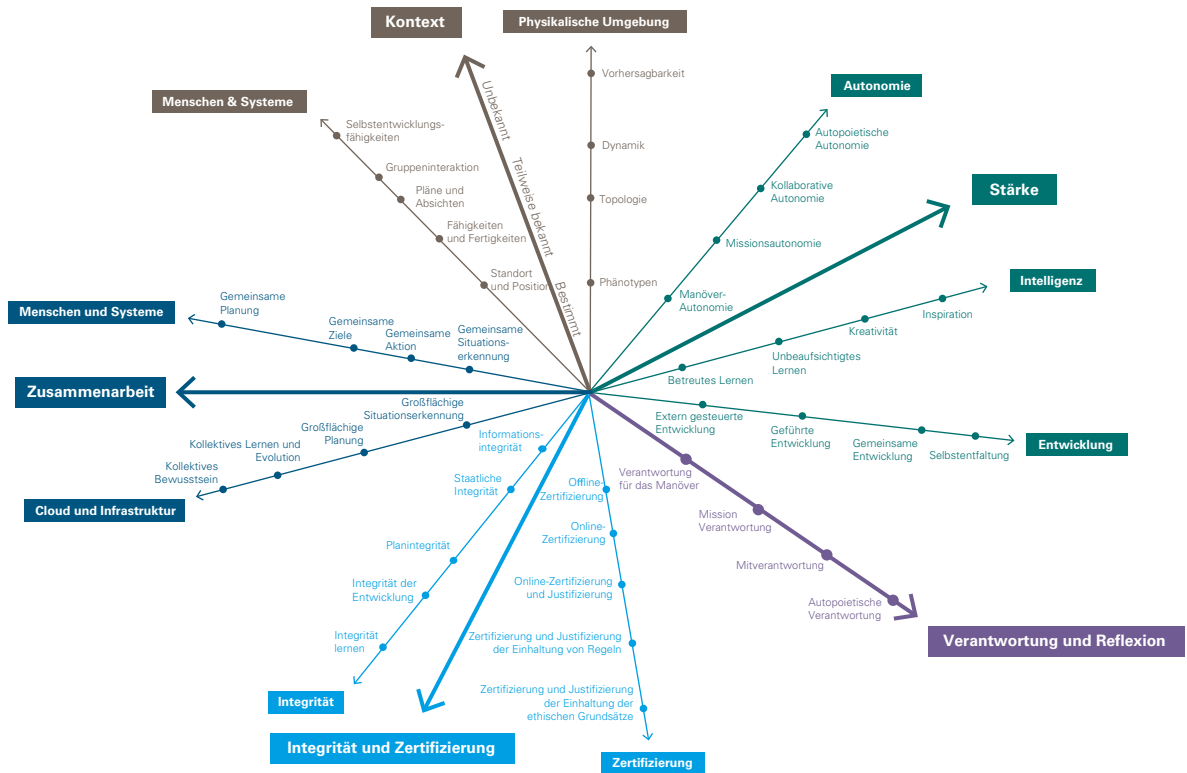
Bezüglich der Digitalisierung und damit explizit auch der Automatisierung werden die folgenden Aspekte diskutiert: Beide Trends sind starke Treiber für die steigende Abhängigkeit von Software. Durch die Digitalisierung bieten Fahrzeuge immer mehr Lösungen für Konnektivität und Kommunikation. Die Automatisierung führt zu einer steigenden Anzahl an Sensoren in Fahrzeugen, wobei auch bestehende Sensorik immer komplexer wird. Diese Komponenten sind vor allem eines: softwaregesteuert. Darüber kommt der IT-Sicherheit immer mehr Bedeutung für die Fahrzeugentwicklung zu.

Bezüglich der Trends IoT und Industrie 4.0 werden die folgenden Aspekte diskutiert: Die Produktion der Zukunft wird hochautomatisiert und flexibel. Zudem lässt sich die Nettoauswirkung auf die Beschäftigung nur schwer abschätzen.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 36: Facetten der Digitalisierung in der Automobilindustrie



Quelle: Damm, Heidi, 2019

Abbildung 37: Komplexitätsdimensionen von Mensch-Maschine-Systemen

Fahrzeuge als Mensch-Maschine-Systeme lassen sich in ihrem Entwurfsraum in fünf Komplexitätsdimensionen (Abbildung 37) unterteilen: technische Systemstärke, Kontext, Kooperation, Verantwortung und Reflexion sowie Integrität und Absicherung. Die Megatrends haben Entwicklungen am Fahrzeug zur Folge, die diese Multidimensionalität um weitere Ebenen erhöhen. Diese Dimensionen zeigen, in welche Richtung die Entwicklung moderner Fahrzeuge in den nächsten Jahrzehnten gehen wird (Damm, Heidl, 2019). Vor allem um höhere Level in der jeweiligen Komplexitätsdimension zu erreichen, müssen neue Anforderungen an Software und Betriebssysteme gestellt werden.

In den folgenden Kapiteln werden insbesondere die Einflüsse der Digitalisierung, Automatisierung und Elektrifizierung auf das Fahrzeug vor allem bezüglich Hardware, Software, Security und Safety beleuchtet.

### 3.1.2 Einflüsse auf fahrzeugeigene Software

Ein stetiger Trend in der Automobilindustrie, getrieben durch die Megatrends, ist die zunehmende Bedeutung von Software und deren Wirkungsraum in Fahrzeugen.

Dies betrifft mehrere Dimensionen:

- **Umfang:** Schon jetzt besteht die gesammelte Software eines Fahrzeugs aus mehreren Millionen Zeilen Code. Die Tendenz ist steigend (siehe Abbildung 38).
- **Aufgabenbereich:** Immer bedeutendere Funktionalitäten sind primär softwaregesteuert (Abbildung 39). So sind zum Beispiel autonome Fahrfunktionen mittels leistungsfähiger Software zu realisieren.
- **Interaktivität:** Software in Fahrzeugen ist nicht mehr isoliert in einzelnen Steuergeräten. Konnektivität, offene Schnittstellen und Software von Drittanbietern führen zu komplexen Softwaresystemen, wobei verschiedene, unabhängig voneinander entwickelte Softwareeinheiten kooperieren müssen.
- **Abstraktion:** Mit dem Trend zu zentraleren Multipurpose-Computern statt einzelnen Steuergeräten, entwickelt sich der ursprünglich hardwarenahe Softwarecode zu Code auf höheren Abstraktionsebenen, zum Beispiel mittels Virtualisierung.

Abgesehen von der Komplexität prägen die Megatrends weitere Aspekte der Software. Die Digitalisierung prägt das Fahrzeug als vernetztes cyberphysisches System. Themen wie Car2X, die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und dieser mit der Umwelt, verändern die Anforderungen an fahrzeugeigene Software. Zum einen gewinnen Sicherheitseigenschaften stark an Bedeutung. Zum anderen müssen auch zukünftige Mobilfunkstandards unterstützt werden (Stichwort Software-Defined Radio).

Drittanbietersoftware hält weiterhin Einzug in das Fahrzeug. Hier ist gerade die Kompatibilität verschiedener Softwarekomponenten für die funktionale Sicherheit (ISO 26262) von großer Bedeutung. Um Austauschbarkeit und Anbindung von externen Diensten zu ermöglichen, werden SoA erforderlich. Hierbei können erhältliche Dienste zur Laufzeit abgefragt und eingebunden werden. Diese können Dienste von Drittanbietern oder aus den Cloudservern der OEMs sein.

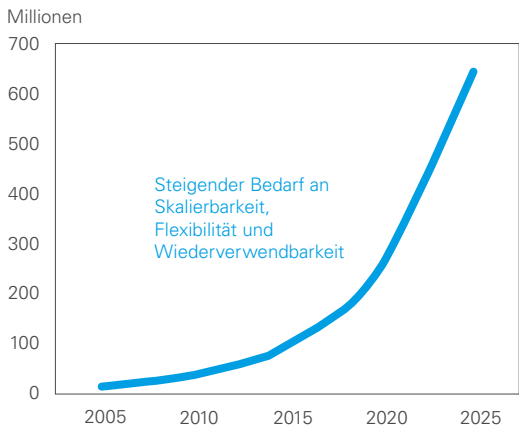
Damit einhergehend müssen offene Schnittstellen definiert und implementiert werden, da nun die fahrzeugeigene Software nicht mehr als geschlossenes System agieren kann. Als Folge der Dienstorientierung und der Öffnung fahrzeugeigener Software bietet sich die Möglichkeit, Systeme organisationsübergreifend zu entwickeln. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur quelloffenen Entwicklung softwareintensiver Systeme. Kollaboration bezüglich offener Software kann potenziell als Katalysator für die Entwicklung fahrzeugeigener Software dienen.

Open-Source-Projekte wie AGL oder GENIVI werden bereits heute von verschiedenen OEMs in Serienprodukten eingesetzt und weiterentwickelt. Dedizierte Organisationen wie die Autoware Foundation versuchen den Trend voranzutreiben. Speziell im Rahmen der Automatisierung bietet die Autoware Foundation Open-Source-Tools basierend auf ROS für die Entwicklung selbstfahrender Fahrzeuge an (Van den Bossche, 2020).

**Während sich der Softwarefokus als bedeutender Trend abzeichnet, werden in der Entwicklung noch immer viele Potenziale nicht voll ausgeschöpft.**

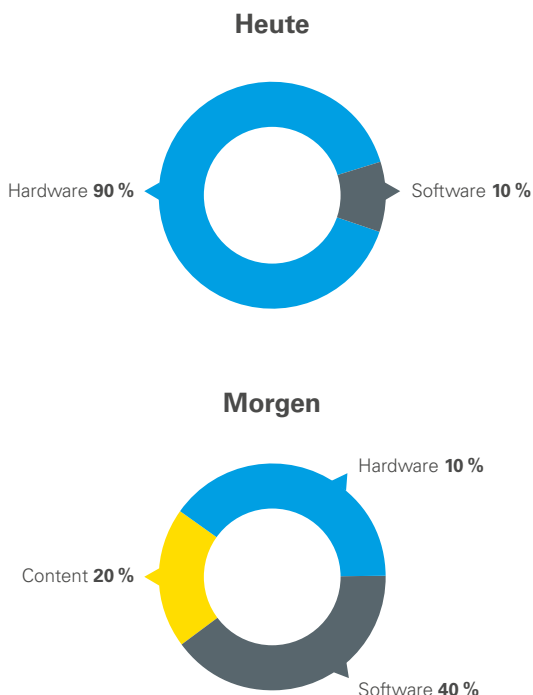
Die primäre Herausforderung der kommenden Jahre wird das Beherrschen der steigenden Komplexität fahrzeugeigener Software.

**Fahrzeug von morgen: 6x mehr Codezeilen**  
Durchschnittliche Anzahl von Codezeilen pro Auto



Quelle: McQuat, 2020

Abbildung 38: Softwarekomplexität in Fahrzeugen, gemessen in Lines of Code



Quelle: Morgan Stanley, 2013

Abbildung 39: Wert eines Fahrzeugs heute und in der Zukunft

### 3.1.3 Einflüsse auf fahrzeugeigene Hardware

Digitalisierung und Automatisierung erhöhen die Anforderungen an Hardware in Fahrzeugen. Die steigende Anzahl und Varianz von Softwarefunktionen und Betriebssystemen erfordern eine hohe Rechenleistung. Dies erfordert Veränderungen an den bestehenden Hardwarearchitekturen. Dabei dürfen aber fortbestehende Anforderungen wie Echtzeitaspekte nicht verletzt werden, zudem ist die Unterstützung von heterogenen Hardwarearchitekturen erforderlich.

Multicore-Architekturen haben bereits Einzug in moderne Fahrzeuge gehalten. Multicore-Prozessoren beinhalten mehrere Rechenkern und erhöhen damit die Rechenkraft, ohne die Taktfrequenz zu steigern. Dies ist vorteilhaft, da die Taktfrequenz aufgrund der Energiedichte mit wachsender Anzahl an Prozessoren an Grenzen stößt. Die Vorteilhaftigkeit von Multicore-Prozessoren hängt jedoch von der Softwarefunktion ab. Manche Rechenschritte lassen sich nur sequenziell ausführen und sind deshalb nicht durch Multicore-Hardware zu beschleunigen. Zudem erhöht Multicore-Architektur die Komplexität der Hardware und folglich auch der darauf ausgeführten Software. Multicore-Prozessoren lassen sich aber auch zur Umsetzung von Software-Redundanz zur Vermeidung von Ausfällen nutzen. Im sogenannten Lockstep Mode wird eine sequenzielle Aufgabe dupliziert und auf mehreren Kernen ausgeführt. Diese redundante Ausführung erlaubt es Ausfälle zu erkennen und zu ignorieren (Brock, Kalmbach, 2014).

Einen Schritt weiter geht diese Entwicklung durch Manycore-Prozessoren, das sind Prozessoren, die hunderte Kerne besitzen können. Dies ermöglicht einen extrem hohen Parallelisierungsgrad, die einzelnen Kerne sind sehr simpel und operieren unabhängig voneinander. Die sequenzielle Performanz der einzelnen Kerne ist jedoch nicht besonders hoch, da Manycore-Prozessoren nicht für sequenzielle Aufgaben ausgelegt sind (Lo bello et al., 2019).

Der Halbleiterhersteller Kalray produziert insbesondere Manycore-Prozessoren für den Automobilsektor. Die MPAA-Produktfamilie nutzt eine Hardwarearchitektur, in der Kerne in Clustern operieren. Ein MPAA-256 Boston Prozessor besitzt zum Beispiel 16 Cluster mit jeweils 16 Kernen, folglich insgesamt 256 Kerne [Parallel Processing with the MPPA].

Die Multicore- und Manycore-Prozessoren sind technologisch auf die Entwicklung der zentralisierten E/E-Architektur zurück-



zuführen. Die zentralen Rechner stellen die notwendige Leistung zur Verfügung, um eine domänenübergreifende Architektur zu realisieren.

Der Trend der Automatisierung erfordert die Verarbeitung komplexer Sensordaten. Diese werden über eine Vielzahl an Sensoren aufgenommen. Beispiele hierfür sind Kameras, Radar sowie LiDAR- und Ultraschallsensoren. Klassische Hardware kann die Verarbeitung von Videoaufnahmen nicht leisten. Um dies zu ermöglichen, haben sich GPUs, die ursprünglich im PC-Consumerbereich verwurzelt sind, etabliert. Gleichzeitig ging von diesen Grafikprozessoren der Trend zu KI-Funktionen aus, inzwischen wurden dafür aber spezifische Hardwarelösungen entwickelt.

Eine Vision Processing Unit (VPU) ist ein Mikroprozessor für Maschinensehen. Diese Prozessoren sind speziell für die Benutzung mit Convolutional Neural Networks entwickelt worden und besitzen spezielle Komponenten, um direkt Videosignale von Kameras verarbeiten zu können. Eine Tensor Processing Unit (TPU) ist ein Spezialprozessor für die Anwendung bezüglich KI. Jedoch sind TPUs im Gegensatz zu VPUs nicht auf Maschinensehen beschränkt. Eine Accelerated Processing Unit (APU) ist eine Hardwarekomponente, die sowohl CPU als auch GPU vereint. Dies ist die Abbildung einer modernen PC-Architektur auf einem Chip. Die Aufgaben werden so aufgeteilt, dass jeweils CPU und GPU die für sich optimalen Aufgaben übernehmen. VPUs, TPUs und APUs werden mit weiteren Spezialprozessoren auch als xPUs bezeichnet. Weitere Vertreter dieser Kategorie sind DPUs für Deep Learning, FPU für Fließkommaberechnungen und SPUs für Videostream-Verarbeitung. NVIDIA entwickelt zudem Hardware mit Tensorcores, spezielle Kerne, die extrem schnell Multiplikatio-

nen durchführen können, allerdings unter Präzisionsverlust. Auch diese Hardware ist für Aufgaben im Bereich Künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens optimiert.

Für spezialisierte, echtzeitkritische Anwendungen im Automotive-Umfeld eignet sich die Nutzung von FPGAs und ASICs. Ein Field-Programmable Gate Array (FPGA) ist ein integrierter Schaltkreis, der mittels logischer Schaltungen programmiert werden kann. FPGAs sind grafischen Prozessoren bezüglich Schnittstellenflexibilität überlegen. Ähnlich sind anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs). Diese sind jedoch nicht programmierbar und müssen deswegen für die jeweiligen Aufgaben, zum Beispiel Edge-Training, speziell hergestellt werden. Sowohl FPGAs und ASICs erlauben die Ausführungen mit extrem geringer Latenz.

