Strukturstudie BW^{e} mobil 2019

Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung

e-mobil BW
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Strukturstudie BW^{e} mobil 2019

Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung

Herausgeber

e-mobil BW
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

IMU Institut

bridging IT
Menschen Methoden Lösungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **4**
Management Summary **6**

1 Ausgangslage und Zielsetzung **10**

2 Technologiewandel und wesentliche Trends **14**
2.1 Elektrifizierung 17
2.1.1 Antriebskonzepte 17
2.1.2 Technologien 29
2.2 Digitalisierung und autonomes Fahren 47
2.2.1 Automatisiertes und autonomes Fahren – Status und Fakten 50
2.2.2 Perspektiven der Digitalisierung und neue Mobilitätskonzepte 57
2.3 Automobil-Produktion 4.0 62
2.3.1 Digitalisierungskonzepte 63
2.3.2 Technologien 64

3 Branchenbeschreibung und Marktanalyse **68**
3.1 Rahmendaten der deutschen Automobilindustrie 72
3.1.1 Besonderheiten der baden-württembergischen Automobilindustrie 75
3.1.2 Clustersegmente der Automobilindustrie in Baden-Württemberg 78
3.1.3 Zuordnung der Beschäftigung zu den Clustersegmenten 81
3.2 Marktentwicklung und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich 86
3.2.1 Deutschland und Baden-Württemberg 88
3.2.2 Vergleich mit Europa und ausgewählten europäischen Ländern 90
3.2.3 Vergleich mit den USA, China und Japan 92
3.3 Aktuelle Herausforderungen und Markthochlauf der Elektromobilität 94

4 Szenarien des Strukturwandels und Markthochlauf der Elektromobilität **96**
4.1 Metaanalyse bestehender Fahrzeugmarkt-Szenarien für PKW und zugrunde liegender Einflussfaktoren 99
4.2 Entwicklung der globalen PKW-Märkte 102
4.3 Szenariomodellierung für den europäischen PKW-Neuwagenmarkt bis 2030 103
4.3.1 Rahmenbedingungen für DLR-VECTOR21-Szenarien 105
4.3.2 Entwicklung des Markthochlaufs – „Business as usual“ 106
4.3.3 Entwicklung des Markthochlaufs – „progressiv“ 107
4.3.4 Exkurs: Sensitivitätsszenario mit progressiver Entwicklung der Brennstoffzelle 108
4.3.5 Ökonomische Auswirkungen des Markthochlaufs 109
4.4 Szenariomodellierung für den europäischen PKW-Flottenbestand bis 2030 110
4.4.1 Rahmenbedingungen für DLR-VECTOR21-Bestandsentwicklungen 112
4.4.2 Entwicklung des PKW-Flottenbestands – „Business as usual“ 113
4.4.3 Entwicklung des PKW-Flottenbestands – „progressiv“ 114
4.4.4 Ökologische Auswirkungen der Flottenentwicklung 115
4.5 Einordnung der Szenarien vor dem Hintergrund des Klimaschutzplans 2050 und der Sektorziele 118

5 Beschäftigungseffekte der Elektromobilität **120**
5.1 Aktueller Forschungsstand 125
5.2 Beschreibung des methodischen Vorgehens und Ergebnisse 127
5.2.1 Beschäftigungseffekte bei den verbrennungsmotorbasierten Komponenten (Fade-out) 127
5.2.2 Beschäftigungseffekte bei den neuen Komponenten (Fade-in) 133
5.2.3 Beschäftigungseffekte im Kfz-Gewerbe 136
5.3 Zusammenfassung der Beschäftigungseffekte des Transformationsprozesses zur Elektromobilität in Baden-Württemberg 137
5.3.1 Struktureller Wandel des gesamten Automobilclusters Baden-Württemberg 138
5.3.2 Betroffenheit der vom Antriebsstrang betroffenen Produktionswerke und der FuE-Beschäftigten 140
5.3.3 Zwischenfazit der Beschäftigungswirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität 142

6 Baden-Württemberg als industrielles Innovationscluster **144**
6.1 Megatrends und ihr Einfluss auf die Automobilindustrie sowie die gesamte Wirtschaft Baden-Württembergs 146
6.1.1 Anhaltende Optimierung der Produktion und Produktivitätseffekte 146
6.1.2 Industrie 4.0 und Digitalisierung 147
6.1.3 Globalisierung der Produktionsnetzwerke 149
6.2 Baden-Württemberg als industrielles Innovationscluster 151

7 Zusammenfassung und Handlungsoptionen **154**
7.1 Kernergebnisse der Studie 156
7.2 Handlungsoptionen im Transformationsprozess zur Elektromobilität 159
I. Leitmarkt nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg 159
II. Leitanbieter nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg 160
III. Kompetenz- und Innovationscluster Elektromobilität Baden-Württemberg 161

Literaturverzeichnis **164**
Abbildungsverzeichnis **177**
Tabellenverzeichnis **179**
Abkürzungsverzeichnis **180**

Vorwort

Die Zukunft der Mobilität ist automatisiert, vernetzt und elektrisch. Der Entwicklungspfad hin zu dieser Mobilität der Zukunft ist geprägt von einem komplexen, tiefgreifenden Wandlungsprozess. Für den Automobilstandort Baden-Württemberg ist die erfolgreiche Bewältigung dieses Wandels von zentraler Bedeutung: Baden-Württemberg – die Wiege des Automobils – gehört zu den führenden automobilen Ökosystemen der Welt. Die Region ist geprägt von einer engen Vernetzung leistungsfähiger Automobilhersteller, weltweit führender Systemlieferanten, zahlreicher mittelständischer Automobilzulieferer, spezialisierten Produktionsausrüstern und Serviceanbietern sowie exzellenten Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Diese einzigartige Kooperationsstruktur ist die Grundlage für die Innovationsstärke und den globalen Erfolg des Entwicklungs- und Produktionsstandortes im deutschen Südwesten.

Der Transformationsprozess hin zu einer nachhaltigen und intelligenten Mobilität bedeutet für die Akteure aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft eine mehrdimensionale und weitreichende Herausforderung. Ambitionierte Klimaziele, neue Mobilitätskonzepte und gesellschaftliche Entwicklungen verändern weltweit die Parameter für die Automobilwirtschaft und für alle mit ihr verbundenen Wirtschaftszweige. Sowohl das Produkt Automobil als auch die gesamten Prozesse von Entwicklung, Produktion oder Vertrieb müssen angesichts dieser Veränderungen konsequent hinterfragt und angepasst werden. Während mit Elektrifizierung und Digitalisierung ein umfassender Technologiewandel einhergeht, verändern sich auch die Strukturen des automobilen Wertschöpfungssystems durch neue Konkurrenten und immer kürzere Innovations- und Marktzyklen. Gleichzeitig führt ein Verkehrs- und Mobilitätswandel zu neuen Nutzungsgewohnheiten der Kunden und bietet die Möglichkeit, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln und zu etablieren. Und schließlich erfordert die Elektrifizierung auch einen Wandel des Energiesystems, indem regenerative Energiequellen für eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Energieversorgung nutzbar gemacht werden müssen.

Die größte Herausforderung liegt also nicht allein in der Einführung neuer Technologien, Produkte und Services, sondern in der zeitlichen Parallelität der Veränderungsanforderungen sowie der Vielschichtigkeit und Dynamik des Transformationsprozesses. Dies erfordert eine systemische Betrachtungs- und Herangehensweise, die Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft und Politik miteinander in eine enge Kooperation bringt und über die Grenzen von Branchen und Technologien hinweg vernetzt. In Baden-Württemberg verfolgen daher mittlerweile über 140 Partner im Cluster Elektromobilität Süd-West das Ziel, die Industrialisierung der Elektromobilität in Deutschland voranzubringen und Baden-Württemberg als führenden Anbieter nachhaltiger und intelligenter Mobilitätslösungen zu positionieren. Darüber hinaus hat die Landesregierung im Jahr 2017 einen breit angelegten Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg (SDA BW) gestartet, um im Zusammenwirken aller Akteure den Transformationsprozess in der Automobilwirtschaft positiv zu gestalten.

Mit den Strukturstudien BW[e] mobil 2011 und 2015 hat die Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg e-mobil BW GmbH den notwendigen Strukturwandel durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs beleuchtet und Herausforderungen und Chancen herausgearbeitet, die sich für Baden-Württemberg auf dem Weg zur Elektromobilität ergeben. Mit der **Strukturstudie BW[e] mobil 2019 – Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung** haben wir den analytischen Fokus der Studie nochmals erweitert und betrachten neben der Transformation der Automobilwirtschaft durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auch die Perspektiven und Folgen, die sich aus der zunehmenden Automatisierung und Vernetzung der Mobilität ergeben.

Franz Loogen
Geschäftsführer
e-mobil BW GmbH

Dr. Wolfgang Fischer
Prokurist, Leiter Bereich Projekt- und Clusteraktivitäten
e-mobil BW GmbH

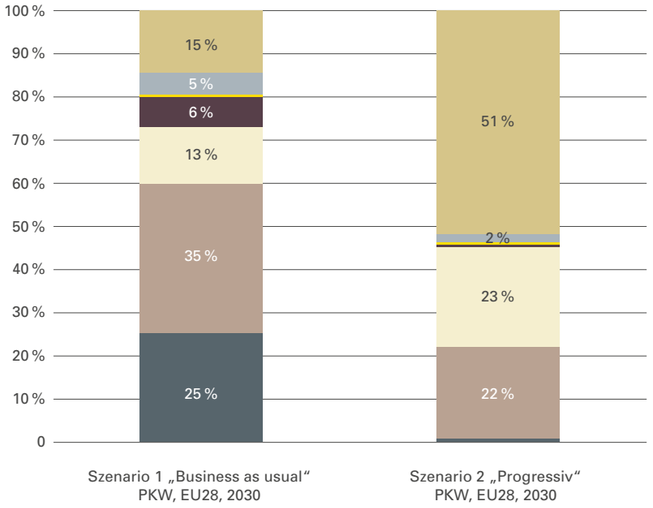
Management Summary

Der Technologiewandel führt zu einer Transformation der Mobilitätsindustrie.

Elektromobilität ist ein Megatrend, der – zusammen mit der Vernetzung von Fahrzeugen, dem autonomen Fahren sowie der digitalisierten Produktion – das Automobil, seine Nutzung und seine Produktion in den nächsten Jahren deutlich verändern wird. Insbesondere die Elektrifizierung des Antriebsstrangs verändert die bestehenden Wertschöpfungs- und Beschäftigungsstrukturen in der Automobilbranche, wobei klassische Komponenten wie der Verbrennungsmotor letztlich an Bedeutung verlieren, gleichzeitig neue Komponenten der Elektromobilität wichtiger werden. Getrieben wird dieser Wandel vor allem von asiatischen PKW-Märkten, hier insbesondere von China. Für den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg gilt es, diesen Prozess der Transformation und des Strukturwandels als Chance anzunehmen und zu nutzen.

Bereits 2030 könnten elektrische Antriebe bei Neuwagen in Europa dominieren.

Treiber für eine breite Elektrifizierung sind insbesondere die von der EU festgelegten CO_2-Grenzwerte für neue PKW und die Anstrengungen der Automobilhersteller, diese einzuhalten. Hierfür werden die verbrennungsmotorischen Fahrzeuge dank neuer Technologien immer effizienter und gleichzeitig immer stärker elektrifiziert.



© eigene Berechnung

PKW-Neuzulassungsanteile im Jahr 2030 für Szenario „Business as usual“ (links) und Szenario „progressiv“ (rechts) in der EU28“

Mit dem Modell DLR VECTOR21 wurde das Markt- und Käuferverhalten simuliert, um in zwei Szenarien plausible Zukunftsbilder des PKW-Neuwagenmarktes in Europa zu erhalten. Das Eintreten der Szenarien ist vor allem von für Baden-Württemberg exogenen Faktoren bestimmt. Im Business-as-usual-Szenario der DLR-VECTOR21-Simulation werden bei moderaterer Entwicklung der Rahmenbedingungen 15 % aller verkauften Neu-PKW in Europa reine Elektrofahrzeuge sein, Plug-Ins und Full-Hybride erreichen dann Anteile von 13 % und 35 %. Die Brennstoffzelle erreicht im betrachteten Zeitraum in der Simulation keine nennenswerten Marktanteile. Bei sehr günstiger Entwicklung der Rahmenbedingungen – insbesondere der Batteriekosten und Infrastrukturverfügbarkeit – werden gemäß dem progressiven Szenario der DLR-VECTOR21-Simulation 51 % aller verkauften europäischen PKW-Neuwagen im Jahr 2030 rein elektrisch betrieben sein, weitere 47 % werden (teil-)elektrifiziert und mit Verbrennungsmotor ausgestattet sein. In diesem Szenario ist ein rein elektrisches Mittelklassefahrzeug spätestens 2030 preislich auf dem Niveau eines verbrennungsmotorisch betriebenen Benzin-PKW und damit auch bei den reinen Anschaffungskosten konkurrenzfähig. Während das konventionelle Fahrzeug im Jahr 2015 noch einen direkten Kostenvorteil von über 10.000 Euro aufweist, ist es im Jahr 2030 im progressiven Szenario rund 1.000 Euro teurer. Dies liegt unter anderem an der zunehmenden Komplexität und den steigenden Kosten für Effizienztechnologien. Diese sind zur Einhaltung gesetzlicher Emissionsgrenzwerte notwendig und führen gleichzeitig zu einer deutlichen Verbrauchsreduktion.