Schon heute werden FPGAs in Fahrzeugen für die Realisierung von ADAS genutzt. Zudem produziert Intel FPGAs speziell für die Nutzung in Fahrzeugen bezüglich autonomen Fahrens, In-Vehicle Experience, Functional Safety und voll-elektrischer Fahrzeuge. Auch ASICs werden schon seit längerem in Fahrzeugen eingesetzt. So zum Beispiel zum Auslösen von Airbag-Systemen. Jedoch gelten darüber hinaus ASICs besonders als Potenzialträger für KI-Anwendungen in kommenden Fahrzeuggenerationen. Die Eignung von FPGAs und ASICs für KI-Anwendungen basiert auf dem Hintergrund, dass sich das Hardware-Design dieser Chips speziell für die Anforderungen der Machine-Learning (ML)-Algorithmen, zum Beispiel performante Matrixmultiplikation, anpassen lässt (Batra et al., 2018 und Sanghavi, 2018).

Ein weiterer Trend ist Edge Computing. Der rechenintensive Teil einer IoT-Anwendung wird nicht mehr auf einen Server, zum

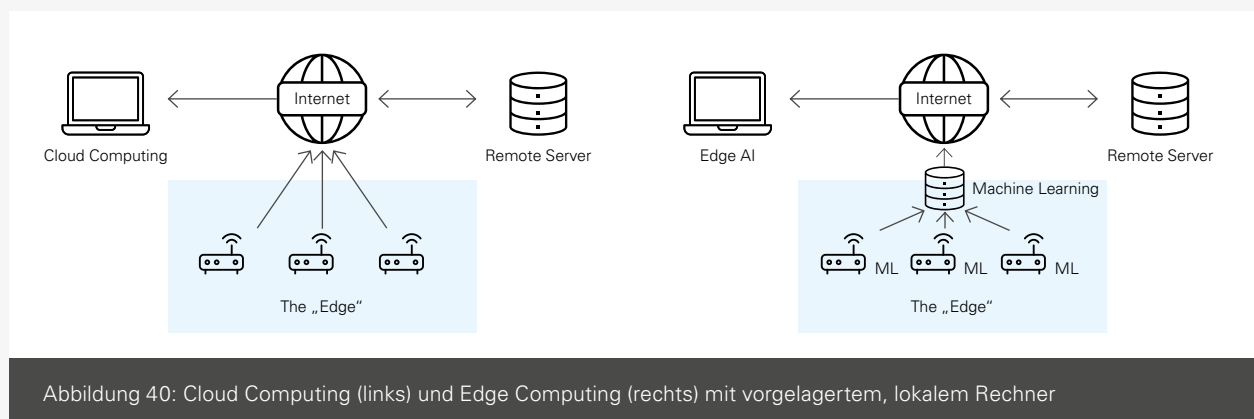


Abbildung 40: Cloud Computing (links) und Edge Computing (rechts) mit vorgelagertem, lokalem Rechner

Beispiel in einem Cloudsystem, ausgelagert. Stattdessen findet diese Berechnung nun teilweise oder ganz auf einem den IoT-Geräten vorgelagerten, lokalen Server statt. Dies kann zum Beispiel auch die lokale Ausführung von ML-Algorithmen beinhalten. Für das sogenannte Edge Computing wird von Firmen wie NVIDIA bereits spezialisierte Hardware hergestellt. Im Umfeld des Automobils bedeutet nun der Einsatz von Edge Computing und der entsprechenden Hardware vermehrt In-Car-Rechenoperationen für komplexe Anwendungen und folglich weniger Abhängigkeit von der Kommunikation mit externen Servern.

### 3.1.4 Einflüsse bezüglich Security, Safety und Trust

Im Rahmen der Automatisierung gibt der Mensch als Fahrer immer mehr Kontrolle an das Fahrzeug ab. Autonomes Fahren erfordert deshalb besonderes Vertrauen in die Fähigkeiten des Fahrzeugs. Um dieses Vertrauen bei Kunden zu schaffen, muss ein starker Fokus auf Security und Safety gelegt werden. Safety gewährleistet die Funktionalität aller notwendigen Fahrzeugfunktionen in kritischen Situationen. Security garantiert die Abschirmung des Fahrzeugs gegenüber böswilligen Cyberangriffen (Kaur, Rampersad, 2018).

Jedoch vergrößern sich die Komplexität und die Angriffsfläche durch Digitalisierung und Elektrifizierung. Um dem Kunden ein gleichbleibendes Niveau an Sicherheit bieten zu können, muss sich der Fokus auf Security und Safety intensivieren.

Allerdings werden während des Designs von cyberphysischen Systemen oft Sicherheitsaspekte vernachlässigt, da das System fälschlicherweise als physikalisch isoliert betrachtet wird. Ein Paradigma, das bereits jetzt durch die aktuellen Auswirkungen der Megatrends als gebrochen gilt. Im Widerspruch dazu sind die einzigen Maßnahmen oft physischer Natur (zum Beispiel Türschlösser oder Lenkradschlösser). Ein Beispiel sind klassische CANs Netzwerke, die grundsätzlich angreifbar sind, da ihre Sicherheit ausschließlich auf der Isolationsannahme beruht.

Als Konsequenz müssen schon während des Fahrzeugdesigns physikalische und digitale Sicherheitsaspekte beachtet werden. Insbesondere die digitalen Sicherheitsaspekte bezüglich Security und Safety sind eine Herausforderung für die kommenden Fahrzeuggenerationen. An den Systemgrenzen zu Commercial-off-the-Shelf(COTS)-Software und Diensten von Drittanbietern führen inkompatible Sicherheitsannahmen zu



Quelle: Kaur, Rampersad, 2018

gravierenden Anfälligkeiten. Die sichere Integration solcher externen Komponenten muss also gewährleistet werden können.

Als Folge sollten Systeme je nach Kritikalität unterteilt werden: Kritische und unkritische Systeme sollten so stark wie möglich voneinander gekapselt werden, was die Angriffsfläche der kritischen Systeme stark verringert (Humayed et al., 2017).

Ein Beispiel einer solchen Trennung ist die Verwendung von separaten CANs Netzwerken für verschiedene kritische Subsysteme in Fahrzeugen (Miller, Valasek, 2014). Diese Aspekte werden bereits von aktuellen Standards, wie zum Beispiel ISO 26262 für Functional Safety, abgedeckt. Allerdings besteht auch hier noch deutlich ungenutztes Potenzial.

### 3.1.5 Sonstige Einflüsse

Neben den technischen Aspekten verändern die Megatrends noch viele anderen Charakteristika von Fahrzeugen, aber auch die Automobilindustrie selbst.

Im Kontext dieses Themenpapiers sind besonders zwei dieser Aspekte nennenswert:

**Vor allem die Digitalisierung, aber auch die Elektrifizierung lassen die Grenzen der Automobilindustrie verschwimmen.**

Dafür gibt es verschiedene Gründe. Die Wertschöpfungskette verlängert sich hin zu bisher weniger relevanten Bereichen, zum Beispiel der Batteriezellfertigung. Zudem öffnen sich die Grenzen der Automobilindustrie zu bisher fahrzeugfremden Industrien, zum Beispiel zur klassischen Softwarebranche. Als Konsequenz dieser verschwommenen Grenzen dringen nun auch bisher nicht in der Automobilindustrie verortete Player, wie zum Beispiel die Technologieunternehmen Google oder Apple, in das Ökosystem Automobil ein. Traditionelle Hersteller müssen in diesen Bereichen nun direkt mit diesen Akteuren konkurrieren, haben allerdings im Bereich Software und IT deutlich weniger Kompetenzen. Besonders für die traditionellen OEMs ist hier die Herausforderung gegeben, sich in den neuen Bereichen zu bewähren (Gimpel, Röglinger, 2015).

**Weiterhin findet ein Wandel der Kundenpräferenzen statt. Während in der Vergangenheit Autobesitz im Fokus stand, weicht dies nun dem Bedürfnis nach flexibleren Lösungen für individuelle Mobilität.**

Carsharing als MaaS ist nur ein Beispiel, wie mit dieser Veränderung umgegangen werden kann. Eine weitere Veränderung sind die Anforderungen an das Fahrzeug selbst. Klassische Qualitätsmerkmale wie Motorisierung und Luxusausstattung weichen digitalen Features und funktionalen Merkmalen. Besonders stark ist diese Entwicklung in urbanen Gebieten, jedoch lässt sich diese Entwicklung zukünftig auch in ländlicheren Gebieten nicht ausschließen (Siemssen, Hahn, 2015).

### 3.1.6 Trends aus anderen Branchen und Adaptierbarkeit auf Automobilindustrie

Die Digitalisierung ist zum Treiber von Innovationen im Fahrzeugbereich geworden. Dadurch haben sich die Entwicklungsaufwände in den Bereich der Elektronik und Software verschoben.

**Das traditionelle Verständnis eines Automobilbauers als Entwicklungs- und Produktionsbetrieb wird abgelöst durch das Bedürfnis, die Softwareentwicklung und damit den innovationsintensivsten Bereich selbst zu beherrschen.**

Hier stehen OEMs und Zulieferer in Konkurrenz zur IT-Branche, deren Unternehmen über wesentlich mehr Erfahrung in der Softwareentwicklung verfügen. In diesem Bereich haben sich

über die Jahre Techniken und Infrastruktur entwickelt, deren Einsatz im Fahrzeug möglich und von wirtschaftlichem Interesse ist.

#### ■ Consumer Electronic: Dienste/Services

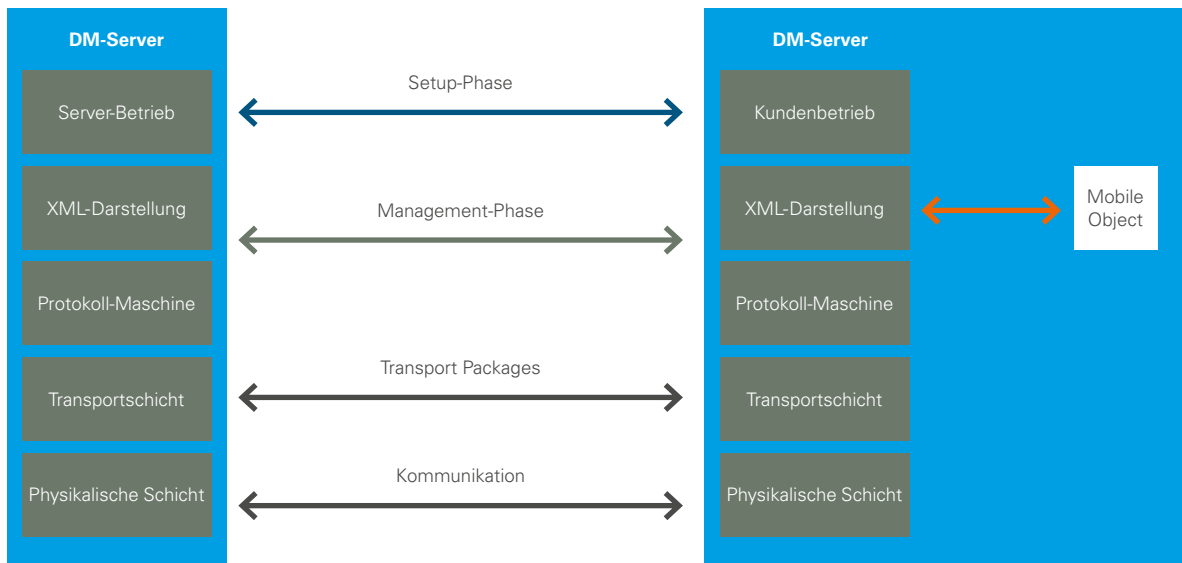
Regelmäßige OTA-Updates sind seit mehreren Jahren Bestandteil der Lebenszyklen von PCs und mobilen Geräten.

Für mobile Geräte wie Smartphones oder Tablets ist der meistverwendete Standard das Open Mobile Alliance (OMA) Device Management (DM). Dieses erlaubt die Realisierung von OTA-Updates zwischen DM-Server und DM-Client sowie das Management der Deployments. Kommunikation und Verwaltung werden durch das OMA-DM-Management-Protokoll über mehrere Abstraktionsebenen geregelt (siehe Abbildung 42).

OMA DM für die Realisierung von OTA-Updates und für das Management der Deployments unterstützt die folgenden Funktionen/Features.

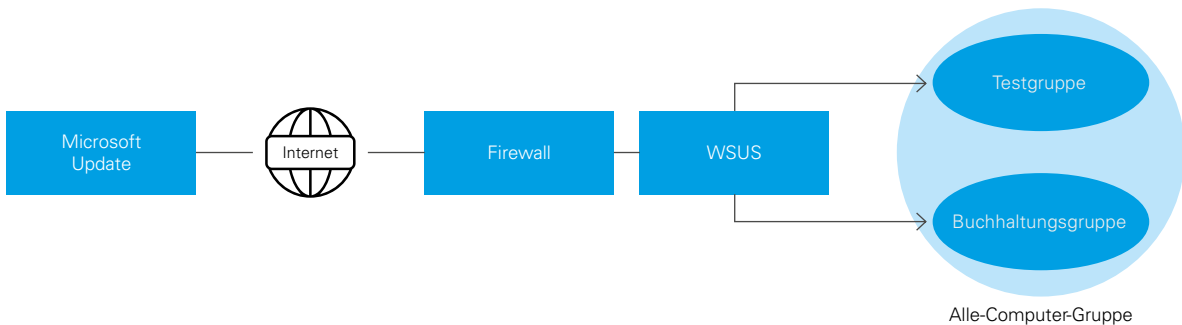
- Provisioning: Konfiguration des Gerätes
- Configuration Maintenance and Management: für die Erhaltung einer aktuellen Konfiguration
- Software Management: selektives Deployment von Softwarepackages gemäß der Gerätekonfiguration
- Fehlererkennung, Abfrage und Berichterstattung
- Nicht-Anwendungssoftware Download
- Konfiguration der Benutzerpräferenzen
- Microsoft Windows Server Update Services (WSUS)

Microsoft Windows ist das verbreitetste Betriebssystem für PCs. Microsoft führt regelmäßige Systemaktualisierungen in immer kürzeren zeitlichen Abständen über das System Microsoft Windows Server Update Services (WSUS) aus. WSUS verwaltet die Durchführung von Software-Updates über das Internet (siehe Abbildung 43). Es benutzt einen Satz von sogenannten Rules, die vom Administrator definiert werden, und ermöglicht sowohl zentrales als auch verteiltes Management der Software-Updates. Ein weiterer Trend aus anderen Branchen ist zum Beispiel die in vorangegangenen Abschnitten erläuterte Virtualisierung, die sich im Zuge des Cloud Computing etabliert hat. Cloud Computing und Virtualisierung finden sich sowohl in unterschiedlichsten Industrieanwendungen als auch im Anwendungskontext auf handelsüblichen PCs. Diese beispielhafte Aufzählung verdeutlicht die umfangreiche Übertragbarkeit von Technologiekonzepten auf verschiedenste IT-Anwendungsfelder.



Quelle: Silva et al., 2019

Abbildung 42: Standard OMA DM Management Architecture



Quelle: Microsoft, 2017

Abbildung 43: Microsoft Windows Server Update Services (WSUS)

## 3.2 Prognose

### 3.2.1 Technologische Entwicklungen und Anforderungen an Fahrzeuge und Betriebssysteme

Die Trends, die die Automobilindustrie in den letzten Jahren bestimmten und in den nächsten Jahren bestimmen werden, setzen die Randbedingungen für neue technologische Entwicklungen. Die technischen Entwicklungen sind

gebunden an die grundlegende Infrastruktur, die ein Fahrzeug bereitstellt.

Damit wird die E/E-Architektur und insbesondere die Betriebssystem-Software in Steuergeräten zur Bedingung für eine technologische Weiterentwicklung.

## **Analyse der technologischen Entwicklungen im Fahrzeug**

### **Standard-Apps**

Aus der Vielfalt an Applikationen, die von Fahrzeugeigentümern und -nutzern eingesetzt werden, ergeben sich Anforderungen an die Standardisierung von Schnittstellen, die diese Applikationen nutzen. Weit verbreitete Einsatzbereiche sind Navigationssoftware, Audio- und Video-Wiedergabe, Nachrichtendienste und Stauwarnungen. Durch den Einsatz von ADAS in kommenden Automobilgenerationen verstärkt sich die Verschränkung zwischen diesen Diensten und der Fahrzeugsoftware. Die Informationen aus den Anwendungen Navigationssoftware, Nachrichtendienste und Verkehrswarnungen fließen direkt in die Algorithmen des automatisierten Fahrens ein. Die Einbindung dieser Daten in standardisierter Form stellt eine Herausforderung für zukünftige automobiler Betriebssysteme dar.

### **Integration Mobiltelefon**

Analog zu Informationsdiensten, die direkt mit der Steuerungssoftware eines Fahrzeugs interagieren, gewinnt die Integration von mobilen Endgeräten (Smartphone, Smartwatch, Laptop etc.) an Bedeutung für die Funktionalität des Infotainments. Beispielhafte zukünftige Anwendungen umfassen die nahtlose Integration von Musik-Streamingdiensten und das Arbeiten auf den Bildschirmen in einem teilautonomen Fahrzeug. Dies erfordert Anpassungen der Betriebssystemarchitektur bezüglich Konnektivität, Security und Ressourcennutzung. Gerade im Nutzungsbereich Carsharing ergeben sich neue Anwendungsbereiche. So sollen sich zwar alle autorisierten Nutzer mit einem Fahrzeug verbinden und dessen Infrastruktur nutzen können, allerdings nur in der vorgesehenen Nutzungszeit. Ebenso sollen Bezahlendienste für die Nutzung solcher Angebote über ein Smartphone erfolgen können. Gleichzeitig muss der Schutz der persönlichen Daten eines Nutzers gewahrt werden. Dies erfordert von Betriebssystemen im Fahrzeug die Integration von Rechte- und Zugriffsmanagement, Kommunikation mit dem Flottenverwalter sowie dynamische Abrechnungsmöglichkeiten (Automobilwoche.de, 2020; Hoberg, 2020).

### **Security**

Durch die zunehmende Vernetzung mit externen Geräten und Backend-Diensten müssen neue Anforderungen an die informationstechnische Sicherheit von automobilen Betriebssystemen gestellt werden. Dies erfordert einerseits eine Umstrukturierung der Architektur, um inhärent mehr Sicherheit gegenüber Angriffen zu bieten, andererseits neue Entwick-

lungsmethoden und -prozesse für Software, mit deren Hilfe sichergestellt werden kann, dass zusätzliche Schnittstellen den höheren Anforderungen genügen. Dabei ist zu beachten, dass einerseits eine Öffnung des Betriebssystems gegenüber neuen Diensten notwendig ist, andererseits kritische Bereiche des Betriebssystems unberührt bleiben. So muss es einem Nutzer beispielsweise möglich sein, einen Kartenservice, für dessen Nutzung auf seinem Smartphone er bereits bezahlt, im Fahrzeug weiter zu nutzen. Im Gegenzug muss jedoch trotzdem das Einspielen von gefälschten Kartendaten durch bösartige Software verhindert werden.

### **Car2X-Unterstützung**

Zusätzlich zur Kommunikation mit Geräten des Fahrzeugnutzers werden in Zukunft die Verbindungen eines Autos zur Umwelt zunehmen. Die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur, bspw. für Valet Parking freigegebenen Parkhäusern, bringt jedoch neue Herausforderungen hervor. Ein wichtiger Aspekt ist hier das gegenseitige Vertrauen. Daten, die aus einer externen Quelle zugeführt und zur Fahrzeugsteuerung verwendet werden, müssen auf ihre Authentizität und Integrität geprüft werden. Ein zukünftiges Betriebssystem muss für diese dynamisch entstehenden Verbindungen zu Außenwelt Prüfmechanismen bereithalten und diese Verbindungen schnell und ressourceneffizient verwalten.

### **Mixed Criticality**

Die Kombination von Infotainment und autonomen Fahrfunktionen erfordert, dass die Ausführung von Aufgaben im Fahrzeug hierarchisch geregelt wird. Applikationen, die für die Fahrzeugsicherheit relevant sind, müssen vorrangig abgearbeitet werden, während Komfortfunktionen für den Fahrer bzw. Mitfahrer an hinterer Stelle stehen. Auch erfordern diese unterschiedlichen Aufgaben jeweils ein eigenes Level an Echtzeitfähigkeit. Während die Lokalisierung des Fahrzeugs in seiner Umgebung beispielsweise im Millisekunden-Takt erfolgen muss, kann die Berücksichtigung der Wettervorhersage im Minutentakt durchgeführt werden. Diese beiden Dimensionen, Zeit und Priorität, sollten von einem Betriebssystem automatisch übernommen werden. Außerdem müssen geeignete Rückfallebenen für Ausfälle oder Softwarefehler bereitstehen. Neue Dienste müssen automatisch in das bestehende System integriert werden, ohne dass es zu Fehlern oder Beeinträchtigungen im Nutzererlebnis kommt.

### **Heterogene Rechnerplattformen**

Die Integration von ADAS in Fahrzeuge erfordert wesentlich

höhere Rechenleistungen an Bord eines Autos, als dies bisher der Fall war. Vor allem in Bezug auf im Betrieb nachgeladene Funktionen müssen erhebliche Reserven an Rechenleistung, Speicher etc. vorgehalten werden. Vor allem in Bezug auf batterieelektrische Fahrzeuge ist der Energieverbrauch dieser Systeme eine wichtige Größe. Der Energiebedarf von solchen Rechnersystemen erreicht ohne Weiteres Größenordnungen von ein bis zwei Kilowatt. Dies entspricht bis zu 20 % des Gesamtenergiebedarfs eines batterieelektrischen Fahrzeugs. Um diese Problematik zu adressieren, nimmt die Vielfalt an Prozessorarchitekturen, die auf einen bestimmten Anwendungszweck optimiert sind, beständig zu. Zu den bereits im Einsatz befindlichen digitalen Signalprozessoren (DSP) kommen programmierbare Hardware in FPGA und speziell für die Berechnung von neuronalen Netzen optimierte Recheneinheiten wie beispielsweise die TPU hinzu. Die unterschiedliche Rechenarchitektur dieser Prozessoren muss durch das Betriebssystem effizient und sicher gehandhabt werden. Dies verschärft auch die Notwendigkeit für komplexe Algorithmen zur Einhaltung von Echtzeitbedingungen und Fehlererkennung bzw. -behebung (Hawkins, 2017).

### **OTA**

OTA-Updates zählen mittlerweile als eine Kerneigenschaft moderner Fahrzeuge: Sie erlauben nicht nur eine kostengünstige Fehlerbehebung ohne Werkstattbesuch, sondern auch die flexible Erweiterung des Funktionsumfangs der Fahrzeuge entlang ihrer Lebenszyklen. Mehrere OEMs bieten heute schon verschiedene Systeme für OTA-Updates (vgl. Kapitel 1.3), jedoch ist diese Fähigkeit meistens nur auf nicht safety-kritische Funktionen begrenzt. Zukünftige E/E-Architekturen und die darin integrierten Betriebssysteme sollen die Aktualisierung der Steuergerätesoftware in einer effizienten Art und Weise erlauben. Dabei sollen sowohl Softwareapplikationen als auch Teile und Module des Betriebssystems remote aktualisierbar sein. Um die Herausforderungen von OTA-Updates, vor allem die erheblichen Testaufwände, den Varianten- und Konfigurationsreichtum sowie die Security-Risiken, zu beherrschen, ist eine Standardisierung der technischen Lösungen dringend notwendig. Dies stellt eine notwendige Bedingung dar, um Regulierungen wie die UNECE WP.29 einhalten zu können. Einheitliche Anforderungen und Lösungen würden außerdem die Kooperation zwischen OEMs, Zulieferern und Drittanbietern in einem IT-Ökosystem vereinfachen.

### **Abgeleitete Anforderungen an Betriebssysteme**

Aus den oben genannten technologischen Entwicklungen ergeben sich Anforderungen sowohl an die Betriebssysteme,

die in einem Fahrzeug zum Einsatz kommen, als auch an die zugrundeliegenden Entwicklungsprozesse und -methoden. Die Anforderungen an Betriebssysteme lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

#### **Flexibilität**

Ein Betriebssystem muss flexibel in den Dimensionen Zeit, Kritikalität und Plattform sein. In der Dimension Zeit heißt dies, dass Ausführungszeiten und Echtzeitanforderungen von Applikationen dynamisch festgelegt werden können und Rechenzeit abhängig von dieser Festlegung verteilt wird. In Bezug auf die Kritikalität muss analog zurzeit eine Vielzahl an Kritikalitätsebenen existieren, denen Anwendungen dynamisch zugeordnet werden können. Außerdem sollte ein Betriebssystem möglichst plattformunabhängig sein und damit unterschiedliche Prozessorarchitekturen, Bussysteme und vor allem Co-Prozessoren und Peripheriegeräte unterstützen.

#### **Updatebarkeit**

Automobile Betriebssysteme und die auf ihnen ausgeführten Anwendungen werden in Zukunft immer kürzeren Entwicklungszyklen unterliegen. Da die zugrundeliegende Hardware durch Bestrebungen zur Nachhaltigkeit von Produktion und durch die zunehmende Langlebigkeit von Fahrzeugen unabhängig von der Software altert und entwickelt wird, ist es notwendig, Software zur Lebenszeit eines Fahrzeugs zu aktualisieren. Dies gilt sowohl für Anwendungen auf Applikationsebene als auch für Basisdienste, die im Betriebssystemkern implementiert sind.

#### **Schnittstellen-Offenheit**

In zweierlei Hinsicht ist es notwendig, dass Betriebssysteme offene und für Drittparteien zugängliche Schnittstellen haben. Auf der einen Seite wird der Markt an Applikationen, die durch den Nutzer nachgeladen werden, zunehmen. Diese Anwendungen werden analog zu Apps auf einem Smartphone mit der Basissoftware interagieren und deren Ressourcen und Informationen nutzen. Zusätzlich dazu wird durch die Vernetzung der Fahrzeuge mit Mobilgeräten, Backend und Infrastruktur (Car2X, V2X) die Forderung nach offenen Kommunikationsschnittstellen zunehmen. Dadurch, dass hier mehrere Hersteller miteinander interagieren, ist es notwendig, dass die Verbindung von Geräten nahtlos und sicher funktioniert.

#### **Sicherheit**

Angesichts der Megatrends automatisiertes Fahren und Vernetzung gewinnt Sicherheit im doppelten Wortsinn an Bedeutung. In Bezug auf die Betriebssicherheit (Safety) ist es not-

wendig, dass ein Fahrzeug im Betrieb sicherstellen kann, dass alle relevanten Steuergrößen sich jederzeit im sicheren Bereich bewegen. Dazu muss eine Fehlererkennung und -korrektur von Berechnungen, vor allem durch Algorithmen des automatisierten Fahrens, auf Betriebssystem-Ebene verankert sein. Nur so lassen sich die im Entwicklungsprozess festgelegten Sicherheitsziele auch bei sich ändernder Softwarekonfiguration und bei alternden Sensoren und Aktuatoren erreichen. Außerdem wird durch die zunehmende Vernetzung mit Geräten in der Umgebung, die potenziell ein Risiko in Bezug auf Datenmanipulation darstellen, ein Fokus auf die informationstechnische Sicherheit (Security) notwendig. Dazu muss ein geeignetes Rechte-, Rollen- und Datenmodell integraler Bestandteil des Betriebssystems werden. Auch ist es erstrebenswert, dass große Teile des Betriebssystem-Codes quelloffen sind, um die unabhängige Überprüfung von sicherheitsrelevanten Quellcode-Teilen zu ermöglichen.

### 3.2.2 Möglichkeiten zur Erweiterung traditioneller Geschäftsmodelle der Automobilindustrie

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Entwicklungen und Trends ermöglichen neue Umsatzquellen für Automobilhersteller. Da die Absatzzahlen für neue Fahrzeuge besonders in Europa und den USA stagnieren bzw. sinken, sind zusätzliche Geschäftsmodelle bedeutend für die Profitabilität.

Neben den klassischen Erlösen aus Fahrzeug- und Gebrauchtwagenverkäufen sowie Aftersales-Umsätzen gibt es weitere Szenarien (Abbildung 44). Wenn der Trend vom Besitz zur geteilten Nutzung geht, gibt es die Möglichkeit, über Abonnement-Modelle Umsätze zu generieren. Zudem sind Mobilitäts-services wie Carsharing oder multimodale Plattformen Modelle, die von OEMs gewinnbringend implementiert werden können.

Das Auto als Plattform für Umsatzpotenziale zu nutzen, ist bisher nicht verbreitet. In einem solchen Geschäftsmodell würde über den Verkauf von Fahrzeugdaten oder Nutzerdaten an weitere Marktteilnehmer Umsatz generiert werden. Darüber hinaus bestünde die Möglichkeit, Zugang zum Nutzer oder zur Fahrzeugplattform an Drittanbieter zu verkaufen. Dies kann beispielsweise als Kanal für personalisierte Werbung oder etwa der Bereitstellung von Informationen und Services dienen. Denkbar sind beispielsweise auch Streamingdienste für Serien und Filme, die fahrerindividuell im Fahrzeug integriert werden

(abhängig davon, welche Plattform dieser bereits nutzt). Zudem können Modelle des wertschöpfenden Serviceverkaufs realisiert werden, was bedeutet, dass etwa zusätzliche Fahrleistung oder Klimafunktionalitäten on demand für eine gewisse Zeit zugekauft und installiert werden könnten.

Weitere Potenziale, die über Datenanalyse möglich sind, wären z. B.:

- Überwachung des Gesundheitszustands eines Fahrers bzw. der Insassen
- Verkehrsmanagement, Verkehrsplanung
- Mautmodelle (Pay-per-use)
- automatische Wartungs- und Instandhaltungstermine
- Flottenmanagement
- Optimierung von Ladenetzen und Infrastruktur
- personalisierte Verträge

Insgesamt gibt es diverse potenzielle Abnehmer für Daten aus dem Fahrzeug. Neben Versicherungsgesellschaften und dem öffentlichen Sektor, die die Daten für bessere Leistungs- bzw. Infrastrukturangebote nutzen könnten, gäbe es auch die Möglichkeit, über solche Daten Betrugsfälle oder Verkehrsverstöße zu ermitteln. Dies verdeutlicht das Konfliktpotenzial, das die Nutzung und Veräußerung von Fahrzeug- und Nutzerdaten zwischen den Parteien auslösen kann (Schiller et al., 2020).

In einer empirischen Studie innerhalb der deutschen Automobilindustrie (Guissouma et al., 2018) wurde der aktuelle Stand des Release- und Konfigurationsmanagements mit Fokus auf Software-Updates erfasst. Es wurde prognostiziert, dass eine deutliche Erhöhung der Frequenz von Software-Updates in den nächsten Jahren zu erwarten ist.

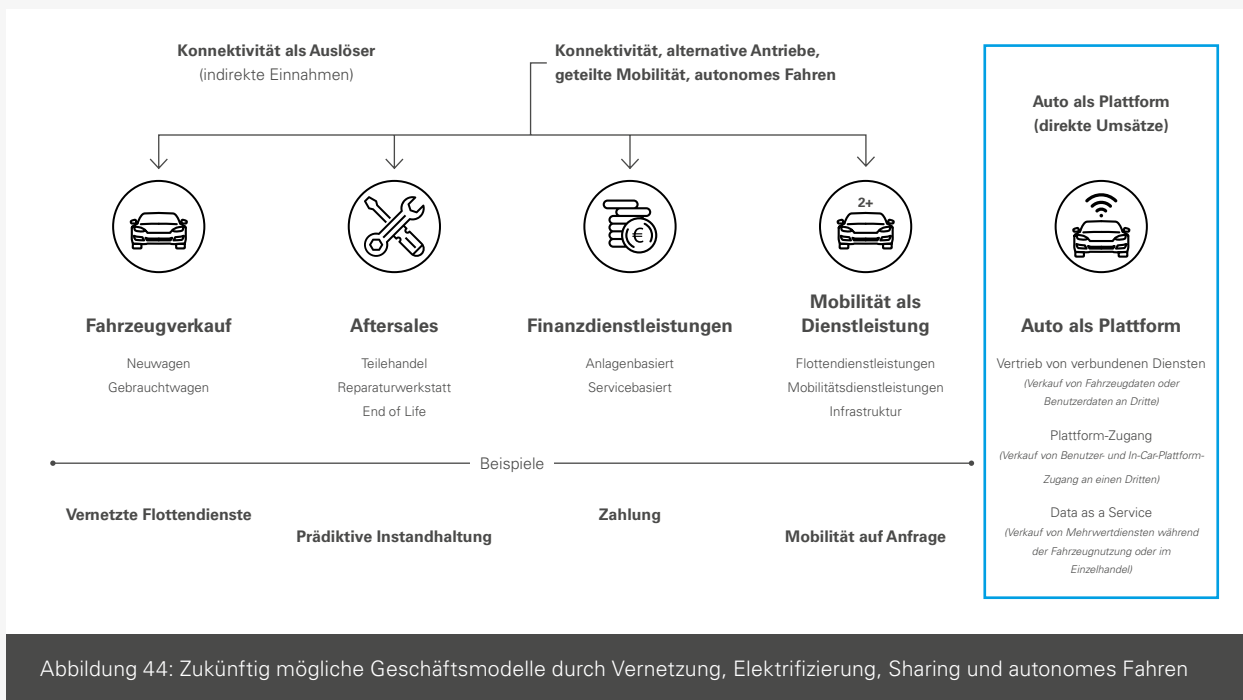


Abbildung 44: Zukünftig mögliche Geschäftsmodelle durch Vernetzung, Elektrifizierung, Sharing und autonomes Fahren

Die häufigsten Gründe für die Durchführung von Updates sind Bugfixes, wie in Abbildung 46 dargestellt (88 % der Umfrageteilnehmer), und eine Erweiterung der Funktionalität („Funktionshub“). Andere Gründe sind eine Kostenoptimierung durch

beispielsweise die Entwicklung effizienterer Software für Energiemanagement oder die Verbesserung der Bauteilverfügbarkeit durch z. B. Integration von Maßnahmen zur Verlängerung der Komponenten-Lebensdauer (siehe Abbildung 45).