Der Meilenstein des Klimaschutzplanes 2030 wird erreicht – bei Einhaltung strikter Rahmenbedingungen.

Der Klimaschutzplan der Bundesregierung hat für den Verkehr ein Sektorziel von 40 bzw. 42 % CO_2-Minderung bis 2030 gegenüber 1990 festgeschrieben. Beide Szenarien erreichen rechnerisch dieses Ziel: Im Business-as-usual-Szenario ergeben sich CO_2-Minderungen für den PKW-Bereich von 50 % und im progressiven Szenario 55 % gegenüber 1990. Dies gilt allerdings nur unter der sehr unwahrscheinlichen Voraussetzung, dass die jährlichen Fahrleistungen und die durchschnittliche Motorleistung nicht weiter steigen. Real ist damit zu rechnen, dass eine steigende Verkehrsleistung den technischen Reduktionen entgegenwirken und die berechneten Potenziale nicht voll erreicht werden können. Außerdem müssten auch die anderen Verkehrsträger (z. B. Bahn-, Last- und Flugverkehr) gleichermaßen zur Erreichung der Sektorziele beitragen. Dies stellt ein erhebliches Risiko dar. Eine frühzeitige Elektrifizierung der PKW- Flotte hat dabei aufgrund der langsamen Umwälzung des Fahrzeugbestandes einen großen Einfluss auf den langfristigen CO_2-Ausstoß und einen stark positiven Effekt auf die angestrebte Treibhausgasneutralität im Jahr 2050. Insgesamt sind aus Klimaschutzgründen Maßnahmen erforderlich, die die Transformationsgeschwindigkeit über die im Szenario Business-as-usual dargestellte Entwicklung hinaus beschleunigen.

Die Beschäftigten in Baden-Württemberg sind sehr unterschiedlich betroffen.

Im Referenzjahr 2016 waren im Automobilcluster Baden-Württemberg rund 470.000 Beschäftigte direkt oder indirekt tätig, dies entspricht ca. 11 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im Land. Durch das Marktwachstum bei neuen Komponenten für die Elektromobilität und den gleichzeitigen Rückgang konventioneller Komponenten ergeben sich je nach Szenario für das Jahr 2030 insgesamt Beschäftigungspotenziale von +1,9 % (+8.900 Beschäftigte) bis hin zu –6,6 % (–30.800 Beschäftigte). Für den gesamten baden-württembergischen Automobilstandort können diese Beschäftigungseffekte als moderat eingeschätzt werden. Dies gilt aber nur, wenn das Cluster auch bei den alternativen Antriebstechnologien seine weltweit führende Innovationsrolle behält und bei den neuen Komponenten Marktanteile in ähnlicher Höhe wie heute gewinnen kann. Hierfür sind konzertierte Anstrengungen aller Branchenakteure und eine aktive industriepolitische Unterstützung notwendig, um die besondere Bedeutung des Automobilclusters Baden-Württemberg zu erhalten.

© Stadtblick Stuttgart/AdobeStock

Die sich im Branchendurchschnitt ausgleichenden positiven und negativen Beschäftigungseffekte sind sehr unterschiedlich verteilt. So wird die Brisanz der Beschäftigungsentwicklung erst deutlich, wenn nur die direkt vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerke in Baden-Württemberg mit ihren 70.000 Beschäftigten betrachtet werden.

- Im **Business-as-usual-Szenario** könnten 2030 ca. 10 % (inkl. Produktivitätseffekten 27 %) der Beschäftigten in den vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerken durch Fade-out-Effekte betroffen sein. Von diesen ca. 18.500 betroffenen Beschäftigten könnten ca. 5.000 in der Herstellung neuer Komponenten (Fade-in) beschäftigt werden.

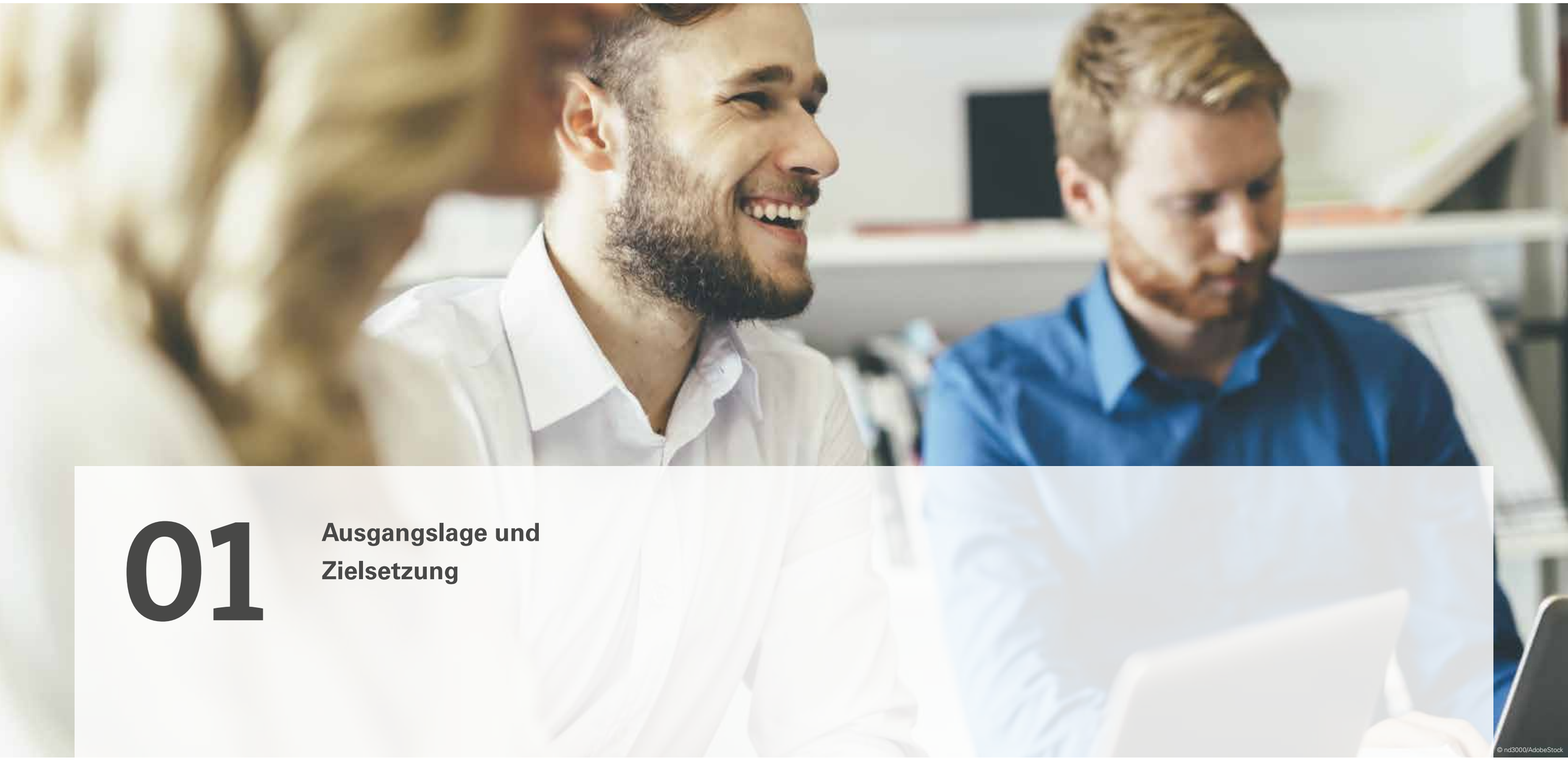
- Im **progressiven Szenario** wäre 2030 im Durchschnitt fast jeder zweite Beschäftigte in den antriebsstrangabhängigen Produktionswerken betroffen (46 %; inkl. Produktivitätseffekten 56 %). Insgesamt wären 39.000 Beschäftigte in Baden-Württemberg vom Fade-out der Verbrennungsmotortechnologie negativ betroffen, während ca. 8.000 neue Arbeitsplätze durch die neuen Elektrokomponenten entstehen könnten.

Die Transformation der baden-württembergischen Automobilindustrie kann insgesamt nur gelingen, wenn die Unternehmensstrategien und unterstützende industriepolitische Maßnahmen auch die nachhaltige Entwicklung der baden-württembergischen (Produktions-)Standorte mit in den Fokus nehmen und die Beschäftigten in die Transformation eingebunden werden.

Den Wirtschaftsstandort als führendes Zentrum industrieller Innovationen sichern.

Die wirtschaftliche Stärke Baden-Württembergs stützt sich schon seit Jahren auf ein spezifisches Innovationscluster, das sich auf Innovationen im Umfeld der industriellen Produktion spezialisiert hat und dabei weltweit eine führende Position einnimmt. Der Transformationsprozess zur Elektromobilität kann trotz des Strukturwandels bei der Beschäftigung wichtige Impulse zur Weiterentwicklung des baden-württembergischen Clusters für industrielle Innovationen liefern. Voraussetzung dafür ist, dass das spezifische Innovationsmuster aus der Verknüpfung von Produktionswissen und Produktinnovation für die Zurückgewinnung der Innovationsführerschaft auch bei den neuen Antriebsstrangkonzepten genutzt wird. Baden-Württemberg muss zum Leitmarkt und Leitanbieter für eine nachhaltige Mobilität und damit zum Vorreiter für den Transformationsprozess zur Elektromobilität werden.

Dies kann nur gelingen, wenn sich die Unternehmens- und Standortstrategien, gepaart mit dem Veränderungswillen der Beschäftigten und der Unterstützung aus Politik und Wissenschaft, an diesem Entwicklungsziel ausrichten. Dabei kann die Sicherung einer nachhaltigen Beschäftigungsperspektive der betroffenen Mitarbeiter ein wichtiges Element zur Überwindung von Veränderungshemmnissen werden. Denn nicht die Transformation zur Elektromobilität selbst, sondern verpasste Gestaltungschancen bei deren aktiver Weiterentwicklung können die wirtschaftliche Stärke Baden-Württembergs gefährden.



01 Ausgangslage und Zielsetzung

© nd3000/AdobeStock

01

Ausgangslage und Zielsetzung

© Harrndorff/AdobeStock

Mit der Transformation der Mobilitätsindustrie – angetrieben durch die Trends Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung – ergeben sich weltweit zusätzliche wirtschaftliche Chancen. Gerade in Deutschland und speziell in Baden-Württemberg, einem der bedeutendsten Standorte der Automobilindustrie weltweit, herrscht Unsicherheit, wie sich diese Veränderungen auf die zukünftige Wertschöpfung und die Beschäftigung auswirken. In diesem Zusammenhang wird hauptsächlich über mögliche negative Folgen für den Wirtschaftsstandort gesprochen, wobei – sofern die Transformation aktiv und erfolgreich gesteuert wird – auch positive Wirkungen erreicht werden können.

Ziel dieser Studie ist es, potenzielle Veränderungen am Automobilstandort Baden-Württemberg darzustellen. Hierbei wird ein Fokus auf die Herausforderungen und Chancen gelegt, die durch Elektrifizierung, aber auch durch Digitalisierung und Automatisierung des Fahrens entstehen. Diese wissenschaftlich fundiert, nachvollziehbar und transparent darzustellen, ist Voraussetzung für eine aktive und positive Gestaltung des Wandels in Politik, Gesellschaft und Industrie. Ein weiteres wichtiges Kriterium für eine gelungene Transformation ist die Einhaltung der Klimaziele – und damit möglichst die Begrenzung der weiteren Erderwärmung. Hierfür ist die Elektrifizierung des PKW-Antriebes eine notwendige, aber keine hinreichende Maßnahme. Die ebenfalls notwendigen Veränderungen des Mobilitätsverhaltens wurden und werden in anderen Studien untersucht – beispielsweise in „Mobiles Baden-Württemberg. Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität“ (Baden-Württemberg Stiftung, 2017).