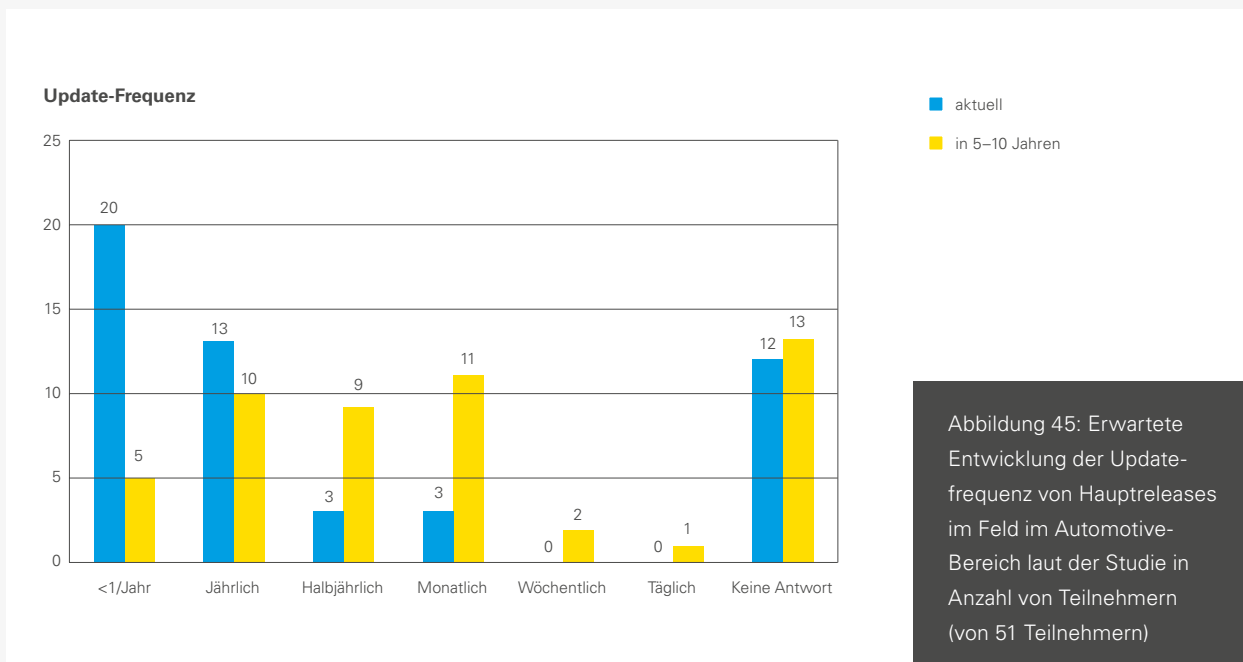
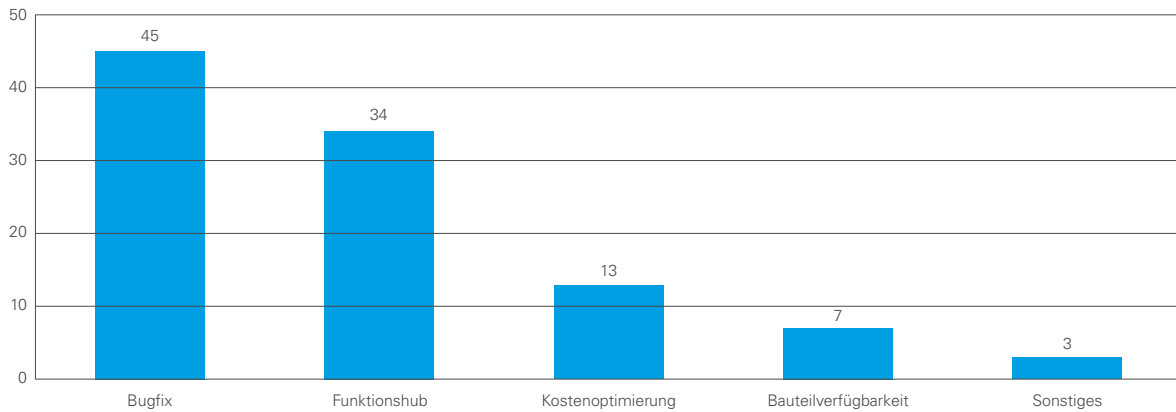


Abbildung 45: Erwartete Entwicklung der Updatefrequenz von Hauptreleases im Feld im Automotive-Bereich laut der Studie in Anzahl von Teilnehmern (von 51 Teilnehmern)



Gründe für Updates (Mehrfachauswahl möglich)



Quelle: Guissouma et al., 2018

Abbildung 46: Angegebene Gründe für die Entwicklung von Updates im Automotive-Bereich laut der Studie in Anzahl von Teilnehmern (von 51 Teilnehmern)

Damit die prognostizierten Entwicklungen realisiert werden können, sind jedoch neue Prozesse, Methoden und Tools notwendig, um die Herausforderungen zu lösen bzw. zu beherrschen.

Die entstehenden Inkonsistenzen zwischen den Modellen und den Entwicklungsartefakten wegen des existierenden Variantenreichtums (71 % der Umfrageteilnehmer), der hohen Interdisziplinarität (71 % der Umfrageteilnehmer) und der fehlenden Methoden zur Konsistenzhaltung (71 % der Umfrageteilnehmer) sind die am häufigsten genannten Herausforderungen (Guissouma et al., 2018).

**Zusätzlich sind aktuell vor allem rechtliche und zulassungsseitige Regularien Risikofaktoren, die solche Geschäftsmodelle umstritten machen.**

### 3.2.3 Bedeutung innovativer Gesamtarchitekturen als Integrationsplattform in der Automobilindustrie

Die beschriebenen Entwicklungen zeigen auf, dass die Umsätze in der Automobilindustrie künftig nicht mehr über Motoren und klassische Hardware definiert werden (siehe Abbildung

Kapitel 2, Abbildung 29). Autonomes, vernetztes Fahren verändert die Wettbewerbslandschaft in der Industrie, es kommen neue Unternehmen in den Markt und die Wertschöpfungspotenziale verändern sich.

**KI stellt Technologien vor Herausforderungen und verändert Softwarefunktionalitäten. Für die Architekturen im Fahrzeug findet ein Paradigmenwechsel statt, der hochleistungsrechnerbasierte SoA ins Automobil bringt.**

Die Trennung von Hardware und Software führt zu Systemen, die Betriebssysteme und Middleware zu differenzierenden Komponenten des Fahrzeugs machen.

Virtualisierung von Hardware, Cloud-Integration und gleichzeitig die rasante Weiterentwicklung von Sensortechnologien transformieren die Branche. Insgesamt zeigen digitale Vernetzungstechnologien also zukünftig wichtige Kompetenzen auf.

Diese technologischen Entwicklungen werden nicht vom bestehenden europäischen, deutschen oder baden-württembergischen Unternehmensumfeld abgedeckt. Die OEMs versuchen, IT-Fachkräfte in die Organisationen zu bringen, doch die Know-how-Träger sind nur begrenzt verfügbar. Die starke Zu-

lieferindustrie in Deutschland und Europa unternimmt Versuche strategischer Partnerschaften mit Technologieunternehmen weltweit. Große und mittlere Zulieferer, insbesondere in den Domänen Antriebsstrang und Interieur, verlieren über die kommenden Jahre hohe Umsätze, während Prozessspezialisten und innovative Technologieanbieter aufstrebten.

**Welche Bedeutung es für die europäische Industrie hat, an zukünftigen Entwicklungen und Potentialen zu partizipieren, wird an dieser Zahl deutlich: Etwa 3% aller Beschäftigten in der EU sind im Automobilsektor beschäftigt.**

Die vier am meisten dazu beitragenden Länder sind Tschechien, Deutschland, Ungarn und die Slowakei. Häufig werden in diesen Ländern Fahrzeuge deutscher Marken produziert.

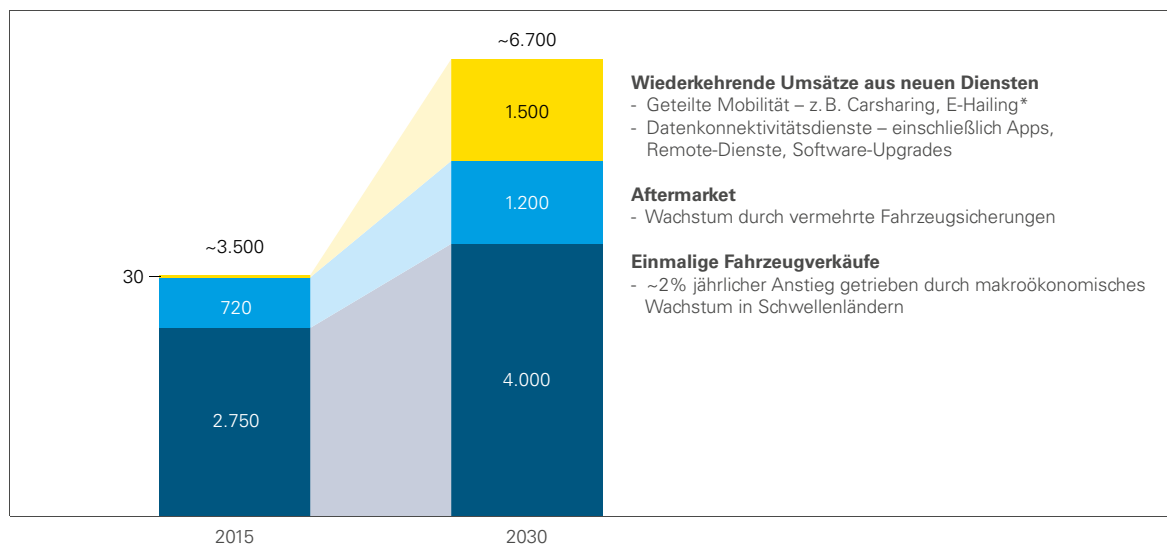
**Die deutsche Automobilindustrie ist die umsatzstärkste Branche in Deutschland und beschäftigt über 833.000 ArbeitnehmerInnen.**

Baden-Württemberg ist Deutschlands stärkste Automobilregion und die Automobilindustrie ist dort der bedeutendste Arbeitgeber (Cornet et al., 2019; e-mobil BW, 2020).

Die Verschiebung der Umsatzstruktur (Abbildung 47) durch die globalen Trends zeigt, dass 2030 knapp ein Viertel der Einnahmen über Services erzielt wird. Zudem wird der Umsatz an Fahrzeugen bis zu 50 % aus elektrifizierten Automobilen generiert.

Um diese Services in der baden-württembergischen, deutschen und europäischen Industrie zu entwickeln und damit die Beschäftigung und Wirtschaftskraft der Regionen zu sichern, ist eine Transformation unabdingbar. Die vorangegangenen Analysen zeigen auf, dass dies nur durch eine Revolution in der Gesamtarchitektur von Fahrzeugen möglich ist. Um diese Technologiekompetenzen aufzubauen, werden in den folgenden Abschnitten die bedeutendsten Maßnahmen skizziert.

**Der Einnahmepool im Automobilbereich wird sich erheblich vergrößern und in Richtung On-demand-Mobilitätsdienste und datengestützte Dienste diversifizieren.**



\*Schließt traditionelle Taxis und Vermietungen aus.

Quelle: Gao et al., 2016

Abbildung 47: Umsatz in der Automobilindustrie 2015–2030

## 4.

# Ableitung von Maßnahmen

### 4.1 Kernergebnisse der Analysen

Betriebssysteme in Fahrzeugen und eine sichere und performante E/E-Architektur bilden die Grundlage für zukünftige Automobile. Infolge der in den vorangegangenen Kapiteln angesprochenen Trends, die die Automobilindustrie bestimmen, müssen die Betriebssysteme neuen Anforderungen genügen. Auf Seiten der Softwareentwicklung erfordert dies Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in den Aufbau neuer Kompetenzen und Strukturen.

Diese Herausforderungen sind nur zu bewältigen, wenn stärker auf herstellerübergreifende Initiativen und Standards hingewirkt wird. Gleichzeitig müssen sich die Automobilhersteller in Zukunft zumindest teilweise als Softwarekonzerne begreifen.

#### 4.1.1 Entwicklungen fahrzeugeigener Betriebssysteme

Die E/E-Architekturen von Fahrzeugen sehen sich den Herausforderungen durch die Entwicklung zu automatisierten, vernetzten Fahrzeugen in einem Softwareökosystem gegenüber. Es bedarf der Transformation von dem Paradigma, dass Funktionen getrennt voneinander entwickelt werden, zu Fahrzeugarchitekturen, die ermöglichen, dass das Fahrzeug mit anderen Automobilen sowie dem gesamten Ökosystem kommuniziert.

Künftige E/E-Architekturen für vernetzte, automatisierte, elektrifizierte Fahrzeuge sind ganzheitlich zu entwickeln, dabei sind folgende Entwicklungen nach Stand der Technik erfolgversprechend:

- SoA
- zentralisierte Zonenarchitekturen
- Partitionierung über Vehicle Computers
- Virtualisierung von Hardware
- nahtlose Einbindung von Cloud-Diensten

Die Architekturentwicklung soll in Zukunft also vielschichtige Kriterien erfüllen. Die Kombination von standardisierten Architekturkomponenten, funktionaler Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie Mehrkernprozessoren und Echtzeitbedingungen stellt eine Bandbreite an zu bewältigenden Aufgaben dar.

Die Anforderungen an die Architekturen für das autonome Fahren sind deutlich vielschichtiger geworden.

Durch die Kombination von Aspekten wie Standardarchitekturen, funktionaler Sicherheit, Informationssicherheit, Mehrkernsysteme und Verfügbarkeit ist es aber möglich, zuverlässige Systeme („dependable systems“) zu entwerfen und die einzelnen Systemaspekte je nach Anwendungsfall ideal zu gewichten und zu kombinieren.

**Der Blick auf den aktuellen Stand der Betriebssystementwicklung hat gezeigt, dass trotz zunehmender Konsolidierung von Funktionalität auf einer abnehmenden Anzahl von ECUs eine komplette Vereinheitlichung der Betriebssysteme nicht möglich ist.**

Sicherheitskritische Aufgaben bedürfen dedizierter Systeme, die aufgrund ihrer beschränkten Komplexität die Möglichkeit zur Verifikation bieten. Für höhere Funktionalität, wie In-Vehicle-Infotainment, komplexe Fahrassistenzsysteme oder hochautomatisiertes Fahren, rückt vor allem der Plattformgedanke in den Vordergrund. Dabei ist ein signifikant zunehmender Einsatz linuxbasierter Betriebssysteme zu verzeichnen. Die

standardisierte Betriebssystemschnittstelle POSIX bzw. das für Echtzeitsysteme geeignete Subset PSE51 wird durchweg von allen Betriebssystemen unterstützt. PSE51 bietet allerdings nur eine sehr eingeschränkte Portabilität von Softwarekomponenten, da es zum jetzigen Zeitpunkt vor allem an einheitlichen Standards für Schnittstellen zu fahrzeugspezifischen Daten bzw. an durch andere Komponenten angebotenen Diensten fehlt. Eine über technische Aspekte hinausgehende Standardisierung vereinfacht die Entwicklung von höherwertiger Funktionalität und ist als Grundlage eines Softwareökosystems unverzichtbar. Um dem zunehmenden Wunsch nach neuer Funktionalität gerecht zu werden, ist es wichtig, externe Entwickler einzubinden. Ähnlich wie im Smartphone-Markt bedarf es standardisierter Vertriebswege für durch Dritte entwickelte Anwendungen. Die Dokumentation der Standards bzw. der notwendigen Artefakte muss Entwicklern ohne große Hürden zugänglich sein, um die Teilnahme an dem Softwareökosystem zu ermöglichen.

Im Zusammenhang mit der Einbindung von externen Anwendungen bedarf es klarer Standards bezüglich der Vertrauenswürdigkeit und entsprechend gesicherten Zugriffs auf die Ressourcen des Fahrzeugs. Virtualisierung zeigt sich bereits heute als Enabler-Technologie bei der Realisierung von Mixed-Criticality-Systemen. Durch entsprechende Hypervisoren lassen sich bereits heute sicherheitskritische parallel zu weniger kritischen Systemen betreiben. Als Reaktion auf die zunehmende Anzahl von Software-Funktionen, insbesondere durch Hochautomatisierung, wird die Skalierbarkeit der Isolationsmechanismen sichergestellt werden müssen.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt sind Unsicherheiten, die sich aus der Vielzahl von möglicherweise relevanten Patenten ergeben. Das Problem wird in dieser Form auch in der Open-Source-Gemeinschaft erkannt. Durch Konsortien wie das Open Invention Network sichern sich Firmen gegen unbe-

absichtigte Patentverletzungen in durch offene Entwicklung entstandenen Softwarebausteinen ab. Nichtsdestotrotz besteht der Bedarf, für einheitliche Ausführungsplattformen ebenfalls eine klare Patentlage zu schaffen. Weiterführende Studien sind sinnvoll, insbesondere auch im Hinblick auf Kommunikationsmiddlewares, wie z.B. ROS, sowie den allgemeinen Umgang mit Patenten in Projekten mit Open-Source-Beteiligung.

**Die Analyse der Entwicklungen von OTA-Updates hat gezeigt, dass die Updatebarkeit von ECUs eine essenzielle Eigenschaft der zukünftigen Fahrzeuge sein wird.**

Mit den kürzer werdenden Lebenszyklen der Softwarekomponenten steigt die Bedeutung der Updates als Differenzierungsmerkmal für die OEMs, indem neue innovative Funktionen regelmäßig ins Feld nachgeladen werden können.

Die Fahrzeugbetriebssysteme innerhalb der E/E-Architekturen sollen möglichst vereinheitlicht werden, damit die Updates einfacher verteilt und installiert werden können. Die bestehenden Standardisierungsarbeiten, wie z.B. die Regulierung UNECE WP.29 oder die Entwicklungspartnerschaft AUTOSAR, bieten hierfür eine erste Grundlage, die von Politik, Wissenschaft und Industrie konsolidiert und weiterentwickelt werden sollen. Die strengen Safety- und Security-Anforderungen, die mit der Einführung der OTA/SOTA-Technologie erfüllt werden müssen, bedürfen jedoch dringend neuer und erweiterter Prozesse, Methoden und Werkzeuge, die im Rahmen von Forschungsprojekten oder Industriekooperationen entwickelt werden sollen. Neue technologische Ansätze wie SoA und zentralisierte Rechnerplattformen mit aktualisierbaren Betriebssystemen und Applikationsmodulen sollen weiterverfolgt und gefördert werden, weil sie die Verwaltung und die Qualität der Updates als Services on demand verbessern.

## 4.1.2 Entwicklungen im Gesamtmarkt

Die Entwicklungen im gesamten Automobilmarkt zeigen eine eindeutige technologische Richtung auf, die alle Marktteilnehmer beeinflusst. Die deutschen OEMs sehen sich internationalen Technologieunternehmen gegenüber, die mit ihren Softwaresystemen die wertschöpfenden Anteile im Fahrzeug verändern. Es entstehen intelligente, vernetzte Fahrzeuge mit innovativen Betriebssystemen, die Branche steht jedoch vor einem ganzheitlichen Umbruch.

### OEMs müssen ihre Perspektive auf Software und Elektronik verändern.

- Die Kosten für die Entwicklung von Software und Elektronik für zukunftsfähige E/E-Architekturen und Betriebssysteme machen einen hohen Anteil der Gesamtkosten aus, daher sind für Basiskomponenten Partnerschaften mit Lieferanten, die die Kompetenzen vorweisen, einzugehen.
- OEMs müssen verstärkt Fachkräfte mit Software- und IT-Kompetenzen akquirieren und ihre Unternehmen für diese Talente interessant machen.
- Die Organisationsstrukturen sollten entsprechend der veränderten, kontinuierlichen Entwicklungsprozesse gestaltet werden. Dabei gilt es, insbesondere bestehende funktionale Silo-Strukturen aufzulösen.
- Langfristig sollten die Kompetenzen in den Unternehmen auch auf das gesamte Mobilitätssystem ausgeweitet werden, um Cloud Computing und KI-Expertise aufzubauen.

Die Automobilindustrie umfasst heute und in Zukunft neben OEMs leistungsstarke Lieferanten und junge Start-up-Unternehmen. Kooperativ können diese Unternehmen ihre Expertise nutzen, um gesamtheitliche Lösungen für vernetzte Fahrzeuge zu entwickeln. Dabei sind insbesondere eine lösungsoffene Zusammenarbeit und eine flexible Kultur zu etablieren, um innovative Ideen hervorbringen zu können.

**Den Chancen stehen hoher Kostendruck und eine kritische Gesellschaft gegenüber. Dies bedingt eine politische Förderkultur, die Verbraucher einbezieht und ihnen die Zukunftsfähigkeit der innovativen Technologien erklärt, damit sie bereit sind, an der Markttransformation zu partizipieren.**

Gleichzeitig muss Investition in Forschung getätigt werden, die neue Wege einschlägt und auch fiskalisch und regulatorisch von schnellen Entscheidungen gestützt wird.

## 4.1.3 Trends und Prognosen für die Automobilindustrie

Die Software übernimmt im Fahrzeug immer mehr und immer komplexere Aufgaben. Diese Komplexität zu beherrschen, ist die primäre Aufgabe der nächsten Jahre. Die prägenden Trends im Bereich Software sind Dienstorientierung, Open Source und Connectivity.

Im Bereich Hardware müssen in Zukunft heterogene Hardwarearchitekturen unterstützt werden. Spezialprozessoren für autonomes Fahren und KI finden immer mehr Einsatz. Separate Steuergeräte weichen zentralen High-Performance-Computern.

Security und Safety sind Voraussetzungen für das Vertrauen in Funktionalitäten wie autonomes Fahren. Gleichzeitig bieten moderne Fahrzeuge eine erhöhte Angriffsfläche durch Vernetzung und Schnittstellenkonflikte. Security by Design und Safety by Design müssen nun umso stärker im Fokus der Fahrzeugentwicklung stehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Megatrends Digitalisierung, Automatisierung und Elektrifizierung die kommenden Fahrzeuggenerationen erheblich prägen werden. Kompetenzen für die Schlüsseltechnologien sind folglich maßgebend für die Automobilindustrie.

## 4.2 Handlungsoptionen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Entwicklungen sind nur mit entsprechenden Innovationen und Förderungen leistbar. Im Folgenden werden daher Empfehlungen für politische Maßnahmen formuliert, die die Automobilbranche in Baden-Württemberg, Deutschland und Europa bei der gesamtheitlichen Transformation unterstützen können. Dabei ist es wichtig operative, taktische und strategische Handlungen einzuleiten, um gesamtheitlichen und nachhaltigen Erfolg zu garantieren. Die in Kapitel 2 formulierten Chancen stellen dabei mögliche Wegweiser für Förderungsschwerpunkte dar (Abbildung 37).

Ergebnisoffene Initiativen, um innovative „out-of-the-box“ Ansätze zuzulassen, stellen einen Ansatz dar, der die Kooperation unterschiedlichster Politik-, Industrie- und Wissenschaftspart-

ner stärken kann. Neue Kooperationsnetze können auch über Landes- und Bundesgrenzen hinweg entstehen, um die weiteren Chancen zu erschließen. Um technologische Fortschritte zu unterstützen, sind dabei neben der Grundlagenforschung für Schlüsseltechnologien auch kurz- und mittelfristig Projekte denkbar, deren Ziel evolutionäre Technologieverbesserung oder prozessuales Vorankommen sowie Methodenentwicklung einschließen. Die Inhaltsschwerpunkte dieser Kooperationsinitiativen lassen sich entsprechend an den weiteren potenziellen Erfolgsfaktoren ausrichten.

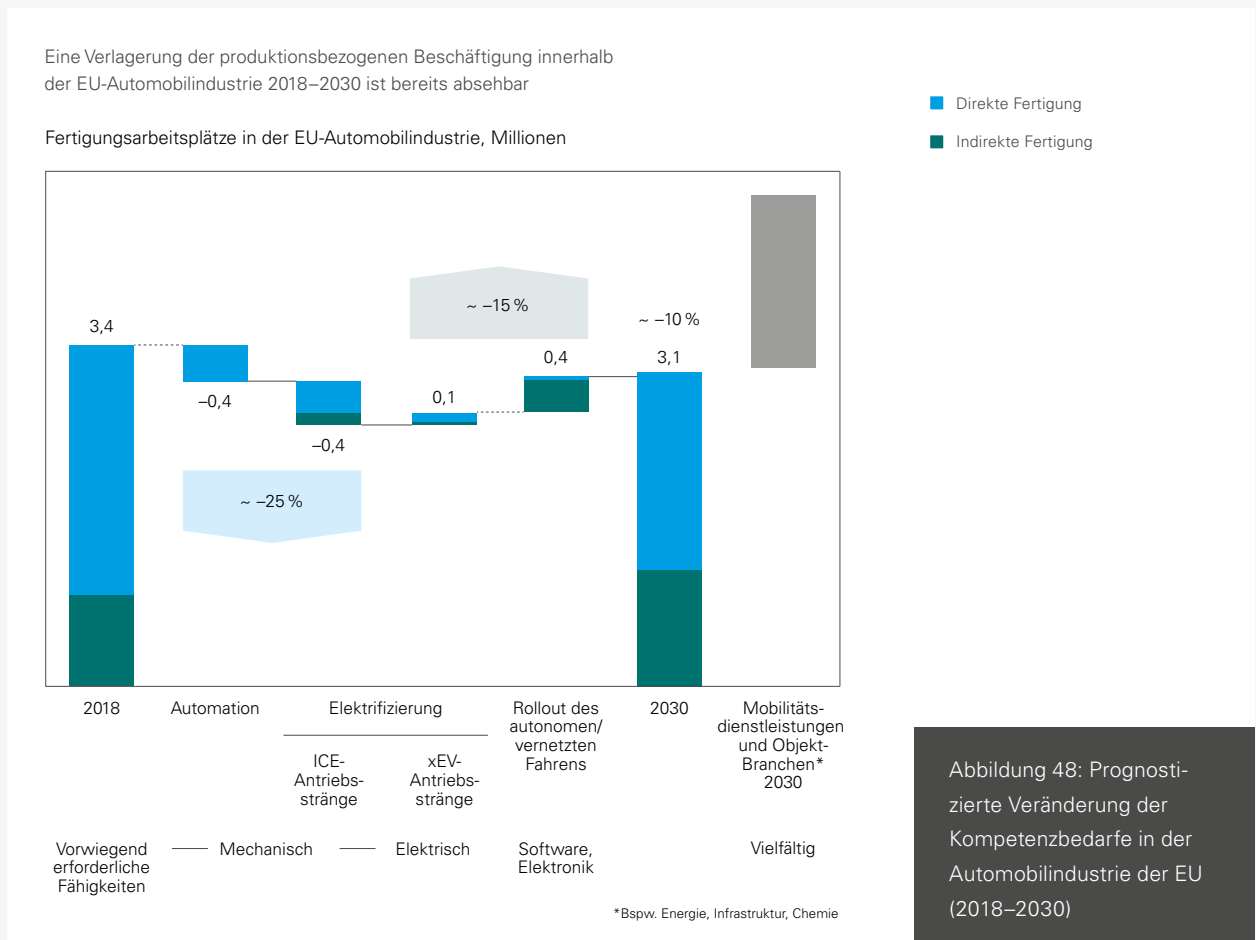
**Einheitliche Standards und rechtliche Vorgaben können einen Wettbewerbsvorteil darstellen, um Innovationen und deren breitentaugliche Anwendung zu ermöglichen.**

Neben Testbedingungen für autonome Fahrzeuge oder Datenverwendungsmöglichkeiten sind hier auch sicherheitsrelevante Standards und technische Normen ein Ansatzpunkt. Einheit-

liche Regelungen von Maßnahmen zur Erreichung der klimapolitischen Vorgaben und die entsprechende Ausrichtung verkehrsrechtlicher Steuerungsinstrumente ermöglichen der Automobilindustrie eine langfristige Planungsperspektive hinsichtlich ihrer Entwicklungsbestrebungen.

**Über Investition in Verkehrsinfrastruktur und Mobilfunknetze kann ein intelligentes, multimodales Mobilitätssystem geschaffen werden.**

Diese Möglichkeit kann als Chance für die Automobilindustrie begriffen werden. Die Vernetzung der Softwareplattformen von Fahrzeugen und weiteren Mobilitätsdiensten ist ein Ansatzpunkt, um Multimodalität verstärkt zu ermöglichen und damit die Diversität und Breite des Verkehrsökosystems auszunutzen. Der Ausbau des Breitband-Mobilfunknetzes in Deutschland ist für diese Maßnahmen eine operative Maßnahme. Mittel- und langfristig sollte flächendeckendes Breitbandnetz angestrebt werden.



**Deutschland gilt als Pionier der traditionellen Automobilbranche, dieser Status kann unter anderem über eine Fokussierung von Zukunftstechnologien in der Qualifizierung von Fachkräften neu begründet werden.**

Die Voraussetzung dafür sind die entsprechenden Fachkräfte. Die in Europa ausgebildeten, bestehenden Fachkräfte mit der entscheidenden technischen Expertise, sollten kurzfristig durch entsprechend attraktive Arbeitsangebote im Markt gehalten werden. Dafür kann es hilfreich sein, sich als Arbeitgeber entsprechend als zukunftsorientiertes und innovatives Unternehmen mit attraktiven Arbeitsbedingungen zu positionieren. Beispielsweise kann durch entsprechende Standortwahl im städtischen Raum ein Anziehungsfaktor für junge und engagierte Arbeitskräfte geschaffen werden (Zimmermann, 2019). Um akut bestehenden Mangel an Fachkräften auszugleichen, kann es ein Weg sein, den Zugang zum Arbeitsmarkt für Fachkräfte aus außereuropäischen Nationen zu erleichtern. Hierbei wäre ein einheitliches, gesamteuropäisches Vorgehen denkbar.

Deutschland ist nach Einschätzung des Weltwirtschaftsforums aktuell noch besonders schwach in der IKT-Technologie und den damit verbundenen Kompetenzen der Arbeitskräfte (Schwab, 2019). Dadurch motiviert können Anpassungen im gesamten Bildungssystem in Richtung der Technologiefelder erfolgen. Die Kompetenzen können bereits früh in Schul- und Weiterbildungsinstitutionen verankert werden.

Lebenslanges Lernen ist dabei ein Konzept, das von Industrie, Bildungsinstitutionen und öffentlicher Hand in Kooperation angegangen werden kann. Kurzfristig können auf Ebene der Unternehmen Arbeitskräfte, deren Arbeitsplätze durch die Elektrifizierung und Digitalisierung bedroht sind, über Weiterbildungsangebote eine Möglichkeit bekommen, vermehrt neuartige Themen mitzugestalten. Perspektivisch kann durch entsprechende Schulungen ermöglicht werden, dass der Stand der Forschung kontinuierlich in die Entwicklungsabteilungen der Konzerne und Zulieferer getragen wird. Langfristig sollte auf breiter gesellschaftlicher Ebene das Lebenslange Lernen vor allem darin resultieren, dass Bildung in der Gesamtbevölkerung nicht als abgeschlossenes Kapitel im frühen Erwachsenenalter betrachtet wird.

Unter diesem Gesichtspunkt bildet Baden-Württemberg ein besonders handlungsfähiges Ökosystem. Hier treffen eine leistungsstarke Automobilindustrie und deren starkes Zulieferernetzwerk auf international angesehene Spitzenforschungs-

institutionen. Dieses Potential kann in interdisziplinärer, industrieübergreifender Forschung und Weiterbildung zu den Innovationsthemen genutzt werden. Über die Kommunikation von Ergebnissen auf Bundes- und EU-Ebene kann das Wissen in die Breite getragen werden.