Der Fokus der szenariobasierten Untersuchung liegt auf elektrifizierten PKW einschließlich deren Technik und Komponenten sowie auf den Auswirkungen der Elektrifizierung auf Wertschöpfung und Beschäftigung. Mögliche Effekte von Digitalisierung und Produktion 4.0 werden dagegen hier nicht mit eigenen Simulationsmodellen berechnet, sondern qualitativ beschrieben. Die vorliegende Analyse liefert Antworten auf folgende Fragestellungen:

- Worin besteht der Technologiewandel?
- Welchen Stand haben Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung und welche Trends gibt es?
- Wie sieht die Branchenstruktur im Automobilsektor in Baden-Württemberg aus?
- Wie schnell und unter welchen Voraussetzungen setzen sich alternative Antriebe durch?
- Wie entwickeln sich Wertschöpfung und Beschäftigung?
- Welche Gestaltungsoptionen stehen für die Transformation zur Verfügung?

Kapitel 1 fokussiert auf die Darstellung der wichtigsten Informationen zum Technologiewandel in kompakter, einfacher und übersichtlicher Form, erklärt die Formen der Elektrifizierung und Digitalisierung, die dort relevanten Technologien und den möglichen Einfluss auf die Mobilität der Zukunft. Eine Beschreibung der Automatisierung im Sinne von Konzepten der Produktion 4.0 beschließt das Kapitel.

Kapitel 2 stellt die Marktsituation bei alternativen Antrieben im internationalen Vergleich dar und ordnet die spezifische Situation und Branchenstruktur Baden-Württembergs in den Kontext ein. Ein besonderer Fokus liegt auf der Darstellung der Ist-Situation, um die Grundlage für eine Fortschreibung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungsstrukturen zu schaffen.

Kapitel 3 umfasst die Analyse bestehender Elektromobilitätsszenarien im Zeitraum bis 2030 und die Entwicklung eigener Marktdurchdringungsszenarien mit wissenschaftlichen Szenariomodellen (DLR VECTOR21). So werden u. a. die Nachfrage nach neuen und klassischen Komponenten in der Zukunft und potenzielle Kostenentwicklungen modelliert.

Kapitel 4 beschreibt auf Basis der Szenarioergebnisse die relevanten Entwicklungen von Wertschöpfung und Beschäftigung durch Elektromobilität für den Automobilstandort Baden-Württemberg.

Kapitel 5 zeigt die Rolle und Situation Baden-Württembergs als wirtschaftlich erfolgreicher Industriestandort und seine Stärke bei industriellen Innovationen auf.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und liefert Handlungs- und Gestaltungsoptionen für die Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Abbildung 1 illustriert das methodische Vorgehen dieser Studie. Sie baut auf den Ergebnissen und Implikationen vorhergehender Untersuchungen der e-mobil BW auf – so u. a. „Elektromobilität weltweit – Baden-Württemberg im internationalen Vergleich“ (2015), „Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch – Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg“ (2015) – sowie weiterer Referenzstudien wie z. B. „Strukturberichte Region Stuttgart“ (v. a. 2017, 2015 und 2009) und „Mobiles Baden-Württemberg – Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität“ (2017), fasst diese zu einem neuen Bild zusammen und erweitert sie punktuell in wissenschaftlicher Tiefe.

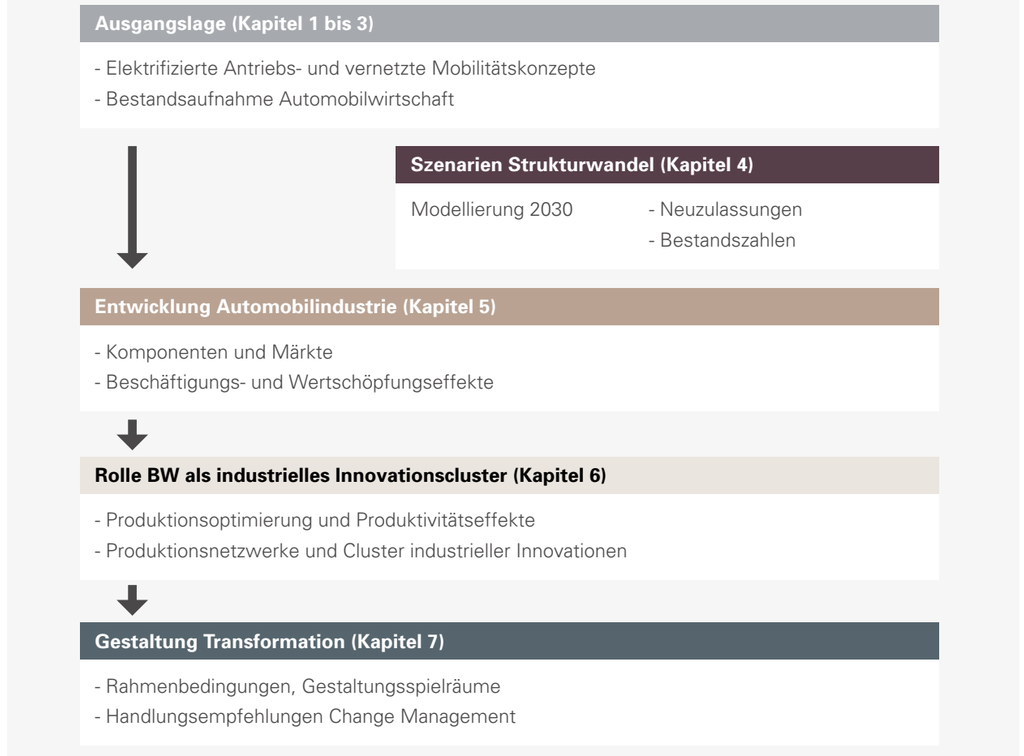


Abbildung 1: Vorgehen und Kerninhalte

02 Technologiewandel und wesentliche Trends

© Chesky_W/
istockphoto

02

Technologiewandel und wesentliche Trends

© pagnacco/AdobeStock

Weltweit steht die Automobilwirtschaft vor einem enormen Wandel. Ausgehend von den drei großen Trends Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung zeichnet sich eine Veränderung der Mobilität an sich ab. Das Fahrzeug der Zukunft wird aller Voraussicht nach zunehmend elektrisch angetrieben, intelligent und vernetzt sein sowie auf Wunsch autonom fahren. Es wird angetrieben durch erneuerbare Energieformen, nutzt aktuelle Daten (u. a. Verkehrsdaten) zur Optimierung der Fahrtwege und Verkehrsflüsse und kommuniziert ständig mit anderen Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern – auch um Unfällen aktiv vorzubeugen.

Für die Automobilindustrie bedeutet dieser Wandel eine erhebliche Herausforderung: Bestehende Geschäftsmodelle müssen an die sich ändernden Anforderungen angepasst werden. Neue Technologien und Komponenten werden von den Herstellern und Zulieferern erzeugt, klassische Komponenten – wie der Verbrennungsmotor – verlieren langfristig an Relevanz. Die Transformation zur Elektromobilität verändert die Automobilindustrie, da sich Wertschöpfungsanteile, -prozesse und -strukturen in der Fahrzeugentwicklung sowie in der Fahrzeugproduktion verändern. Davon abhängig ist auch die Beschäftigungssituation – speziell im Automotivegeprägten Baden-Württemberg.

Ziel im Folgenden ist es, die mit den drei großen Trends Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung einhergehenden Entwicklungen zu beschreiben und zu erklären. Dies bildet die Grundlage, um den Wandel zu verstehen und einzuordnen. Vor allem soll ein Verständnis dafür geschaffen werden, dass der Wandel einen signifikanten Einfluss auf die Art und Weise hat, wie Fahrzeuge in der Zukunft gestaltet und produziert werden. Ein Fokus wird zudem auf die zukünftige Einbindung von Fahrzeugen in das Energiesystem und die Energieinfrastruktur sowie auf generelle Transformationsprozesse im Mobilitätssystem angesichts sich ändernden Nutzerverhaltens und neuer Geschäftsmodelle gelegt.

2.1 Elektrifizierung

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind aller Voraussicht nach Teil einer zukünftigen Mobilität, die lokal emissionsfreies Fahren – z. B. in Großstädten – ermöglicht. Der Ausstoß von klima- und gesundheitsschädlichen Abgasen wie CO_2 oder NO_2 kann damit vor Ort reduziert werden. Auch eine Verringerung der Feinstaubbelastung (u. a. durch Bremsabrieb) ist erzielbar über eine durch den E-Motor gesteuerte Verzögerung des Fahrzeugs (Rekuperation) bei gleichzeitiger Energierückgewinnung.

Zur „Elektrifizierung" zählen nicht nur rein elektrisch fahrende Fahrzeuge, sondern auch alle hybriden Formen, die sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen E-Motor zum Vortrieb nutzen. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge sind Teil elektrifizierter Antriebskonzepte, erzeugen die Antriebsenergie aber im Fahrzeug mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle selbst. Gemeinsam ist allen Fahrzeugen, dass zumindest Teile der Fahrtstrecke rein elektrisch zurückgelegt werden können oder der klassische Verbrennungsmotor elektrisch unterstützt wird. So sind z. B. bessere Beschleunigungswerte oder ein geringerer Benzinverbrauch möglich.

Durch die (schrittweise) Elektrifizierung bieten die Automobilhersteller den Kunden neue Vorteile in Bezug auf Fahrdynamik, Lärmreduktion, Effizienz und Verbrauch und senken zeitgleich (lokale) Emissionen. Dies ist bei Hybridfahrzeugen allerdings verbunden mit höherer Komplexität, höherer Masse und höheren Kosten. Bei weniger komplexen reinen Elektrofahrzeugen sind diese aufgrund der heute noch hohen Batteriekosten sogar noch höher – und das bei aktuell relativ geringen Reichweiten beziehungsweise Komforteinbußen bei der Klimatisierung.

2.1.1 Antriebskonzepte

In Kürze:

- Es gibt verschiedene Bauformen und Grade der Elektrifizierung – vom Hybrid- bis zum reinen Batteriefahrzeug – mit unterschiedlichen elektrischen Leistungen, Reichweiten und Fahranteilen.
- Das Angebot an Elektrofahrzeugen nimmt kontinuierlich zu, deutsche Hersteller starten ab ca. 2020 eine Offensive.
- Verbrennungsmotoren werden weiterhin bei vielen Antriebskonzepten eingesetzt, ausgenommen sind reine Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge.
- Klassische Komponenten werden kontinuierlich weiterentwickelt – effizienter, kleiner, leichter und kompakter.
- Neue Komponenten verändern die Wertschöpfungsanteile am Fahrzeug signifikant. Der Schwerpunkt der Wertschöpfung verschiebt sich weiter von der Mechanik zur Elektrik/Elektronik.

Auf dem Markt erhältlich ist schon jetzt eine Vielzahl elektrisch oder alternativ betriebener Fahrzeuge. Diese werden unterschieden nach dem Grad der Elektrifizierung – und damit z. B. der erzielbaren rein elektrischen Reichweite – sowie dem technischen Zusammenspiel von konventionellen und elektrischen Komponenten. Die relevanten Formen bei PKW sind in Abbildung 2 dargestellt und werden kompakt beschrieben.

© eigene Darstellung

Abbildung 2: Übersicht über konventionelle und elektrifizierte Antriebskonzepte

Generell können die Antriebskonzepte in „konventionell" (klassisch mit Verbrennungsmotor), „hybrid" (mit und ohne externe Lademöglichkeit), „rein elektrisch" (immer mit externer Lademöglichkeit) sowie „brennstoffzellenbasiert" unterteilt werden.

Hybridfahrzeug (Hybrid Electric Vehicle, HEV)

Ein Hybridfahrzeug hat mindestens zwei Antriebe an Bord. Es verfügt über einen Verbrennungsmotor und einen Elektromotor, der den Verbrennungsmotor beim Antrieb entweder unterstützt oder (in Teilen) entlastet. Je nach Leistung des E-Motors und Größe der Batterie werden folgende Grade der Hybridisierung unterschieden: Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid, Full-Hybrid und Plug-in-Hybrid.

Der **Mikro-Hybrid** ist heute schon Stand der Technik und in so gut wie jedem Neuwagen mit Verbrennungsmotor (ICE, Internal Combustion Engine) verbaut. Hier wird der klassische Anlasser durch einen stärkeren Elektromotor ersetzt, zudem wird die Motorsteuerung angepasst, um die Start-Stopp-Funktion zu ermöglichen. Der Verbrennungsmotor wird also z. B. beim Halt an der roten Ampel automatisch ausgeschaltet, beim Weiterfahren wieder gestartet. Dies führt zu Verbrauchseinsparungen vor allem im Stadtverkehr, rein elektrisches Fahren ist aber nicht möglich. Die technischen Veränderungen am Fahrzeug sind minimal, auch die Mehrkosten des Systems halten sich für den Kunden in Grenzen. Bei hohem Anteil an Fahrten in der Stadt können Effizienzpotenziale von 5 % bis 10 % realisiert werden. Beim **ICE efficient** werden darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Funktionen elektrifiziert (z. B. Turbolader, Klimakompressor, Lenkpumpe) oder Bauteile (wie LED-Leuchten) verbessert, um die Energieeffizienz des Fahrzeugs zu erhöhen. Der Wertschöpfungsanteil elektrischer und elektronischer Bauteile steigt damit weiter an.