---

**„Für Fördermittelgeber ist es auf politischer Seite notwendig, die Zusammenhänge einzelner Projekte bewerten zu können, um auf regulatorischer Ebene damit einhergehende passende Initiativen anzustoßen. Allzu oft gewinnt man jedoch den Eindruck, dass kein vollständig einheitliches Zielbild zugrunde liegt. Natürlich ist es schwer, dieses zu finden und gemeinsam ein ‚Big Picture‘ zu zeichnen, zumal wenn, wie aktuell, finanzielle Mittel (noch) ausreichend zur Verfügung stehen und verschiedene Interessen fortlaufend Einfluss nehmen.**

**So ist es nicht selten, dass eine findige Idee fast schon im Wettbewerb zu anderen Förderebenen ausgeschrieben wird. Dabei sollten Förderprogramme auf EU-, Bundes- und Landesebene sich idealerweise ergänzen und ineinandergreifen. Gleiches gilt für die Förderstrategien unterschiedlicher Fachressorts. Durch Vernetzung und einen intensiven Austausch der in den Projekten bestehenden Herausforderungen, Ergebnisse und Erkenntnisse könnte eine gesamtheitlichere und nachhaltigere Förderpolitik entstehen. Natürlich ist das bei dem hohen Maß an Heterogenität der Fördergeber und Fördernehmer(!), geleitet durch unterschiedliche Interessen und Ziele, eine Herausforderung. Aber am Ende zählt das Ergebnis und das könnte, gerade bei in nächster Zeit knapperen Budgets, durch zielgerichtete Abstimmung und eine stärkere gemeinsame Missionsorientierung noch einmal deutlich gesteigert werden.**

**Als einen ersten Schritt empfehlen wir, für den hier behandelten Themenbereich eine Projektübersicht für Baden-Württemberg zu erstellen, die aufzeigt, an welchen konkreten Themen welche Einrichtung mit welchem Fördergeber (EU, Bund, Land) arbeitet. Die angestrebten Ergebnisse und Zwischenergebnisse darzustellen und darüber zunächst bottom-up eine Themenübersicht zu erstellen, könnte folgen.**

**Diese ‚Landkarte‘ sollte man dann als nächsten Schritt mit industriellen und politischen Zukunftsbildern abgleichen und die thematisch weißen Flecken identifizieren. In diese weißen Flecken dann in Zeiten knapper werden-**

**der Kassen gezielt zu investieren und das ‚Big Picture‘ weiterzupflegen und zu entwickeln, würde ein höheres Maß an Nachhaltigkeit ermöglichen.“** Eric Sax

---

Es ist zukünftig zentral, eine Kooperation des gesamten Fahrzeugindustrie-Ökosystems anzustreben, bei der eine flexible Projektausrichtung ermöglicht wird. Neue technologische Erkenntnisse sollten in die weitere Ausgestaltung der Zusammenarbeit und Realisierung fließen. Dies erfordert die Förderung und Bewertung von Aktivitäten in kürzeren Zyklen und Lösungsoffenheit. Ergebnisse können aber auch mittels Leistungsindikatoren eingefordert werden, um die beständige Evolution dieser Konzepte zu stimulieren.

**Tiefes Technologie- und Industrieverständnis sind im öffentlichen Bereich zu integrieren, um Chancen und Risiken der technologischen Entwicklungen abzuwägen und entsprechend zu agieren. Agile politische Entscheidungsprozesse und eine dynamische Ausrichtung der Maßnahmen können dies fördern.**

Öffentlich betriebene Infrastruktur und Transportangebote stellen einen weiteren Stellhebel auf staatlicher Ebene dar. Die Ausrichtung dieser Mobilitätssysteme muss stärker als Dienstleistung betrachtet werden. Um die Verkehrsmittel mit dem gesamten Mobilitätssystem zu vernetzen, sind Partnerschaften und Kollaborationen mit der Privatwirtschaft und Plattformanbietern entscheidend. Das Ziel sollte ein ganzheitliches Mobilitätsökosystem sein, welches über die Grenzen des öffentlichen Verkehrs hinausgeht.

**Die Transformation des Mobilitätsökosystems erfordert ein politisches Selbstverständnis als Katalysator.**

Ergebnisoffene Initiativen sind zu fördern, um innovative „Out-of-the-box“-Ansätze zuzulassen. Fortwährend sind neuartige Kooperationsnetze zu ermöglichen, diese sind nicht nur finanziell, sondern auch prüfend zu begleiten.



## Fazit

---

Fahrzeughersteller und sogar einige Tier-1 Lieferanten sind seit einigen Jahrzehnten Integratoren von zugelieferten Komponenten und Systemen. Die Nachfrage der nächsten Jahre und Jahrzehnte wird bestimmt von Diensten, digitalen Angeboten und dem Wunsch nach individuellem Komfort. Die Fahrzeuganbieter sind gefordert diese Nachfrage zu befriedigen und entsprechende Funktionalität in ihre Automobile zu integrieren.

**Die technische Fahrzeugplattform erfordert die Integration von innovativen Softwarefunktionen und Hardware-systemen. Dies bedingt eine Anpassung der unternehmensinternen Kompetenzen sowie entsprechende Entwicklungsprozesse, -methoden und -tools.**

Dies stellt eine Herausforderung dar, die gleichzeitig die Chance neuer Geschäftsmodelle und Kooperationen mit sich bringt.

Technisch sind die E/E-Architekturen von Fahrzeugen und die integrierten Hard- und Softwarebestandteile mit innovativen Betriebssystemen das Grundgerüst zukünftiger Mobilität.

**Zukünftige Architekturen zeichnen sich durch folgende Charakteristika aus:**

- Serviceorientierung ermöglicht OTA-Updates und die kontinuierliche Integration neuer Anwendungen
- Zentralisierung macht die gesamtheitliche Datenfusion und -berechnung zur Ausführung hochautomatisierter Funktionen möglich
- Virtualisierung bewältigt die voneinander unabhängige Entwicklung und Ausführung von Software- und Hardware
- Cloud-Integration schafft ein Kommunikationsnetzwerk zwischen Fahrzeugen und mit der Infrastruktur

All diese Eigenschaften erfordern eine hohe Rechenleistung, Netzwerke zur Datenübertragung in Echtzeit und umfassende Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wahrung der Privatsphäre. Diese Veränderungen werden im Marktumfeld nicht gleichzeitig und sofort umgesetzt. Etablierte OEMs tendieren heute im ersten Schritt zur Entwicklung hybrider E/E-Architektur-Lösungen, um die Anforderungen neuer Funktionalitäten unter bestehenden Limitationen sicher und effizient umsetzen zu können.

Diese veränderten Anforderungen finden in einem Umfeld statt, in dem eine erfahrene Automobilindustrie samt etablierten Zulieferernetzwerken mit dem Markteintritt aufstrebender Technologieunternehmen, Serviceanbieter und innovativer Start-ups konfrontiert ist. Im Bereich der Betriebssysteme ermöglicht dieses Marktumfeld Partnerschaften und Open-Source-Projekte für industrieweite Lösungen. Daneben sind einige OEMs bestrebt, individuelle Lösungen zu entwickeln, um ihre Kernkompetenz in der Wertschöpfungskette weiter auszubreiten.

Eine Marktanalyse zeigt, dass die in der Studie betrachteten Märkte China, USA und EU mit Fokus auf Deutschland ein unterschiedliches Spektrum an Unternehmen aufzeigen. In China und den USA dringen vermehrt Technologieunternehmen in die Automobilindustrie ein, in Deutschland sind vor allem Premium-OEMs und langjährig erfolgreiche Tier-1-Zulieferer marktbestimmend. Demgegenüber sind auch die Absatzmärkte von sehr diversen politischen, gesellschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen geprägt. Diese Faktoren bestimmen insbesondere, wo Innovationen realisiert werden. Weichenstellung der Politik, technologieunterstützende Gesetzesvorgaben und Akzeptanz in der Bevölkerung bestärken die Innovationskraft der jeweiligen lokalen Automobilindustrie.

Auf Basis dieser umfassenden Analyse, die dominante Märkte in Kombination mit branchenweiten Trends untersucht, ergeben sich wichtige Stellschrauben, die künftig relevante Geschäftsmodelle ermöglichen.

**Dieses Themenpapier identifiziert darauf basierend dringenden Handlungsbedarf, um die Automobilindustrie in Deutschland zukunftsfähig aufzustellen.**

Chancen, um nachhaltig im Markt erfolgreich zu sein, bedeuten nach vorliegender Untersuchung, dass die folgenden Maßnahmen in der Automobilindustrie anzustreben sind:

- Kooperation zwischen den OEMs, mit Forschung, Technologieunternehmen und zukünftig wichtigen Branchen
- Expansion der Geschäftsmodelle, insbesondere mit Fokus auf Services
- Veränderung der Unternehmensorganisation und interner Prozesse, Methoden, Tools sowie der Strategie
- Fokus auf Kompetenzerweiterung in Software und Elektronik

**Es wird in der Analyse deutlich, welche grundlegende Rolle die Politik in dieser Transformation spielen kann.**

Zentral konnten dabei folgende Handlungsoptionen herausgearbeitet werden:

- Definition einheitlicher Standards und rechtlicher Vorgaben, um langfristige Planungssicherheit und strategische Innovation zu fördern
- Investition in technische Infrastruktur und Mobilfunknetz zur Entwicklung eines ganzheitlichen Mobilitätsökosystems

- Erleichterung des Zugangs von Fachkräften aus außereuropäischen Nationen in den europäischen Arbeitsmarkt
- Ausrichtung des Bildungssystems von der Schule bis zur berufsbegleitenden Weiterbildung in Richtung der zukünftig entscheidenden Technologiefelder
- Förderung des lebenslangen Lernens in der Industrie

Zielgerichtete, konsequente sowie gemeinschaftliche Förderung und agile, zügige Weichenstellung sind Bedingung für einen zukunftsweisenden Wandel des Mobilitätssystems.

Politisch müssen die notwendigen Randbedingungen geschaffen werden, innerhalb derer Industrie und Forschung gemeinsam an zukunftsfähigen Lösungen arbeiten können. Aufgabe der Industrie ist es, innovative Projekte zu initiieren und notwendige Investitionen in Personal, Prozesse und Entwicklung zu tätigen. Konsequentes Vorgehen sichert die Attraktivität und Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Baden-Württemberg als wichtige Technologieregion in Europa und der Welt.

## Literaturverzeichnis

---

ABIresearch (2013). QNX and Windows Embedded Automotive Market Share to Drop to 69 % with Open Source Linux/GENIVI Grabbing 20% of Automotive OS Shipments by end of 2018. Zugriff am 08.04.2021.

Verfügbar unter <https://www.abiresearch.com/press/qnx-and-windows-embedded-automotive-market-share-t/>

Abuelsamid, S. (2020). BMW Now Has Full OTA Update Capability, Many Features Now „In-App-Purchases“.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2020/07/01/bmw-now-has-full-ota-update-capability-many-features-now-in-app-purchases/>

Alexander, M., et al. (2017). Tier-1 unter Druck Richtungs- und Rollenwechsel in der Zulieferkette. ATZelextronik (3), S. 31–35

Android Open Source Project (2020).

Automotive Android. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://source.android.com/devices/automotive>

Apex.AI (2020). Apex.OS - Safe and certified software framework for autonomous mobility systems. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.apex.ai/apex-os>

APTJ Co., Ltd. (2020). Julinar SPF. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.ap tj.co.jp/en/our-products/>

AspenCore (2019). Embedded Markets Study.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes\\_Embedded\\_2019\\_Embedded\\_Markets\\_Study.pdf](https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes_Embedded_2019_Embedded_Markets_Study.pdf)

AUBASS Co., Ltd. (2020). AUBIST Classic Platform.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.aubass.com/product/aubist\\_cp.html](https://www.aubass.com/product/aubist_cp.html)

Automobilwoche.de (2020). Apps und digitale Ökosysteme: Smartphone und Auto rücken immer näher

zusammen. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.automobilwoche.de/article/20200818/AGENTURMELDUNGEN/308189999/apps-und-digitale-oekosysteme-smartphone-und-auto-ruecken-immer-naeher-zusammen>

Automotive Grade Linux (2020a). AGL Developer Site.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://docs.automotivelinux.org/>

Automotive Grade Linux (2020b). Members.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.automotivelinux.org/about/members/>

Automotive Grade Linux (2020c). Unified Code Base.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.automotivelinux.org/software/unified-code-base/>

Automotive Grade Linux (2020d). Vendor Marketplace.

Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.automotivelinux.org/software/unified-code-base/>

Bach, J. (2018). Methoden und Ansätze für die Entwicklung und den Test prädiktiver Fahrzeugregelungsfunktionen.

Dissertation KIT, Karlsruhe

Baidu (2018). Apollo-Plattform – Github Repository.

Zugriff am 08.04.2021. Zugriff unter <https://github.com/ApolloAuto/apollo-platform>

- Baidu (2020). Apollo-Plattform. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://apollo.auto/>
- Batra, G., et al. (2018). Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies. New York: McKinsey & Company
- Becker, K. (2017). Subventionen und Kaufprämien: So fördert der Staat die Autoindustrie. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/faktenfinder/autoindustrie-subventionen-101.html>
- Bernhart, W., Riederle, S. (2019). Mobility's great leap forward – A world on the verge of autonomy. München: Roland Berger GmbH
- Beta Breakers (2017). Tesla Motors Skips Beta Test Phase of Its New Vehicle. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.betabreakers.com/tesla-motors-skips-beta-test-phase-new-vehicle/>
- Bird, C. (2017). Automotive – Software power – The state of software, apps, and services. IHS Markit, Michigan.
- Bird, C., Jullussen, E. (2015). Over-the-Air Software Updates – Improving software, reliability & innovation. IHS TECHNOLOGY | Auto Tech Report
- BlackBerry Limited (2020). QNX Automotive – Foundational software solutions for the modern vehicle. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://blackberry.qnx.com/content/dam/qnx/markets/auto/automotive-brochure.pdf>
- BMW (2020). Remote Software Upgrade & BMW Software Update. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.bmw.de/de/de/topics/service-zubehoer/bmw-connecteddrive/bmw-software-update.html>
- Bormann, R. (2018). Die Zukunft der deutschen Automobilindustrie: Transformation by Disaster oder by Design?. Bonn: Friedrich Ebert Stiftung: Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik
- Braun, L., et al. (2016) Experteninterview zur Anforderungsanalyse heutiger und zukünftiger E/E Architekturen im Kraftfahrzeug – Abschlussbericht. DOI: 10.5445/IR/1000054216
- Brock, H., Kalmbach, J. (2014). Autosar goes multi-core – the safe way. Vector Informatik GmbH
- Bucaioni, A., Pelliccione, P. (2020). Technical Architectures for Automotive Systems. IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA), S. 46–57
- Burkacky, O., et al. (2019). Automotive software and electronics 2030. McKinsey & Company
- CIAA Firmware Project (2020). Github Repository – CIAA Firmware. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://github.com/ciaa/firmware\\_v1](https://github.com/ciaa/firmware_v1)
- COMASSO e. V. (2020). COMASSO. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.comasso.org/>
- Cornet, A., et al. (2019). RACE 2050 – a vision for the European automotive industry. McKinsey & Company

Daimler AG (2020). Partnerschaftliche Entscheidung: BMW Group und Mercedes-Benz AG lassen Entwicklungs-kooperation für automatisiertes Fahren vorerst ruhen – spätere Wiederaufnahme möglich. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Partnerschaftliche-Entscheidung-BMW-Group-und-Mercedes-Benz-AG-lassen-Entwicklungskooperation-fuer-automatisiertes-Fahren-vorerst-ruhen--spaeltere-Wiederaufnahme-moeglich.xhtml?oid=46637056>

Damm, W., Heidl, P. (2019). Safety, Security, and Certifiability of Future Man-Machine Systems. Oldenburg: SafeTrans. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.safetrans-de.org/de/Uploads/AK\\_2018\\_RLE\\_CPS/SafeTRANS\\_RLE\\_CPS\\_Roadmap\\_Draft.pdf](https://www.safetrans-de.org/de/Uploads/AK_2018_RLE_CPS/SafeTRANS_RLE_CPS_Roadmap_Draft.pdf)

Deloitte (2020). 2020 Global Automotive Consumer Study – Is consumer interest in advanced automotive technologies on the move? Deloitte

Deubener, H., et al. (2019). Down but not out: How automakers can create value in an uncertain future. McKinsey & Company

Deutsches Patent- und Markenamt (2020). Autonomes Fahren, Teil 2: Recht, Ethik, Datenschutz. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.dpma.de/dpma/veroeffentlichungen/hintergrund/autonomesfahren-technik-teil1/autonomesfahren-rechtethikteil2/index.html>

Donath, A. (2020). Ex-BMW-Manager wird Volkswagens Softwarechef. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.golem.de/news/car-software-org-ex-bmw-manager-wird-volkswagens-softwarechef-2007-149679.html>

Eckardt, S. (2019). Serverkonzept von Continental in Volkswagen ID.E-Fahrzeugen. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/serverkonzept-von-continental-in-volkswagen-id-e-fahrzeugen-171068.html>

Eclipse Foundation (2019). IOT Developer Survey 2019 Results. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://iot.eclipse.org/community/resources/iot-surveys/assets/iot-developer-survey-2019.pdf>

Elektrobit Automotive GmbH (2018).