Ein **Mild-Hybrid** bietet zusätzlich Möglichkeiten zur Rekuperation (Energierückgewinnung beim Bremsen) und eine Schub- und Boost-Funktion, die eine zeitweise Unterstützung des Verbrennungsmotors, z. B. durch stärkere Beschleunigung, ermöglicht. Der Verbrennungsmotor wird dabei durch einen relativ klein dimensionierten E-Motor mit ca. 15 kW unterstützt. Bis zu bestimmten Geschwindigkeiten (ca. 70 km/h) ist zusätzlich ein „Segeln" möglich, sodass das Fahrzeug bei stehendem Verbrennungsmotor rollt, wenn so Energie gespart werden kann. Zur Steuerung der elektrischen Leistung werden die Bordnetze mit höheren Spannungen betrieben, beispielsweise mit einem 48-Volt-System. So können auch Nebenaggregate elektrisch statt mechanisch angetrieben und effizienter geregelt werden. Die Installation des Hybridsystems inkl. der Batterie bedeutet eine höhere Komplexität, eine höhere Masse und höhere Kosten, ermöglicht aber, abhängig vom Einsatzprofil, 15–20 % Effizienzpotenzial im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug.

Full-Hybride ermöglichen rein elektrisches Fahren für eine kurze Zeit und Strecke (ca. 5 km). Die Batterie ist größer dimensioniert (ca. 2–4 kWh) und kann entsprechend mehr elektrische Energie speichern und abgeben. Sie wird nicht extern aufgeladen. Die für die elektrische Fahrt notwendige Energie kommt allein aus der Rekuperation sowie aus Erzeugung durch den konventionellen Verbrennungsmotor. Der höheren Komplexität, der zusätzlichen Masse und den Mehrkosten stehen höhere Verbrauchseinsparungen (insbesondere im Stadtverkehr, 22–25 %) und kurze lokal emissionsfreie Fahrten gegenüber (ECF, 2017).

Plug-in-Hybride (PHEV) können im Vergleich zum Full-Hybrid zusätzlich an einer externen Stromquelle aufgeladen werden. Ladegeräte sind in das Fahrzeug oder die Ladesäule integriert. Der Energiespeicher ist größer dimensioniert (zurzeit ca. 5–15 kWh) und ermöglicht rein elektrisches Fahren von ca. 40–50 km. In der Zukunft werden marktspezifisch 80 km und mehr angestrebt. Im Vergleich zu Full-Hybriden ist eine zusätzliche oder eine größer dimensionierte Batterie verbaut; zudem eine Ladeeinheit für den Anschluss an eine externe Stromquelle.

Bei einem **Elektrofahrzeug mit Range Extender** (Range-extended Electric Vehicle, REEV) treibt der installierte Verbrennungsmotor einen Generator an, der bei Bedarf die Batterie im Fahrzeug mit Energie versorgt. Für diese Funktion kann der Verbrennungsmotor kleiner als in einem reinen Verbrenner ausgelegt werden. Er muss allerdings für einen häufig unterbrochenen, dafür aber stationären Einsatz ausgelegt sein. Der E-Motor ist für den Vortrieb zuständig. Durch die Kombination der Batteriekapazitäten und der chemischen Energie im Kraftstoff entstehen eine hohe Gesamtreichweite des Fahrzeugs und hohe rein elektrische, also auch lokal emissionsfreie Fahranteile. Der Range Extender kann verbrauchs- und schadstoffoptimal bei konstanter Drehzahl im bestmöglichen Wirkungsgradbereich arbeiten. Dem stehen ein komplexer Gesamtsystemaufbau und in Anbetracht der groß dimensionierten Batterie hohe Kosten und hohe Masse gegenüber. Neben 4-Takt-Hubkolben-Verbrennungsmotoren können auch andere Technologien, wie z. B. Wankelmotoren, Zweitaktmotoren, Brennstoffzellensysteme oder Gasturbinen als Range Extender genutzt werden (Stan, 2016).

Batteriefahrzeug (Battery Electric Vehicle, BEV)

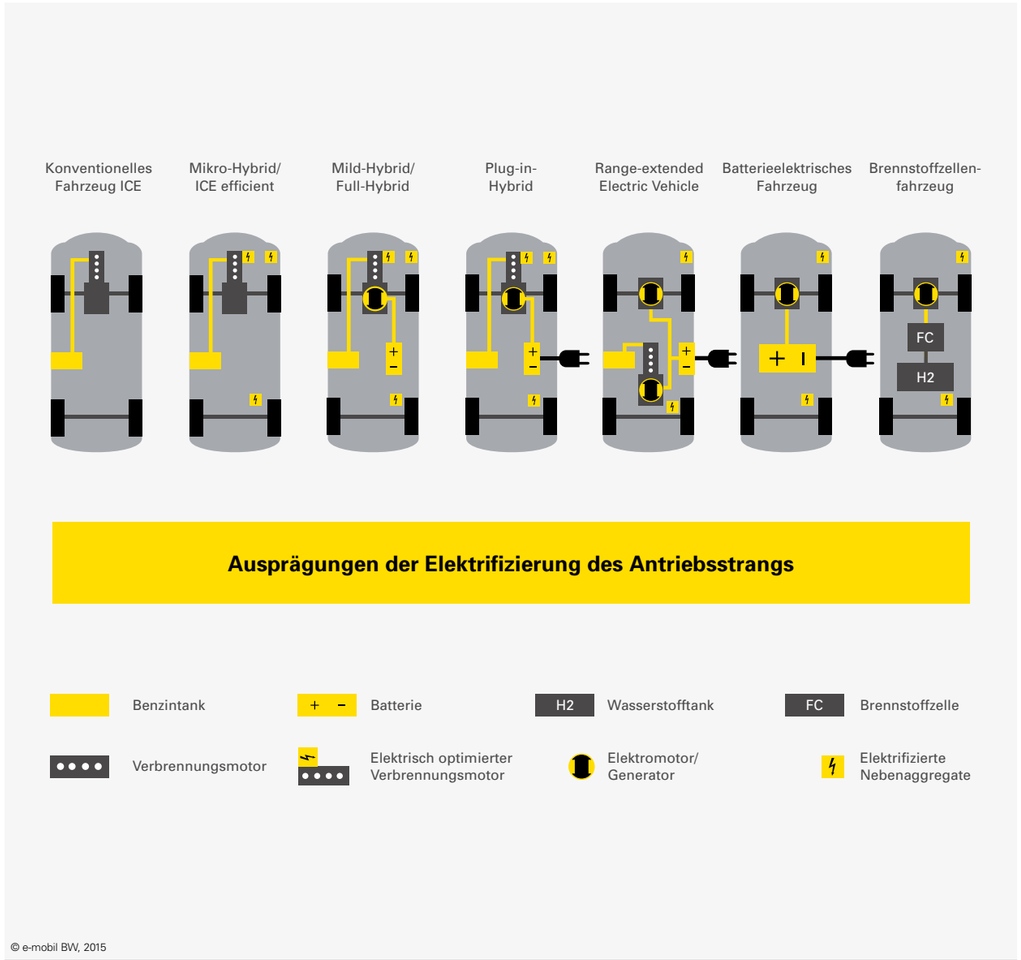
Ein **Batteriefahrzeug** nutzt ausschließlich ein rein elektrisches Antriebssystem, das aus einem oder mehreren Elektromotoren, der Leistungselektronik (inkl. Ladesystem) sowie einem Batteriesystem besteht. Der Energiespeicher ist dabei relativ groß dimensioniert (20–150 kWh) und kann über das externe Stromnetz aufgeladen werden. Zusätzlich wird durch Rekuperation kontinuierlich Bremsenergie zurückgewonnen und in die Traktionsbatterie eingespeist. Der Vortrieb erfolgt jederzeit rein elektrisch, konventionelle Komponenten wie Verbrennungsmotor, Kraftstoffversorgung, Abgasanlage sowie Starter und Lichtmaschine entfallen. Bei reinen Elektrofahrzeugen kann das Getriebe entweder stufenlos oder ein- bzw. zweistufig ausgelegt sein. Zweistufige Getriebe bieten Vorteile, da sie sowohl hohes Drehmoment bei der Beschleunigung (z. B. beim Anfahren) als auch einen effizienteren Betrieb bei höheren Geschwindigkeiten ermöglichen.

Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen verringert sich die Teilekomplexität im Antriebsstrang und Vorteile entstehen in Bezug auf den verfügbaren Bauraum. Ein Batterie- oder Elektrofahrzeug erzeugt lokal und während der Fahrt keine Emissionen und bei geringen Geschwindigkeiten weniger Lärm. Sofern das Fahrzeug mit erneuerbaren Energien gespeist wird, können hohe Vorteile beim Emissionsausstoß auch über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs realisiert werden. Die Nachteile liegen in derzeit noch hohen Kosten – v. a. bedingt durch hohe Batteriekosten – und einer im Vergleich zum Verbrenner geringen Reichweite.

Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)

Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen ausschließlich Elektromotoren zum Vortrieb, die hier aber aus einem Wasserstofftank und einem Brennstoffzellensystem gespeist werden. Die kleiner dimensionierten Batterien werden kontinuierlich bordintern von der Brennstoffzelle geladen. Zudem ist eine externe Ladung als FC-PHEV konstruktiv möglich. In Brennstoffzellen-PKW werden 3–6 kg Wasserstoff bei 700 bar gespeichert, was Reichweiten von 400 km bei Füllzeiten von sechs Minuten ermöglicht. Bei FC-Nutzfahrzeugen wird ein Druck von 350 bar verwendet. Die Nachteile von Brennstoffzellenfahrzeugen bestehen in derzeit noch hohen Anschaffungskosten und geringer Verfügbarkeit von Wasserstoffinfrastruktur.

Folgende Abbildung 3 liefert eine Übersicht über Aufbau und Anordnung relevanter Komponenten der Antriebskonzepte.



© e-mobil BW, 2015

Abbildung 3: Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb

Die einzelnen Antriebskonzepte und deren wesentliche Eigenschaften sowie grundlegende Vor- und Nachteile sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

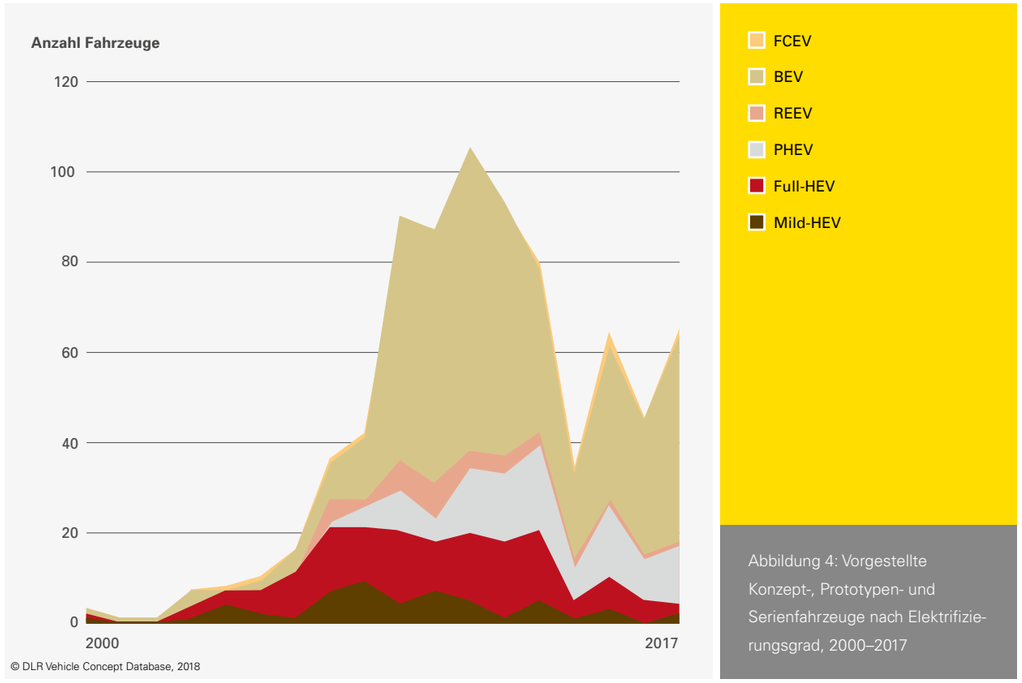
Konzept	Merkmale/Beispiele	Vorteile/Nachteile
Mikro-Hybrid/ ICE efficient	Automatische Start-Stopp-Funktion, regeneratives Bremsen mit Startergenerator Spannung: 12 V E-Leistung: 5 kW Batteriekapazität: 0,6–1,2 kWh	+ Geringe Mehrkosten, effektiv für urbane Fahrprofile – Geringe oder keine Kraftstoffeinsparung bei Überland- bzw. Autobahnfahrt
Mild-Hybrid	Automatische Start-Stopp-Funktion, Rekuperation, Schub und Boost, Zug Spannung: 42–150 V E-Leistung: 5–15 kW Batteriekapazität: 1–3 kWh	+ Gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis, gutes Effizienzpotenzial – Höhere Masse, größerer notwendiger Bauraum, höhere Kosten u. a. der Batterie
Full-Hybrid	Automatische Start-Stopp-Funktion, Rekuperation, Boost, kurzes elektrisches Fahren Spannung: 150–400 V E-Leistung: 20–50 kW Batteriekapazität: 2–4 kWh	+ Hohes Effizienzpotenzial für urbane und andere Schub-, Zug-, Wechsel-Fahrprofile, kurze Zeit lokal emissionsfrei – Steigende Komplexität, höhere Masse, höhere Kosten
Plug-in-Hybrid	Automatische Start-Stopp-Funktion, Rekuperation, Boost, längeres elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V E-Leistung: 50 kW Batteriekapazität: 5–15 kWh	+ Hohes Effizienzpotenzial für urbane und andere Schub-, Zug-, Wechsel-Fahrprofile, längere Zeit lokal emissionsfrei – Weiter steigende Komplexität, höhere Masse, höhere Kosten
Range-extended Electric Vehicle	Rekuperation, On-board-Bereitstellung elektr. Energie Spannung: 200–400 V E-Leistung: 70–100 kW Batteriekapazität: 15–30 kWh	+ Lokal emissionsfreies Fahren möglich, keine Reichweitenproblematik – Hohe Masse, notwendiger Bauraum, Kosten der Batterie
Battery Electric Vehicle	Rekuperation, rein elektrisches Fahren Spannung: 200–1.000 V E-Leistung: 100–500 kW Batteriekapazität: 10–150 kWh	+ Lokal emissionsfrei, hohe CO_2-Einsparung bei Nutzung erneuerbarer Energie – Kosten des Antriebsstrangs und insbes. der Batterie, geringere Reichweite, höhere Fahrzeugmasse
Fuel Cell Electric Vehicle	Rekuperation, rein elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V E-Leistung: 100–300 kW Batteriekapazität: 10 kWh	+ Lokal emissionsfrei, hohe Reichweite + Schnelle Energieaufnahme + Externe Ladung als FC-PHEV konstruktiv möglich – Verfügbarkeit Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur, höhere Anschaffungskosten

© in Anlehnung an eMAP 2015

Tabelle 1: Wesentliche Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der Antriebskonzepte im Vergleich

Marktangebot und Strategien der Hersteller

In den letzten Jahren haben die Automobilhersteller ihr Produktportfolio kontinuierlich um alternativ betriebene Fahrzeuge erweitert bzw. einen Ausblick auf die in der Zukunft geplanten elektrifizierten Modelle gegeben, wie eine Analyse der seit dem Jahr 2000 weltweit vorgestellten elektrifizierten Modelle in Abbildung 4 verdeutlicht.



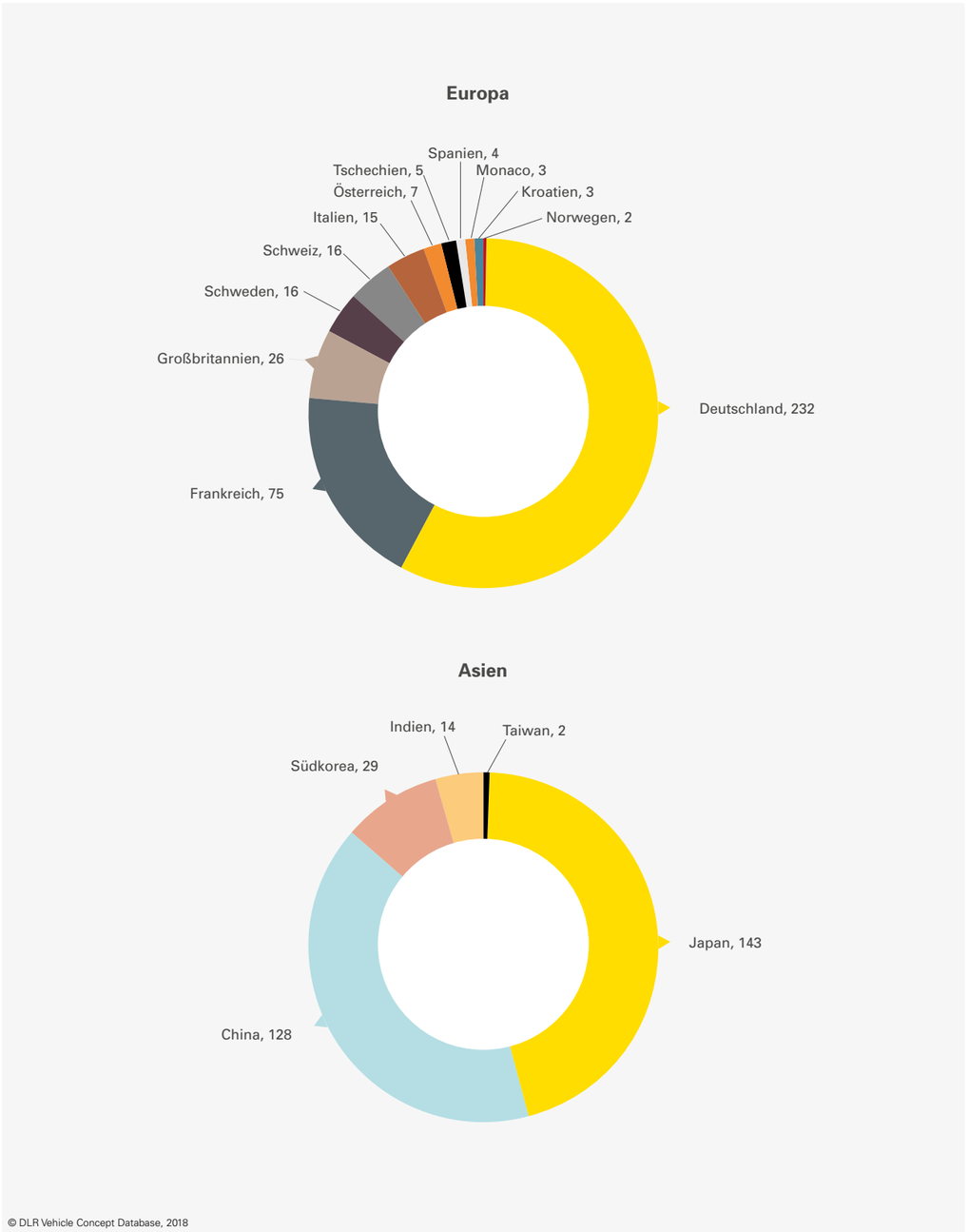
© DLR Vehicle Concept Database, 2018

Abbildung 4: Vorgestellte Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge nach Elektrifizierungsgrad, 2000–2017

Berücksichtigt wurden nicht nur die bereits in den Markt eingeführten Serienfahrzeuge, sondern auch die auf Automobilmessen vorgestellten Konzept- und Prototypenfahrzeuge (inkl. Designstudien) der OEM im Zeitraum von 2000 bis 2017. Dies erlaubt es, Schwerpunkte und Trends der Fahrzeughersteller im Zeitverlauf zu identifizieren und eine Tendenz abzuleiten, welche Antriebskonzepte in der Zukunft für sie besonders relevant sein könnten.

Insgesamt ist im genannten Zeitraum eine Gesamtanzahl von 809 elektrifizierten Fahrzeugen erfasst, davon 314 mit Serienankündigung. Der Schwerpunkt der Automobilhersteller lag mit großem Abstand bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen (426), gefolgt von Full-Hybriden (136) und Plug-in-Hybriden (112). Letztere jedoch gewannen in den vergangenen fünf Jahren gegenüber den Full-Hybriden immer mehr an Bedeutung.

Ein Großteil der vorgestellten E-Fahrzeuge stammt von europäischen Herstellern (404), danach folgen asiatische (316) und amerikanische (78). Abbildung 5 veranschaulicht, dass in der EU deutsche OEM mit 232 Fahrzeugen und über 55 % Anteil die Hauptakteure sind, gefolgt von Frankreich (75 PKW, 18 %) und dem Vereinigten Königreich (26 PKW, 6 %). In Asien führen japanische Hersteller mit 143 Fahrzeugen (44 %) knapp vor Anbietern aus China (128, 40 %). Südkoreanische Hersteller belegen mit 29 vorgestellten PKW (9 %) hier Platz 3. In China ist insbesondere in den letzten fünf Jahren ein sprunghafter Anstieg zu verzeichnen.



© DLR Vehicle Concept Database, 2018

Abbildung 5: Anzahl elektrifizierter Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge aus der Europa und Asien

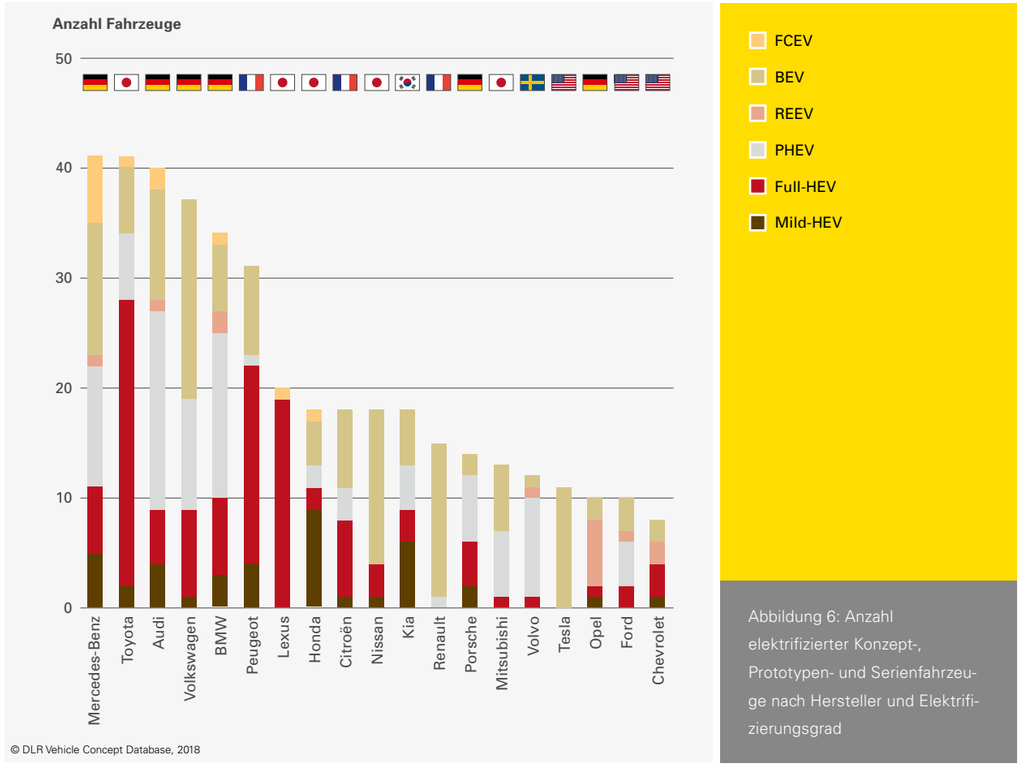


Abbildung 6: Anzahl elektrifizierter Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge nach Hersteller und Elektrifizierungsgrad

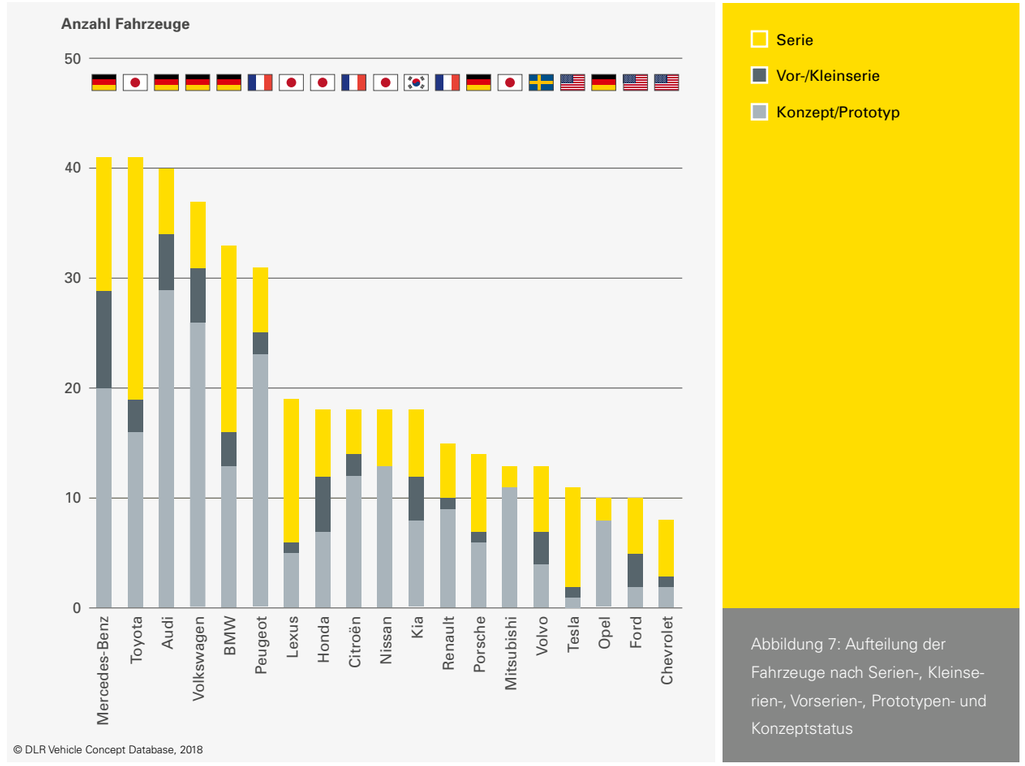


Abbildung 7: Aufteilung der Fahrzeuge nach Serien-, Kleinserien-, Vorserien-, Prototypen- und Konzeptstatus