EB tresos – Customized Classic AUTOSAR solutions. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.elektrobit.com/products/ecu/technologies/autosar/>

e-mobil BW (2019). Strukturstudie BWe mobil 2019 – Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Strukturstudie2019.pdf>

e-mobil BW (2020). Datenmonitor e-mobil BW September 2020. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Broschueren/e-mobil\\_BW\\_Datenmonitor\\_September\\_2020.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Broschueren/e-mobil_BW_Datenmonitor_September_2020.pdf)

Endo, M. (2017). Toyota Activities for OSS Compliance. Open Compliance Summit. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://events.static.linuxfound.org/sites/events/files/slides/Toyota%E2%80%99s%20Activities%20for%20OSS%20Compliance\\_final.pdf](https://events.static.linuxfound.org/sites/events/files/slides/Toyota%E2%80%99s%20Activities%20for%20OSS%20Compliance_final.pdf)

Ernst & Young (2019). Top 500 F&E: Wer investiert am meisten in Innovationen? Basel: Ernst & Young Ltd

ESCRYPT GmbH (2020). escrypt – Security, Trust, Success. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.escrypt.com/de>

eSOL Co., Ltd. (2018). eMCOS AUTOSAR, an AUTOSAR-Compliant Scalable RTOS, Receives ISO 26262 Functional Safety Standard Certification at Highest ASIL D Safety Integrity Level. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.esol.com/news/news\\_59.html](https://www.esol.com/news/news_59.html)

eSync Alliance (2020). eSync Alliance Program – A Multi-Company Initiative for OTA Updates and Diagnostics. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://esyncalliance.org/>

ETAS GmbH (2020). RTA-OS. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.etas.com/en/products/rta\\_os.php](https://www.etas.com/en/products/rta_os.php)

Evidence Srl. (2020). Erika Enterprise RTOS v3. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <http://www.erika-enterprise.com/>

Excelfore (2020). Excelfore eSync SDK drives low-cost, low risk integration of OTA. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://excelfore.com/blog/excelfore-esync-sdk-drives-low-cost-low-risk-integration-of-ota/>

Fard, Z. B., Brugeman, V. S. (2019) Technology Roadmap: Intelligent Mobility Technologies. Ann Arbor, Michigan: Center for Automotive Research

Floemer, A. (2017). Mit über 50 Partnern: Baidus Apollo-Plattform will das Android für selbstfahrende Autos werden. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://t3n.de/news/baidu-apollo-android-autonomen-fahrindustrie-835914/>

Floemer, A. (2020). Mit MB.OS gegen Tesla: Daimler baut sein eigenes „Windows fürs Auto“. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://t3n.de/news/mbos-gegen-tesla-daimler-baut-1284438/>

Fluhr, D. (2015). Bitkom: Autonomes Fahren kommt gut an. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.autonomes-fahren.de/bitkom-autonomes-fahren-kommt-gut-an/>

Fox, Z. (2020). Automotive Safety and Security Requires Certification Reformation. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.embedded-computing.com/news/automotive-safety-and-security-requires-certification-reformation>

Fredriksson, G., et al. (2018). Is the European automotive industry ready for the global electric vehicle revolution? Brüssel: Bruegel Policy Contribution

Freiwald, A., Hwang, G. (2017). Safe and Secure Software Updates Over The Air for Electronic Brake Control Systems. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 10(1), S. 71–82

Gao, P., et al. (2016). Automotive revolution – perspective towards 2030. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry/de-de>

Geenen, B. (2020). 2020 Autonomous Vehicle Technology Report. Amsterdam: Wevolver

GENIVI Alliance (2020). Github Repositories GENIVI. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://github.com/GENIVI>

Gicquel, P., et al. (2017). GENIVI Reference Architecture and Compliance Specification. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://at.projects.genivi.org/wiki/display/GRK/2\\_Reference+Architecture+and+Compliance+Specification](https://at.projects.genivi.org/wiki/display/GRK/2_Reference+Architecture+and+Compliance+Specification)

Gimpel, H., Röglinger, M. (2015). Digital transformation: changes and chances--insights based on an empirical study. Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Graves, D. R. (2007). A survey of existing Linux patents. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.linux.com/news/survey-existing-linux-patents/>

Green Hills Software (2020). Green Hills Platform for Safe and Secure Automated Driving Systems. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.ghs.com/products/auto\\_adas.html](https://www.ghs.com/products/auto_adas.html)

Groupe PSA (2020). GroupePSA will power their infotainment systems with Android Automotive OS, Google's open-source platform for vehicles. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.linkedin.com/posts/groupepsa\\_groupepsa-activity-6693430212933251072--QU](https://www.linkedin.com/posts/groupepsa_groupepsa-activity-6693430212933251072--QU)

GRVA (2018). Draft Recommendation on Software Updates of the Task Force on Cyber Security and Over-the-air issues of UNECE WP.29 GRVA. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html>

Guissouma, H., et al. (2018). A generic system for automotive software over the air (sota) updates allowing efficient variant and release management. International Conference on Information Systems Architecture and Technology, Springer International Publishing, S. 78–89

Gulde, D. (2019). Sprachassistenten im Test. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.firmenauto.de/alexa-google-mbux-siri-sprach-assistenten-im-test-10756274.html>

Hansen, S., Wölbert, C. (2020). Software-Entwicklung bei VW: Weg von der Komplexität. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Software-Entwicklung-bei-VW-Weg-von-der-Komplexitaet-4886724.html>

Hawkins, A. J. (2017). Not all of our self-driving cars will be electrically powered – here’s why. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.theverge.com/2017/12/12/16748024/self-driving-electric-hybrid-ev-av-gm-ford>

Hertzke, P., et al. (2017). Dynamics in the global electric vehicle market. McKinsey & Company

Hoberg, F. (2020). Das Smartphone wird immer mehr zur Auto-Fernbedienung. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article214312882/Connected-Cars-Das-Smartphone-wird-immer-mehr-zur-Auto-Fernbedienung.html>

Hubik, F. (2019). Warum die 3D-Karten von Here für die deutschen Autobauer so wichtig sind. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/technik/digitale-revolution/digitale-revolution-warum-die-3d-karten-von-here-fuer-die-deutschen-autobauer-so-wichtig-sind/24468026.html>

Humayed, A., et al. (2017). Cyber-Physical Systems Security – A Survey. IEEE Internet of Things Journal, S. 1802–1831

Humig, C. (2020). Flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen für Upgrades über die gesamte Fahrzeuglebenszeit. ATZelextronik (5), S. 16–19

Hymel, S. (2020). What is Edge AI? Machine Learning + IoT. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.digikey.com/en/maker/projects/what-is-edge-ai-machine-learning-iot/4f655838138941138aaad62c170827af>

IoT.bzh (2015). GENIVI/Yocto/Tizen IVI gap analysis. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://wiki.automotivelinux.org/eg-gap\\_genivi\\_yocto\\_tizenivi\\_gap\\_analysis](https://wiki.automotivelinux.org/eg-gap_genivi_yocto_tizenivi_gap_analysis)

IPE Institut für Politikevaluation GmbH, fka GmbH und Roland Berger GmbH (2019). Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=16](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16)

ISO 26262 (2018). Road vehicles – Functional safety.

Jäger, R., Dawid, R. (2019). PwC Markenstudie 2019 – Marken und Markenbewertung im Zeitalter der digitalen Transformation. PwC

Janson, M. (2019). Deutsche Autobauer in den USA bei 7,8% Marktanteil. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/16297/marktanteile-von-automobilherstellern-in-den-usa/>

Kaur, K., Rampersad, G. (2018). Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. Journal of Engineering and Technology Management, S. 87–96

Klauda, M., et al. (2015). Weichenstellung für 2020 Paradigmenwechsel in der E/E-Architektur. ATZelextronik (2), S. 16–22

Knecht, J. (2018). Netzwerk Zukunft. Moove (2), S. 102–106

Kögel, M., Wolf, M. (2018). Auto update–safe and secure over-the-air (SOTA) software update for advanced driving assistance systems. Fahrerassistenzsysteme 2016, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 119–134

Köhler, T. R., Wollschläger, D. (2014). Die digitale Transformation des Automobils: 5 Mega-Trends verändern die Branche. Media-Manufaktur

KPMG (2019). 2019 Autonomous Vehicles Readiness Index. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>

Kfz-Rueckrufe.de (2020). Rückruf-Bilanz 2019: Mehr Aktionen für mehr Fahrzeuge. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.kfz-rueckrufe.de/rueckruf-bilanz-2019-mehr-aktionen-fuer-mehr-fahrzeuge/7268/>

Kugele, S., et al. (2017). On Service-Oriented Architecture for Automotive Software. IEEE International Conference on Software Architecture, S. 193–202. DOI 10.1109/ICSA.2017.20

Kuppusamy, T. K., et al. (2018). UPTANE Security and Customizability of Software Updates for Vehicles. IEEE vehicular technology magazine

La Rocco, N. (2020). Eigenes Betriebssystem: Daimler plant mit MB.OS ein „Windows fürs Auto“. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.computerbase.de/2020-05/daimler-mercedes-benz-mb.os-betriebssystem/>

Landolt, P. (2019). Huawei lanciert eigenes HarmonyOS, aber (noch) nicht für Smartphones. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://techgarage.blog/huawei-lanciert-eigenes-harmonyos-aber-noch-nicht-fuer-smartphones/>

Leicht, L. (2020). Neue Funktionen fürs Auto per Online-Update. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/bmw-os7-update/>

Leopold, G. (2018). Inside Tesla's Model 3. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.eetimes.com/inside-teslas-model-3/>

LG (2020). LG Electronics and Luxoft establish webOS auto joint venture at CES 2020. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <http://www.lgnewsroom.com/2020/01/lg-electronics-and-luxoft-establish-webos-auto-joint-venture-at-ces2020/>

Lindinger, M. (2018). Der Preis der E-Mobilität. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/wissen/forschung-politik/kostbare-rohstoffe-fuer-batterien-die-e-mobilitaet-koennte-ein-teures-unterfangen-werden-15502495.html>

Lo Bello, L., Steiner, W. (2019). A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication and Automation Systems. Proceedings of the IEEE, 107(6), S. 1094–1120

LOT Network (2020). LOT Network. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://lotnet.com/>

Macro Polo (2019). The Global AI Talent Tracker. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://macropolo.org/digital-projects/the-global-ai-talent-tracker/>

Mayer, B. (2018). Wer mit wem und wofür. Moove (3), S. 87–91

McKinsey (2016). Automotive revolution – perspective towards 2030. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry/de-de>

McKinsey (2019). China and the world: Inside the dynamics of a changing relationship. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/featured-insights/china/china-and-the-world-inside-the-dynamics-of-a-changing-relationship>

McQuat, R. (2017). Cars are Made of Code. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.nxp.com/company/blog/cars-are-made-of-code>

Meissner, F., et al. (2020). Computer on wheels/Disruption in automotive electronics and semiconductors. München: Roland Berger GmbH

Microsoft (2002). Hits the Road in BMW 7 Series. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://news.microsoft.com/2002/03/04/microsoft-technology-hits-the-road-in-bmw-7-series/>

Microsoft (2010). A Technical Companion to Windows Embedded Automotive. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [http://download.microsoft.com/download/0/A/1/0A1E07D6-7562-4566-AACF-E04DF4FF8879/A%20Technical%20Companion%20to%20Windows%20Embedded%20Automotive%207%20\(final\).pdf](http://download.microsoft.com/download/0/A/1/0A1E07D6-7562-4566-AACF-E04DF4FF8879/A%20Technical%20Companion%20to%20Windows%20Embedded%20Automotive%207%20(final).pdf)

Microsoft (2017). WSUS Deployment Scenarios. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://docs.microsoft.com/de-de/security-updates/windowsupdateservices/18127657>

Miller, C., Valasek, C. (2014). A survey of remote automotive attack surface. black hat USA, S. 94



Mittereder, M. (2018). Automated Vehicles: Legal Framework Will Decide Which Automakers Win the Race to Full Automation. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.rolandberger.com/en/Media/Automated-Vehicles-Legal-Framework-Will-Decide-Which-Automakers-Win-the-Race-to.html>

Morgan Stanley (2013). Autonomous Cars – Self-Driving the New Auto Industry Paradigm. Morgan Stanley Research Global

Morotomi, S. (2016). Japan developers want your car to run on their OS. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://asia.nikkei.com/Business/Japan-developers-want-your-car-to-run-on-their-OS>

Müschenborn, M. (2019). Vehicular RF Architecture – Managing integration of next generation automotive wireless systems. ELIV Congress

Newcomb, D. (2012). The Next Big OS War Is in Your Dashboard. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.wired.com/2012/12/automotive-os-war/>

Nilsson, D. K., Larson, U. E. (2008). Secure firmware updates over the air in intelligent vehicles. IEEE International Conference on Communications Workshops, S. 380–384

Nissan Motor Corporation (2018). Renault-Nissan-Mitsubishi and Google join forces on Next-Generation infotainment. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://global.nissannews.com/en/releases/release-860852d7040eed420ffbaebb22094eb4-180918-01-e>

NVIDIA Corporation (2018). NVIDIA Announces World's First Functionally Safe AI Self-Driving Platform. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-announces-worlds-first-functionally-safe-ai-self-driving-platform>

O'Kane, S. (2019). GM will use Google's embedded Android Automotive OS in cars starting in 2021. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.theverge.com/2019/9/5/20851021/general-motors-android-auto-google-infotainment>

Open Invention Network (2020a). Automotive. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://openinventionnetwork.com/industries/automotive/>

Open Invention Network (2020b). Linux System. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://openinventionnetwork.com/linux-system/>

Open Robotics (2020). ROS. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.ros.org/>

Patterson, A. (2017). Die Evolution von Embedded-Architekturen für die nächste Generation von Fahrzeugen. ATZelextronik (2), S. 26–33

PAX License (2020). PAX License. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <http://paxlicense.org/index.html>

Pizzuto, L., et al. (2019). How China will help fuel the revolution in autonomous vehicles. McKinsey Global Institute

PwC (2011). Automobilindustrie und Mobilität in China: Plan, Wunsch und Realität. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/automobilindustrie/assets/automobilindustrie-und-mobilitaet-in-china.pdf>

PwC (2016). Aktivitäten der Automobilbranche erreichen neuen Höchststand. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2016/m-a-aktivitaeten-der-automobilbranche-erreichen-neuen-hoehchststand.html>

PwC (2019). The 2019 Strategy & Digital Auto Report. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/insights/2019/digital-auto-report/digital-auto-report-2019.pdf>

Qualcomm (2018). China's BYD Selects Qualcomm Automotive Solutions to Help Drive Immersive, Connected and Intelligent In-Vehicle Experiences. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/01/08/chinas-byd-selects-qualcomm-automotive-solutions-help-drive-immersive>

Rassner, K. (2017). Neue Geschäftsmodelle durch Over-the-Air-Technologien. ATZelextronik (3), S. 48-53

- Real-Time Innovations (2020). Real-Time Aerospace & Defense Systems. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.rti.com/industries/aerospace-defense>
- Reid, C. (2019). Tesla Cybertruck Not Street-Legal In EU. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.forbes.com/sites/carltonreid/2019/12/16/tesla-cybertruck-not-street-legal-in-eu>
- Reif, K. (2011). Architektur elektronischer Systeme. In Autoelektrik und Autoelektronik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, S. 152–161
- Richarz, H., et al. (2019). Förderung von E-Autos: Die USA bremst. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/foerderung-von-e-autos-die-usa-bremst-a-835852/>
- Rösch, M. (2020). Chinas Megastädte. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.fuw.ch/article/chinas-megastaedte/>
- Roßmann, U. (2003). Veränderungen in den japanischen Wertschöpfungsstrukturen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag
- Routley, N. (2020). Tesla is Now the World's Most Valuable Automaker. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.visualcapitalist.com/tesla-is-now-the-worlds-most-valuable-automaker/>
- Sanghavi, A. (2018). Embedded-FPGA-IP in Automotive-Anwendungen der nächsten Generation. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.all-electronics.de/embedded-fpga-ip-automotive/3/>
- Scheid, O. (2016). automotive.wiki – AUTOSAR Tool. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://automotive.wiki/index.php/AUTOSAR\\_Tool](https://automotive.wiki/index.php/AUTOSAR_Tool)
- Scheuch, V. (2011). E/E-Architektur für batterie-elektrische Fahrzeuge. ATZechnik (6), S. 28–33
- Schiller, T. (2020). Future of Automotive Sales and Aftersales – Impact of current industry trends on OEM revenues and profits until 2035. Deloitte
- Schleicher, M., Grigorescu, S. M. (2020). Wie neuronale Netze die Entwicklung von Automobilsoftware verändern. ATZechnik (2), S. 1–2
- Schlobach, M., Retzer, S. (2018). Defining the Future of Mobility: Intelligent and Connected Vehicles (ICVs) in China and Germany. Peking: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
- Schwab, K. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. Genua: World Economic Forum
- Shahan, Z. (2020). Tesla Model 3 = 14 % of World's Electric Vehicle Sales in 2019. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://cleantechnica.com/2020/02/06/1-tesla-model-3-14-of-worlds-electric-vehicle-sales-in-2019/>
- Shepardson, D. (2018). U.S. spending plan include \$100 million for autonomous cars research, testing. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-autos-selfdriving-congress/u-s-spending-plan-include-100-million-for-autonomous-cars-research-testing-idUSKBN1GY074>
- Siemens (2020). Capital VSTAR – Streamlined ECU software development. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.mentor.com/embedded-software/autosar/softwar>
- Siemssen, S., Hahn, A. (2015). Implementing big data is the hardest part. Automotive manager report
- Silicon Valley Bank (2019). Future of Mobility: The technologies and trends driving innovation in the emerging mobility ecosystem. SVB Financial Group
- Silva, J. D., et al. (2019). Management platforms and protocols for internet of things: A survey. Sensors 2019 (3), S. 676
- Simon, Y. (2019). 100 Millionen Codezeilen: Das kann der Golf 8. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/100-millionen-codezeilen-das-kann-der-golf-8-a-824084/>