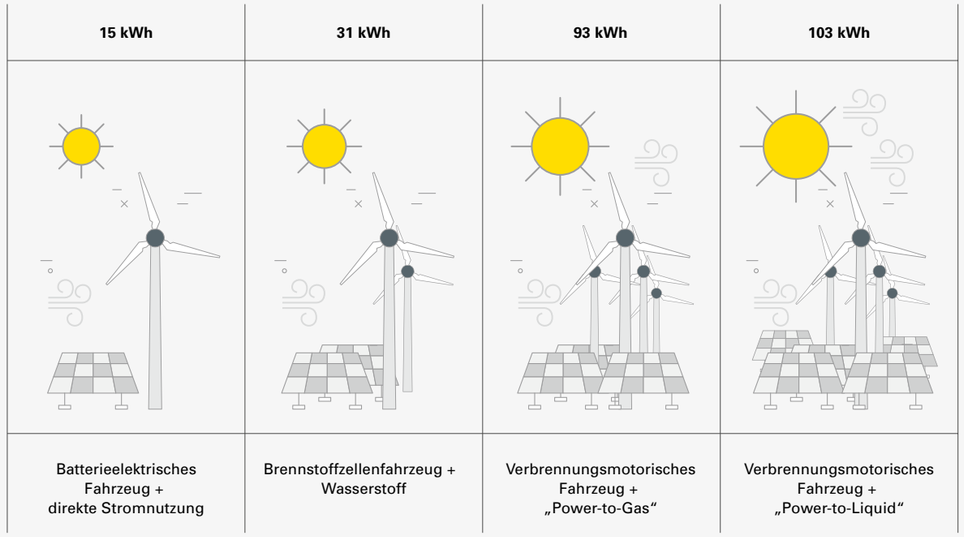
Die Analyse einzelner Automobilhersteller und ihrer Strategien bei der Vorstellung elektrifizierter PKW zeigt unterschiedliche Herangehensweisen (Abbildung 6): Bei weltweiter Betrachtung sind Mercedes-Benz (inkl. Smart) und Toyota mit jeweils 41 vorgestellten Fahrzeugen führend, gefolgt von Audi (40), Volkswagen (37), BMW (34) und Peugeot (31). Zu erkennen ist, dass im gesamten Zeitraum Toyota, Peugeot und Lexus einen Fokus auf Full-Hybrid-Antriebskonzepte setzten, Audi, BMW und Volvo hingegen ihren Schwerpunkt – vor allem in den letzten Jahren – eher auf Plug-in-HEV legten. Hohe Anteile rein batterieelektrischer Fahrzeuge sind bei Nissan und Volkswagen zu erkennen. Renault und Tesla konzentrieren ihre Entwicklungsarbeiten so gut wie ausschließlich auf BEV.

Allerdings erreichen nicht alle vorgestellten Fahrzeuge aus obiger Analyse auch Serienstatus. Wie Abbildung 7 zeigt, hat beispielsweise Audi zwar bislang insgesamt 40 E-Fahrzeuge präsentiert, davon sind jedoch nur elf für eine Serienproduktion (inkl. Vor- und Kleinserie) vorgesehen. BMW, Lexus und Tesla zum Vergleich haben von ihren 34, 20 und elf vorgestellten Fahrzeugen 20, 14 und zehn für eine Markteinführung angekündigt oder diese bereits realisiert.

Generell fokussierten die europäischen Hersteller bislang für Plug-in-/PHEV-Hybridfahrzeuge auf das SUV- und Luxussegment, wobei diese Technologie in der aktuellen Entwicklung auch immer mehr in das Segment der (oberen) Mittelklasse transferiert wird. Das Kleinst- und Kleinwagensegment spielt hier so gut wie keine Rolle, bedingt insbesondere durch den notwendigen Bauraum, die große Masse und die hohen Kosten der komplexen Hybridtechnik. Bei reinen Batteriefahrzeugen existiert bis zum jetzigen Zeitpunkt ein klarer Fokus auf das Kleinwagensegment zum einen und das Sportwagensegment zum anderen. Hybridfahrzeuge mit Range Extender sind bislang unterrepräsentiert, zu finden sind sie beispielsweise bei Opel (Ampera) bzw. baugleich bei Chevrolet (Volt) sowie außerdem bei BMW (i3).

Die großen Automobilhersteller verfolgen unterschiedliche Strategien der Elektrifizierung ihrer Produktpalette. Einerseits wird der konventionelle Antriebsstrang immer weiter entwickelt und immer stärker über hybride Antriebstechniken elektrifiziert, wobei deutsche Hersteller – auch wegen der Verbrauchsvorteile im NEFZ und bei der WLTP – bevorzugt Plug-in-Hybride ins Portfolio nehmen. Andere richten ihre Produktpalette auf reine Batteriefahrzeuge aus. Brennstoffzellenfahrzeuge sind ebenso auf dem Markt erhältlich (Toyota Mirai, Hyundai ix35 Fuel Cell), spielen bislang jedoch eine noch untergeordnete Rolle. Zudem verfolgen einige Hersteller die Kombination von Hybridisierung mit weiteren alternativen Antriebsformen und Kraftstoffen wie z. B. Erdgas oder synthetischen Kraftstoffen. Diese können auf Basis von CO_2, Wasser und erneuerbaren Energien gewonnen und entweder in gasförmiger Variante als Methan (Power-to-Gas) oder in flüssiger Form (Power-to-Liquid) bereitgestellt werden. Die Erzeugung und Bereitstellung dieser sogenannter E-Fuels verbraucht allerdings relativ viel Energie und erweist sich in der Lebenszyklusbetrachtung aufgrund der mehrfach notwendigen Energiewandlung gegenüber einer direkten Nutzung von Strom als Energieträger als weniger effizient. Synthetische Kraftstoffe können auch auf biologisch-chemischen Weg z.B. auf Basis von biologischer Restmasse hergestellt werden.

Generell bieten die drei Technologiepfade „Elektrifizierung", „Wasserstoff" und „SynFuels" jeweils spezifische und von den einzelnen Anwendungsfällen im Verkehr abhängige Vor- und Nachteile bei gesamtwirtschaftlicher und ökologischer Betrachtung. Im Sinne der Technologieoffenheit werden von Politik und Wirtschaft derzeit alle Optionen betrachtet und gezielt für die einzelnen Verkehrsarten (u. a. PKW, LKW, Nutzfahrzeuge, Bahn, Schiff, Flugzeug) weiterentwickelt. So könnten in der Zukunft zum Beispiel auch die Vorteile der unterschiedlichen technologischen Möglichkeiten für einzelne Anwendungen kombiniert werden.



© Agora Verkehrswende, 2017

Abbildung 8: Strombedarf aus erneuerbaren Energien für verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen (pro 100 km)

Ein Überblick über die Strategien ausgewählter europäischer OEM wird im Folgenden dargestellt, vergleichend werden Tesla und Toyota hinzugezogen. Gemeinsam ist allen, dass über die Entwicklung effizienter, verbrauchs- und emissionsarmer Fahrzeuge die Reduzierung u. a. des Flottenverbrauchs und des CO_2-Ausstoßes angepeilt wird, um auch die Gesetzesvorgaben in Bezug auf Schadstoffgrenzwerte einhalten zu können.

Audi will bis zum Jahr 2022 10 Mrd. Euro aus der Verbrennungstechnik abziehen und in Elektromobilität investieren, hat zudem sieben neue Elektrofahrzeuge angekündigt, drei rein elektrisch betriebene für Markteinführungen 2018, 2019 und 2020 (Modellreihe e-tron). Eine Kooperation mit Porsche soll eine gemeinsame Plattform für autonome und elektrifizierte Fahrzeuge sowie eine gemeinsame Komponentenentwicklung realisieren (Porsche AG, 2017). Zudem treibt Audi mit den „h-tron“-Modellen in mittlerweile sechster Generation ebenfalls die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie voran, eine erste Kleinserie ist für 2020 geplant. Neben der Elektrifizierung verfolgt Audi mit der „e-fuels“-Strategie auch die Entwicklung CO_2-armer oder -neutraler Kraftstoffe. Beim sogenannten E-Gas-Konzept wird z. B. auf Basis einer Power-to-Gas-Anlage überschüssiger regenerativ erzeugter Strom in Erdgas (Methan) gebunden, in das Erdgasnetz eingespeist und so gespeichert. Rechnerisch erzielen Audis „g-tron“-Modelle damit gegenüber fossilem Benzin eine Reduktion des CO_2-Ausstoßes um 80 % (DENA, 2016).

BMW nutzt das Label „Efficient Dynamics“, um elektrifizierte Modelle zu kennzeichnen, und verfolgt auf lange Sicht das Ziel der „Zero Emission Mobility“ (BMW AG, 2018). Zum einen werden konventionelle Antriebsstränge weiter optimiert, zum anderen Hybridfahrzeuge – insbesondere in den größeren Segmenten – eingeführt, die elektrische Leistung wird dabei kontinuierlich gesteigert. Zudem hat BMW bereits das reine Elektrofahrzeug i3 und den Plug-in-Hybrid i8 von Grund auf neu entwickelt, beide werden in Leipzig gefertigt. E-Fahrzeuge sollen ab dem Jahr 2020 für den Massenmarkt produziert werden – mit dem Ziel, 2025 insgesamt 25 elektrifizierte Modelle (davon zwölf rein elektrisch) anzubieten. Auch besteht eine Partnerschaft mit Toyota, um gemeinsame Forschung an Batterietechnologien zu betreiben. 2021 ist eine Kleinserie für Brennstoffzellenfahrzeuge geplant, ab 2025 sollen diese grundsätzlich auch einer breiteren Kundschaft angeboten werden (Reiche, 2017).

Daimler ist einer der Pioniere in der Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie, die nach wie vor Bestandteil der Daimler-Antriebsstrategie ist. Mit dem GLC F-Cell wurde auf der IAA 2017 ein Brennstoffzellen-Plug-in-Fahrzeug im Vorserienstatus vorgestellt, das 2019 in den Markt eingeführt wird (Daimler AG, 2018). Unter der Produktmarke EQ bündelt das Unternehmen Aktivitäten für eine intelligente Elektromobilität, „CASE“ (Connected, Autonomous, Shared & Service und Electric Drive) umfasst dabei die Eckpunkte der Unternehmensstrategie zur Entwicklung der Mobilität der Zukunft. Bis zum Jahr 2022 sollen mehr als zehn rein elektrisch betriebene Fahrzeuge im Rahmen der EQ-Familie zur Verfügung stehen. Hierfür sind ebenfalls Investitionen in Höhe von 10 Mrd. Euro angedacht (Daimler AG, 2018). Die Produktion soll zu diesem Zeitpunkt zu 15–25 % aus elektrischen Modellen bestehen. Neben der Entwicklung alternativer Antriebskonzepte ist auch die Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs ein Kernelement zur kurz- bis mittelfristigen Emissionsreduktion.

Bei **Porsche** soll laut Medienberichten bis zum Jahr 2023 jeder zweite verkaufte Neuwagen einen Elektroantrieb haben. Der auf der IAA 2015 vorgestellte Mission e soll 2019 auf dem Markt verfügbar sein, gefolgt von einem rein elektrischen SUV. Zudem will Porsche eine eigene Schnellladetechnologie auf 800-V-Basis einführen, mithilfe derer die Batterie innerhalb von 15 Minuten auf 80 % geladen werden kann (Eckl-Dorna, 2018).

Renault ist der einzige europäische Hersteller, der bislang eine Strategie mit Fokus auf reine Batteriefahrzeuge verfolgt hat, nun jedoch nach Beteiligung an Mitsubishi auch Plug-in-Hybride anbieten will. Nissan – als Teil der Allianz – hat dabei das erfolgreichste E-Auto in seinem Portfolio: den Nissan Leaf mit über 300.000 verkauften Einheiten. Eckpunkt der Strategie „Drive the Future“ ist die Markteinführung von acht batterie- und zwölf hybridelektrischen Fahrzeugen bis 2022 (Renault SA, 2017).

Tesla ist Vorreiter der rein batterieelektrischen Mobilität. Nach dem Tesla Roadster und den Modellen S und X wurde nun das Model 3 in den Markt eingeführt, das Batteriefahrzeuge auch im Segment der (gehobenen) Mittelklasse etablieren soll. Zudem hat Tesla ein eigenes Netz an Schnellladesäulen etabliert, das in den USA, Europa und Asien mittlerweile über 1.100 Supercharger mit einer Leistung von ca. 135 kW umfasst und z.T. kostenloses Laden für Tesla-Kunden ermöglicht. Angekündigt für 2019 ist neben einem rein elektrisch betriebenen LKW auch ein Kompakt-SUV (Model Y), 2020 sollen ein Pick-up und die nächste Generation des Roadsters folgen (Grundhoff, 2018).

Seit der Markteinführung des ersten Prius im Jahr 1997 ist **Toyota** als Pionier für Hybridfahrzeuge anerkannt und mit ca. 12 Mio. verkauften HEV weltweit Marktführer in diesem Segment. Während der japanische Hersteller in der Vergangenheit eine eher evolutionäre Entwicklung der Hybridtechnologie verfolgte und zudem seinen Entwicklungsfokus auf die Brennstoffzellentechnologie gelegt hat, sind mittlerweile auch rein batterieelektrische Fahrzeuge Teil der Unternehmensstrategie. So will der Konzern ab 2020 insgesamt zehn Modelle mit reinem Batterieantrieb auf den Markt bringen (Eckl-Dorna, 2017). Der Toyota Mirai wurde 2015 als erstes Brennstoffzellenfahrzeug in Großserie in Deutschland eingeführt.

Volkswagen hat bis 2022 Investitionen von ca. 34 Mrd. Euro in die Entwicklung von Elektrofahrzeugen, neuen Mobilitätsdiensten, des autonomen Fahrens sowie in die Digitalisierung angekündigt – mit dem Ziel, im Jahr 2025 1 Mio. E-Fahrzeuge zu verkaufen. Laut „Roadmap E“ sollen bis 2025 80 neue elektrifizierte Modelle angeboten werden, davon 50 rein elektrisch und 30 als Plug-in-Hybride. Bis 2030 sollen alle weltweit verfügbaren 300 Modelle des Konzerns in mindestens einer elektrifizierten Variante erhältlich sein (Volkswagen AG, 2017). Die für die Marke Volkswagen in der Modellfamilie I.D. zusammengefassten Aktivitäten zur Elektromobilität sollen zu einer Markteinführung konkurrenzfähiger batterieelektrischer Fahrzeuge ab dem Jahr 2020 führen, die dann in Zwickau gefertigt werden.

Volvo hat angekündigt, ab dem Jahr 2019 alle Neufahrzeuge mit Elektromotoren auszustatten, also zumindest zu hybridisieren. Für Hochleistungs-E-Fahrzeuge wurde mit „Polestar“ eine eigene Marke ins Leben gerufen, mit der vor allem Produkte in direkter Konkurrenz zum Tesla Model S entwickelt werden sollen (Grünweg, 2017).

Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt der Ankündigungen von Fahrzeugherstellern für elektrifizierte Fahrzeuge mit Perspektive bis 2022, untergliedert nach HEV, PHEV, BEV und FCEV sowie nach Fahrzeugsegmenten. Zusätzlich bis zum Jahr 2025 angekündigt sind Audi e-tron 5, e-tron 7 (2023), e-tron 9 Sportback, e-tron C-SUV (2024) und ein e-tron SUV (2025). Eine ähnliche Erweiterung des Portfolios wird bei BMW verfolgt. Hier sind i5, i7 (2023) sowie i8 und i5x (2024) als reine E-Fahrzeuge angekündigt.

© DLR Vehicle Concept Database, 2018

Abbildung 9: Übersicht zu Ankündigungen der Markteinführung elektrifizierter Fahrzeuge nach Herstellern

2.1.2 Technologien

Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge verändern sich auch wichtige Schlüsselkomponenten. Die neuen, modifizierten oder nicht mehr notwendigen Komponenten je Antriebskonzept veranschaulicht Tabelle 2 mit Zeithorizont 2030. Sie umfassen die wesentlichen Systeme, die für die Wertschöpfung der Fahrzeuge – und damit auch deren Beschäftigungspotenzial – relevant sind: Verbrennungsmotor inkl. Peripherie, Getriebe, E-Maschinen, Batteriesysteme, Leistungselektronik und Brennstoffzellensysteme.

Komponenten \ Antriebskonzepte	ICE	HEV	PHEV	REEV	BEV	FCEV
	Veränderungen der Systeme bis 2030					
Verbrennungsmotor	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Entfällt
Starter und Lichtmaschine	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Entfällt
Abgasanlage/Luftsystem	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Modifiziert
Kraftstoffversorgung	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Modifiziert
Getriebe	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert/ Entfällt	Modifiziert/ Entfällt	Modifiziert/ Entfällt
Elektrische Antriebsmaschine	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Batteriesystem für Antrieb	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Leistungselektronik	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Ladesystem intern	n.V.	n.V.	Neu	Neu	Neu	n.V.
Brennstoffzellensystem	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	Neu

© in Anlehnung an ELAB, 2012

Tabelle 2: Übersicht neuer, modifizierter und nicht mehr notwendiger Komponenten nach Antriebskonzept

Automobilhersteller, Zulieferer und Forschungsinstitutionen entwickeln die einzelnen Technologien und Komponenten kontinuierlich weiter, um sie zum einen technisch zu verbessern und leistungsfähiger zu machen und zum anderen kostengünstiger zu produzieren und somit gegenüber der Konkurrenz Wettbewerbsvorteile in der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität zu erlangen. Die Automobilhersteller setzen die Elektrifizierung ihres Fahrzeugangebots auch gezielt ein, um die EU-Gesetzesvorgaben bzgl. der CO_2-Grenzen in der Fahrzeugflotte einhalten zu können und keine Strafzahlungen leisten zu müssen. Übergeordnetes Ziel der Elektrifizierung ist, die Fahrzeuge energieeffizienter zu machen und damit Verbrauch und Emission zu verringern. Neben dem Ziel der Einhaltung der CO_2-Grenzwerte gibt es länderspezifische Treiber wie beispielsweise verbindliche Quoten für E-Fahrzeuge, wie sie in China ab 2019 erfüllt werden müssen (bis zu 12 %), aber auch mögliche Betriebs- oder gar Verkaufsverbote für Verbrennungsmotoren in der Zukunft, detailliert sind die politischen Rahmenbedingungen ausgesuchter Länder in Kapitel 2 beschrieben.

Die Entwicklung der unterschiedlichen Antriebskonzepte (konventionell, hybrid, elektrisch) wird von den meisten deutschen Herstellern derzeit parallel verfolgt, da sich noch nicht klar abzeichnet, welche Technologie sich zu welchem Zeitpunkt im Markt etablieren wird. Die Strategie ist mit der Herausforderung verbunden, dass hohe Forschungsausgaben anfallen und enorme Entwicklungskapazitäten aufgewendet werden müssen. Die Optimierung der konventionellen Fahrzeuge und Komponenten ist nach wie vor von hoher Relevanz. Hybride Antriebsstränge werden mehr und mehr elektrifiziert, um

schrittweise an Energieeffizienz zu gewinnen und CO_2-Emissionen zu senken. Ziel ist, dass ein lokal emissionsfreies Fahren mit rein batterieelektrisch betriebenen und Brennstoffzellenfahrzeugen im Volumensegment möglich ist. Durch die steigenden Produktionszahlen der elektrischen Komponenten sind kontinuierlich sinkende und letztlich mit konventionellen Fahrzeugen wettbewerbsfähige Preise bei ähnlichen oder gar besseren Fahreigenschaften zu erwarten (Woyczechowski, 2014).

Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors

© Porsche AG

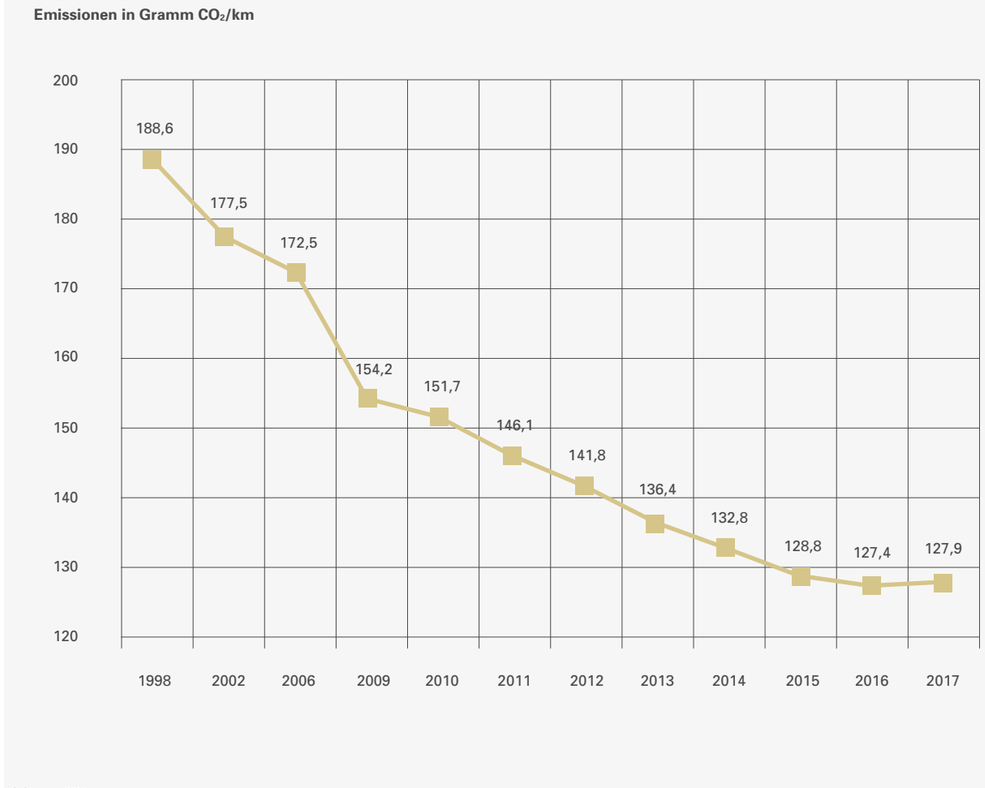
Der konventionelle Verbrennungsmotor spielt nach wie vor bei allen Antriebskonzepten – bis auf das reine Batteriefahrzeug und das Brennstoffzellenfahrzeug – eine wichtige Rolle. Entsprechend relevant ist die Weiterentwicklung dieser Komponente für die Automobilhersteller, z. B. zur Differenzierung von der Konkurrenz durch einerseits überlegene Fahrleistungen und andererseits weniger Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen.

Der Verbrennungsmotor bietet dabei weiterhin relativ hohe Potenziale zur Steigerung der Effizienz und des Wirkungsgrads: Das Optimierungspotenzial liegt bei Ottomotoren nach wie vor bei ca. 25–30 %, bei Dieselmotoren bei ca. 15–20 % (van Basshuysen und Schäfer, 2017). Erzielt werden können die Verbesserungen insbesondere durch die Verringerung von Wirkungsgradverlusten im Motor selbst sowie im kompletten Antriebsstrang, z. B. durch verbesserte Reibungseigenschaften und eine optimierte Verbrennung (2–5 % Verbrauchseinsparung), verbesserte (Direkt-)Einspritzung (bis zu 14 %), Zylinderabschaltung (5 %) sowie Aufladung und Downsizing des Motors, also eine Verringerung des Hubraums bei gleichzeitiger Installation von Turboladern (bis zu 19 %) (ECF, 2017). Nicht alle Maßnahmen sind miteinander kombinierbar. Der theoretisch effektiv erreichbare maximale Wirkungsgrad bei PKW-Ottomotoren liegt in vielen Betriebspunkten bei ca. 38 %, der von Dieselmotoren bei ca. 40 % (Schäfer, 2016). Zum Vergleich: Elektromotoren erzielen derzeit Wirkungsgrade von über 90 %. Elektrische Hilfsaggregate (Klimatisierung, Lenkung etc.) und die Peripherie werden daher zunehmend elektrifiziert bzw. aus dem Riementrieb herausgenommen.

Weiterhin verfolgen die Automobilhersteller Maßnahmen zur Weiterentwicklung im Zusammenhang mit dem Verbrennungsmotor, insbesondere in den Bereichen des Thermo- und Energiemanagements. In diesem Kontext relevant ist z. B. die Nutzung entstehender Verlust- und Abwärme des Verbrennungsmotors durch thermoelektrische Generatoren, die unter realen Fahrbedingungen alleine ein Effizienzpotenzial von ca. 2 % aufweisen, sowie durch neue oder verbesserte Systeme der Abgasrückführung und -nachbehandlung zur Reduktion klima- und gesundheitsschädlicher Abgasemissionen.

Der durchschnittliche CO_2-Ausstoß der in Deutschland neu zugelassenen PKW konnte durch die Weiterentwicklung der konventionellen Komponenten bereits von 189 g/km (1998) auf 128 g/km (2017) gesenkt werden (Abbildung 10) – und zwar trotz der seit 2008 im Durchschnitt um 15 kW auf heute 110 kW angestiegenen durchschnittlichen Motorleistung. Als direkte Folge des Downsizings konnte zudem eine ca. achtprozentige Reduzierung des Hubraums erzielt werden (UBA, 2017). Durch den sich abzeichnenden Trend zu weniger Dieselfahrzeugen und gleichzeitig größeren Fahrzeugen besteht ein Risiko, dass kurz- bis mittelfristig bei den CO_2-Flottengrenzwerten die Werte weiter stagnieren könnten. Derzeit ist sogar wieder eine steigende Tendenz zu erkennen: In den ersten sechs Monaten des Jahres 2018 erreichte der CO_2-Ausstoß neu zugelassener PKW in Deutschland einen durchschnittlichen Wert von 129,4 g/km. Weitere Maßnahmen, wie eine größere elektrische Flotte, werden in den kommenden Jahren eingeführt.

Die durchschnittlichen CO_2-Emissionen der deutschen Automobilhersteller sind aktuell zu hoch, um die durch die EU festgelegten Grenzwerte von 95 g/km (ab 2021) erfüllen zu können. Trotz der spezifisch für die Fahrzeuge erzielten Verbesserungen im Verbrauch (–13 %) ist insgesamt kein Rückgang der Verkehrsemissionen zu bemerken. Diese werden z. B. durch eine zunehmende Laufleistung – also mehr gefahrene km pro Fahrzeug – sogar überkompensiert (+16 %) (UBA, 2017).



© Statista, 2018

Abbildung 10: Entwicklung des durchschnittlichen CO_2-Ausstoßes von Neu-PKW in Deutschland 1998–2017

© ZF GmbH

Weiterentwicklung des Getriebes

Auch das Getriebe bietet Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz des konventionellen oder hybridisierten Fahrzeugs, wobei zwischen konventionellen Handschalt- und Automatik- sowie automatisierten Schaltgetrieben unterschieden werden kann. Doppelkupplungsgetriebe bieten das höchste Potenzial für Verbrauchseinsparung, je nach Fahrzeugsegment zwischen 3 % und 6 %.

Bei elektrifizierten Fahrzeugen, vor allem bei Hybriden, werden Bedeutung und Verbreitung von Automatikgetrieben in der Zukunft weiter zunehmen. Die Herausforderung der tech-

nischen Entwicklung besteht hier in der Realisierung von Hybridgetrieben, die reibungsoptimiert an die komplexen Anforderungen des Zusammenspiels von mechanischen und elektrischen Komponenten auf engstem Bauraum angepasst sind. Ein Trend liegt beispielsweise in der Integration von Getriebe und E-Maschine in einer einzigen kompakten Einheit.

Neben der Optimierung der Reibungseigenschaften sind zusätzliche Potenziale zur Reduktion von Verbrauch und Emission in der je nach Fahrsituation optimal gewählten Übersetzung zu finden. Der Verbrennungsmotor soll also möglichst oft und möglichst lange im Betriebsoptimum bei einer bestimmten Drehzahl gehalten werden. Dies wird derzeit von fast allen Herstellern durch eine weitere Steigerung der Gangzahl – bei Doppelkupplungsgetrieben bis hin zu 8- oder 9-Gang-Getrieben – angepeilt. Zudem werden die Getriebe zunehmend so ausgelegt, dass eine weite Spreizung der höheren Gänge umgesetzt wird. Dies führt zu letztlich geringeren Drehzahlen bei hohen Geschwindigkeiten und entsprechend weniger Kraftstoffverbrauch (ca. 4 % Effizienzpotenzial) (ECF, 2017).

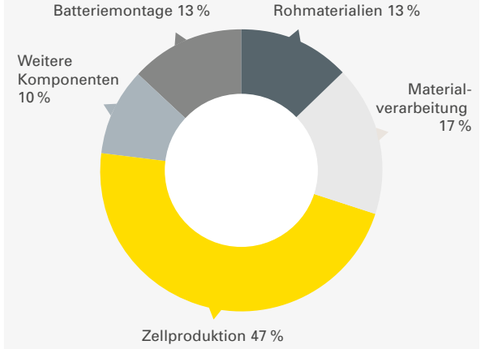
Bei reinen Elektrofahrzeugen kann das automatische Getriebe entweder stufenlos oder ein- bzw. zweistufig ausgelegt sein. Zweistufige Getriebe bieten insofern Vorteile, als sie sowohl hohes Drehmoment bei der Beschleunigung (z. B. beim Anfahren) als auch einen effizienteren Betrieb bei höheren Geschwindigkeiten bieten.

Weiterentwicklung der Batteriesysteme

© Opel AG

Die Batterie ist ein Kernelement aller elektrifizierten Fahrzeuge. Sie speichert die für den Vortrieb notwendige Energie in den Batteriezellen und gibt sie bei Bedarf an den Elektromotor ab. Die größte technische Herausforderung liegt in der Entwicklung leistungsfähiger und kostengünstiger Batteriesysteme, um elektrische Reichweiten zu realisieren, die mit den heutigen konventionell betriebenen Fahrzeugen konkurrieren können – zu ähnlichen Kosten. Ausschlaggebend hierfür ist insbesondere die im Vergleich zu Benzin oder Diesel geringere Energiedichte der Batterien: Während für 100 km Reichweite nur 6 bis 7 kg konventioneller Kraftstoff (inkl. Speichersystem) im Fahrzeug nötig sind, steigt dieser Wert auf über 130 kg bei heutigen Batteriesystemen. Höhere Energiedichten zu erreichen, steht entsprechend im Fokus der Forschung und Entwicklung zu Batteriesystemen.

Kurz- bis mittelfristig besitzen Batteriezellen mit Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) das größte Potenzial. Diese werden schon heute in fast allen relevanten elektrifizierten Fahrzeugkonzepten eingesetzt. Neben den Zellen umfasst das Batteriesystem im Fahrzeug auch das Batteriemanagement (inkl. Zellmonitoring), die Elektronik und Sensorik, Komponenten zur Kühlung, Sicherheitselemente sowie das Batteriegehäuse. Der Hauptanteil der Wertschöpfung liegt mit ca. 60–80 % jedoch bei den Batteriezellen (inkl. Material) selbst. Abbildung 11 stellt exemplarisch die Kostenstruktur einer Traktionsbatterie dar, unterteilt nach den Anteilen der Materialien, der Batteriezelle und des Batteriesystems (inkl. Montage) an den Gesamtkosten.



© Roland Berger, 2011

Abbildung 11: Kostenzusammensetzung einer exemplarischen Traktionsbatterie

Zurzeit ist mit der Einführung der „zweiten Generation" an Elektrofahrzeugen (wie dem Opel Ampera-E oder Tesla Model 3) eine Erhöhung der Reichweiten im kleinen bis mittleren Segment von ca. 150–200 km auf ca. 300–350 km zu beobachten. Premiummodelle sowie batterieelektrische Fahrzeuge im großen Segment (beispielsweise das Tesla Model S) erzielen durch sehr große Batterien Reichweiten von ca. 500 km im normierten Testzyklus. In der Realität sind diese Reichweiten jedoch sowohl aufgrund des Verbrauchs durch eine Vielzahl von Nebenaggregaten (Klimaanlage, Heizung etc.) und eines anderen Fahrverhaltens mit oftmals stärkeren und häufigeren Beschleunigungsvorgängen als auch aufgrund von Fahrten mit höheren Geschwindigkeiten um ca. 20–30 % geringer. Auch in kleineren Segmenten kündigen die Hersteller eine Erhöhung der installierten Batteriekapazitäten an, so z. B. eine Verdopplung für den Renault ZOE mit 41 kWh oder den BMW i3 mit 33 kWh, um Reichweiten von ca. 300 km im Normzyklus zu erreichen. Die Kunden werden in der Zukunft aller Voraussicht nach beim Autokauf zwischen verschiedenen Batteriegrößen wählen können, um die für ihren individuellen Gebrauch relevanten Anforderungen mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis umsetzen zu können.

Für die Zukunft könnten z. B. Lithium-Schwefel- und Feststoffkörper- sowie ab 2030 Lithium-Luft-Batterien Potenzial besitzen. Diese haben unter Laborbedingungen zum Teil bereits vielversprechende Ergebnisse produziert, jedoch befinden sich diese Technologien nach wie vor in einer noch relativ frühen Phase der Entwicklung. Schwierigkeiten bestehen beispielsweise in der Realisierung einer ausreichenden Zyklenstabilität und Lebensdauer. Elektrifizierte Fahrzeuge könnten mit diesen Technologien in der Zukunft im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen konkurrenzfähige Reichweiten zu vergleichbaren Kosten erzielen. Tabelle 3 stellt die wichtigsten Batterietechnologien und deren theoretische Eigenschaften in Bezug auf eine Anwendung im Automobilbereich gegenüber.

	Nickel-Metall-Hydrid (NiMH)	Lithium-Ionen (Li-Ion)	Lithium-Schwefel (Li-S)	Lithium-Luft (Li-Luft)
Energiedichte (Wh/kg)	< 80	100–350	600–1.100	600–1.600
Leistungsdichte (W/kg)	1.000	1.000–4.000	< 1.000	150
Zyklenstabilität	< 1.000 Zyklen	< 4.000 Zyklen	< 4.000 Zyklen	< 4.000 Zyklen
Kalendarische Lebensdauer	< 10 Jahre	5–15 Jahre	Bis zu 15 Jahre	Bis zu 15 Jahre

Tabelle 3: Theoretische Potenziale unterschiedlicher Batterietechnologien für Automobilanwendungen im Vergleich

© eMAP, 2015

Für das Energiespeichersystem im Auto sind die folgenden Eigenschaften von besonderer Bedeutung:

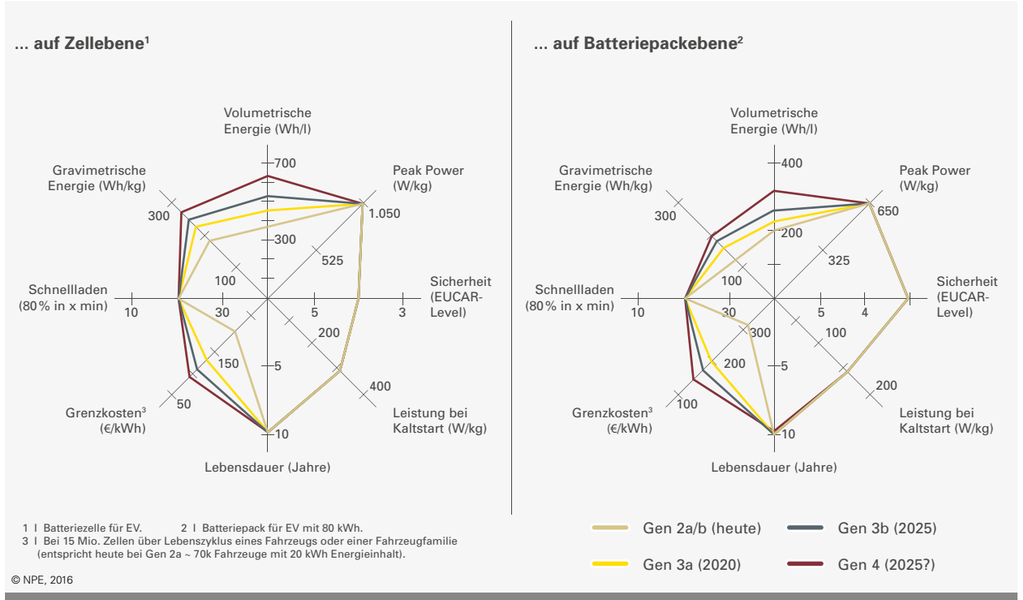
- Energiedichte (Wh/kg bzw. Wh/l),
- Leistungsdichte (W/kg bzw. W/l),
- Zyklenstabilität und kalendarische Lebensdauer.

Die Energiedichte ist der kritische Faktor eines Batteriesystems, da sie direkt mit der erzielbaren elektrischen Reichweite zusammenhängt. Sie kann als volumetrische (Wh/l) und als gravimetrische (Wh/kg) Energiedichte beschrieben werden. Bei derzeitigem Stand der Technik können mit Li-Ion-