Skillicorn, N. (2019). Top 1000 companies that spend the most on Research & Development (charts and analysis). Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.ideatovalue.com/inno/nickskillicorn/2019/08/top-1000-companies-that-spend-the-most-on-research-development-charts-and-analysis/>

Statista (2019). Anzahl verkaufter Automobile nach ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2018. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/734067/umfrage/anzahl-verkaufter-automobile-nach-laendern-weltweit/>

Statista (2020a). Anteile von Staaten und Regionen an der weltweiten Pkw-Produktion im Jahr 2019. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/216467/umfrage/anteile-einzelner-staaten-und-regionen-an-der-pkw-produktion/>

Statista (2020b). Global automotive market share in 2019. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/316786/global-market-share-of-the-leading-automakers/>

Steger, M., et al. (2016). Generic framework enabling secure and efficient automotive wireless SW updates. IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), S. 1–8

Stegmaier, G. (2019). Autonomes Fahren – Eine verzweifelte Aufholjagd. Moove (3), S. 88–91

Streichert, T., Traub, M. (2012). Elektrik/Elektronik – Architekturen im Kraftfahrzeug. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Takada, H. (2012). Introduction to Automotive Embedded Systems. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://cse.buffalo.edu/~bina/cse321/fall2015/Automotive-embedded-systems.pdf>

Tanenbaum, A., Bos, H. (2015). Modern operating systems. Pearson

Tao, M. (2020). Xpeng Motor build new autonomous e-car on Nvidia computing platform. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://roboticsandautomationnews.com/2020/04/20/xpeng-motor-build-new-autonomous-e-car-on-nvidia-platform/31790/>

Tesla Inc. (2020a). Linux Source – Github Repository. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://github.com/teslamotors/linux>

Tesla Inc. (2020b). Software Updates (Tesla). Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.tesla.com/support/software-updates>

Teslascope (2020). Teslapedia Statistics – A Collection of statistics, metrics, and other interesting facts. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://teslascope.com/statistics>

The Autoware Foundation (2020). Autoware.Auto. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.autoware.auto/>

The Qt Company (2020). Qt for Automotive. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.qt.io/qt-in-automotive/>

Tizen Project (2020). Tizen Project. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.tizen.org/>

TOPPERS Project (2020). TOPPERS – Project. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.toppers.jp/project.html>

Trampoline RTOS (2020). Github Repository – Trampoline RTOS. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://github.com/TrampolineRTOS/trampoline>

Traub, M. (2019). High Performance Computing Architectures for Automotive. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.gsaglobal.org/wp-content/uploads/2019/05/HIGH-PERFORMANCE-COMPUTING-ARCHITECTURES-FOR-AUTOMOTIVE.pdf>

Traub, M., et al. (2017). Future Automotive Architecture and the Impact of IT Trends. IEEE Software (3), S. 27–32

Underwood, S. (2018). Automated, Connected, and Electric Vehicle Systems: Expert Forecast and Roadmap for Sustainable Transportation. Dearborn: Institute for Advanced Vehicle Systems University of Michigan

- Van den Bossche, A. (2020). Open Software Helps Fuel Autonomous Vehicle Innovation. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.nxp.com/company/blog/open-software-helps-fuel-autonomous-vehicle-innovation:BL-OPEN-SOFTWARE-AUTONOMOUS-VEHICLE-INNOV>
- Vector Informatik GmbH (2017). Service-oriented Architectures and Ethernet in Vehicles: Towards Data Centers on Wheels with Model-based Methods. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://assets.vector.com/cms/content/know-how/technical-articles/PREEvision/PREEvision\\_SOA\\_Ethernet\\_ElektronikAutomotive\\_201703\\_PressArticle\\_EN.pdf](https://assets.vector.com/cms/content/know-how/technical-articles/PREEvision/PREEvision_SOA_Ethernet_ElektronikAutomotive_201703_PressArticle_EN.pdf)
- Vector Informatik GmbH (2020). MICROSAR. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.vector.com/de/de/produkte/produkte-a-z/embedded-components/microsar>
- Volvo Cars (2018). Your future Volvo will burst with computing power. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://group.volvocars.com/news/future-mobility/2018/your-future-volvo-will-burst-with-computing-power>
- Volvo Cars (2014). All-new XC90 the first Volvo built on the company's new Scalable Product Architecture. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/148966/all-new-xc90-will-be-the-first-volvo-built-on-the-companys-new-scalable-product-architecture>
- W3C (2012). Recommendation – Packaged Web Apps (Widgets). Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.w3.org/TR/widgets>
- Weidemann, T. (2017). Audi und Volvo: Autohersteller setzen auf Android als Betriebssystem. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://t3n.de/news/audi-volvo-android-823121/>
- Weiss, M., Strauss, K. (2019). Selbstfahrende Autos die Datenkraken der Zukunft. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.datenschutzexperte.de/blog/datenschutz-im-alltag/selbstfahrende-autos-die-datenkraken-der-zukunft/>
- Wille, M., Krieger, O. (2017). Ethernet & Adaptive AUTOSAR Key elements of the new Volkswagen E/E architecture. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter [https://assets.vector.com/cms/content/events/2017/vAES17/vAES17\\_01\\_Ethernet-Adaptive-AUTOSAR-at-VW\\_Krieger\\_Wille.pdf](https://assets.vector.com/cms/content/events/2017/vAES17/vAES17_01_Ethernet-Adaptive-AUTOSAR-at-VW_Krieger_Wille.pdf)
- Windisch, D. A. (2019). Autonomes Fahren ist mehr als selbstfahrende Fahrzeuge... und kann nur in Kooperation gelingen. asquared GmbH
- Wonnemann, C. (2019). Security-Architekturen für Infotainment-Steuergeräte. ATZelextronik (11), S. 34–37
- Yoshida, J. (2020). BMW Unveils AV Safety Platform Architecture. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.eetasia.com/bmw-unveils-av-safety-platform-architecture/>
- Zaman, N. (2015). Automotive electronics design fundamentals. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-17584-3
- Zerfowski, D., Buttle, D. (2019). Paradigmenwechsel im Automotive-Software-Markt. ATZelextronik (09), S. 28–34
- Zerfowski, D., Crepin, J. (2019). Vehicle Computer – Automotive-Softwareentwicklung neu gedacht. ATZelextronik (07), S. 36–41
- Zerfowski, D., Lock, A. (2019). Functional architecture and E/E-Architecture – A challenge for the automotive industry. 19. Internationales Stuttgarter Symposium, Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 99–110
- Zerfowski, D., Niranjan, S. (2018). (R)Evolution der Automotive-Software-Architekturen. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.next-mobility.de/revolution-der-automotive-software-architekturen-a-766915/>
- Zhao, B. (2019). Connected Cars in China: Technology, Data Protection and Regulatory Responses. DOI: 10.1007/978-3-658-26945-6\_24
- Zimmermann, N. (2019). Here's why Silicon Valley is in California, not in Germany. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.dw.com/en/heres-why-silicon-valley-is-in-california-not-in-germany/a-49992010>
- Zwetsloot, R. (2020). China's approach to tech talent competition: policies, results, and the developing global response. Zugriff am 08.04.2021. Verfügbar unter <https://www.brookings.edu/research/chinas-approach-to-tech-talent-competition/>

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Unternehmen und Status quo sowie angestrebte Ziele hinsichtlich Architekturen, Betriebssystemen, OTA-Updates und aktuell wichtige Partnerschaften in diesem Bereich .....	16
Tabelle 2: Übersicht aktueller AUTOSAR/OSEK-OS Implementierungen .....	19
Tabelle 3: Übersicht aktueller Betriebssysteme aus dem IoT-Umfeld .....	21

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Entwicklung der E/E-Architektur von Funktionsorientierung zu fahrzeugeinheitlichen Zonenrechnern .....	9
Abbildung 2: Übersicht über Sensoren in automatisierten, vernetzten Fahrzeugen .....	10
Abbildung 3: Stand der Technik für zukünftig zu entwickelnde E/E-Architekturen .....	12
Abbildung 4: Die zukünftig neuen und veränderten Ebenen einer leistungsfähigen E/E-Architektur .....	13
Abbildung 5: VW Architektur und vw.OS nach Vorbild einer Smartphone-Architektur .....	14
Abbildung 6: Übersicht der Abstraktionsniveaus für die Betrachtung der Marktsituation .....	17
Abbildung 7: AUTOSAR Schichtenarchitektur .....	19
Abbildung 8: Ergebnisse des IoT Developer Survey, April 2019 .....	20
Abbildung 9: Prognostizierte Marktanteile der Fahrzeug-Infotainment-Betriebssysteme, Stand 07.2015 .....	22
Abbildung 10: Automotive Grade Linux System-Architektur .....	24
Abbildung 11: Serviceorientierte Anwendungen in AGL .....	24
Abbildung 12: Architektur von Android Automotive .....	25
Abbildung 13: Systembausteine der Apollo-Plattform .....	28
Abbildung 14: Relevanz von Connected-Car-Anwendungen .....	29
Abbildung 15: Entwicklung der AUTOSAR Mitgliederzahlen .....	30
Abbildung 16: Übersicht über die durch GENIVI adressierten Komponenten .....	31
Abbildung 17: Typische Schritte für die Durchführung eines Software-Updates in der Werkstatt .....	34
Abbildung 18: Übersicht über die externen Kommunikationsschnittstellen eines Fahrzeugs .....	35
Abbildung 19: Darstellung des Deployments von Software-Updates aus einem OEM-Server .....	35
Abbildung 20: Flashprogrammierung eines Mikrocontrollers über den Bootloader .....	36
Abbildung 21: Realisierungsalternativen von OTA-Updates innerhalb einer E/E-Architektur .....	37
Abbildung 22: Funktionale Übersicht eines OTA-Updates mit begleitenden Security-Maßnahmen .....	37
Abbildung 23: Flussdiagramm des Prozesses UNECE WP. 29 für Software-Updates nach Fahrzeugregistrierung .....	38
Abbildung 24: AUTOSAR-Architektur mit integriertem OTA-Updates-Service (UCM) .....	39
Abbildung 25: Struktur eines eSync Client für OTA-Updates .....	39
Abbildung 26: Anteile von Staaten/Regionen an weltweiter Pkw-Produktion 2019 .....	40
Abbildung 27: Anzahl verkaufter Automobile nach ausgewählten Ländern weltweit (2018) .....	41
Abbildung 28: Globale Marktanteile verschiedener Marken im Vergleich (2019) .....	41

Abbildung 29: Automotive-Software- und E/E-Markt bis 2030 .....	43
Abbildung 30: Elektronik-Wertschöpfungskette Automobi .....	43
Abbildung 31: Firmen der vernetzten Mobilität in China nach Integrationslevel und Gründungsdatum .....	44
Abbildung 32: Chinas Technologiereifegrad für Technologie im autonomen Fahren .....	45
Abbildung 33: Partnerschaften für vernetztes Fahren im Überblick (Stand: Februar 2019) .....	46
Abbildung 34: Kaufbereitschaft E-Fahrzeuge bzw. Verzicht auf eigenes Fahrzeug bei billigerem Robotaxi-Angebot im Ländervergleich .....	51
Abbildung 35: Chancen für nachhaltigen Markterfolg durch Investitionen der Industrie und der öffentlichen Hand .....	52
Abbildung 36: Facetten der Digitalisierung in der Automobilindustrie .....	59
Abbildung 37: Komplexitätsdimensionen von Mensch-Maschine-Systemen .....	59
Abbildung 38: Softwarekomplexität in Fahrzeugen, gemessen in Lines of Code .....	61
Abbildung 39: Wert eines Fahrzeugs heute und in der Zukunft .....	61
Abbildung 40: Cloud Computing (links) und Edge Computing (rechts) mit vorgelagertem, lokalem Rechner .....	62
Abbildung 41: Faktoren für die Akzeptanz von selbstfahrenden Autos .....	63
Abbildung 42: Standard OMA DM Management Architecture .....	65
Abbildung 43: Microsoft Windows Server Update Services (WSUS) .....	65
Abbildung 44: Zukünftig mögliche Geschäftsmodelle durch Vernetzung, Elektrifizierung, Sharing und autonomes Fahren .....	69
Abbildung 45: Erwartete Entwicklung der Updatefrequenz von Hauptreleases im Feld im Automotive-Bereich laut der Studie in Anzahl von Teilnehmern (von 51 Teilnehmern) .....	69
Abbildung 46: Angegebene Gründe für die Entwicklung von Updates im Automotive-Bereich laut der Studie in Anzahl von Teilnehmern (von 51 Teilnehmern) .....	70
Abbildung 47: Umsatz in der Automobilindustrie 2015–2030 .....	71
Abbildung 48: Prognostizierte Veränderung der Kompetenzbedarfe in der Automobilindustrie der EU (2018–2030) .....	75

# Abkürzungsverzeichnis

---

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ASIC	Application-specific Integrated Circuit (Anwendungsspezifische integrierte Schaltung)
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
AUTOSAR	AUTomotive Open System ARchitecture
B2B	Business to Business
B2C	Business to Customer
CAN	Controller Area Network
Car2X	Fahrzeug zu Umwelt (Kommunikation)
CPU	Central Processing Unit
DSP	Digitaler Signalprozessor
ECU	Electronic Control Unit
E/E-Architektur	Elektrik-/Elektronik-Architektur
FuE	Forschung und Entwicklung
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GPU	Graphics Processing Unit
IoT	Internet of Things
IVI	In-Vehicle Infotainment
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light Detection and Ranging
MaaS	Mobility as a Service
ML	Machine Learning
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OS	Operating System (Betriebssystem)
OTA	Over the Air
ROS	Robot Operating System
SoC	System on a Chip
TPU	Tensor Processing Unit

# Impressum

---

## **Herausgeber**

Cluster Elektromobilität Süd-West c/o  
e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

## **Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Eric Sax, Institutsleiter Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Direktor am FZI Forschungszentrum Informatik

Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reussner, Institutsleiter Institut für Programmstruktur und Datenorganisation (IPD) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Direktor am FZI Forschungszentrum Informatik

Jacqueline Henle, FZI Forschungszentrum Informatik  
Carl Philipp Hohl, FZI Forschungszentrum Informatik  
Stefan Otten, FZI Forschungszentrum Informatik  
Housseem Guissouma, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Sebastian Krach, FZI Forschungszentrum Informatik  
Timur Sağlam, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Jörg Henß, FZI Forschungszentrum Informatik

## **Redaktion und Koordination des Themenpapiers**

e-mobil BW GmbH

## **Layout/Satz/Illustration**

markentrieb  
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

## **Fotos**

Umschlag: © metamorworks/istockstock  
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

## **Auslieferung und Vertrieb**

e-mobil BW GmbH, Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart  
Telefon +49 711 892385-0, Fax +49 711 892385-49, info@e-mobilbw.de, www.e-mobilbw.de

## **Dezember 2020**

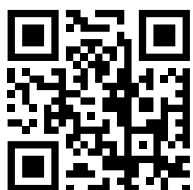
## **© Copyright liegt bei den Herausgebern**

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.





Self-Driving



[www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de)

**e-mobil BW GmbH**

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und  
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart  
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49  
[info@e-mobilbw.de](mailto:info@e-mobilbw.de)

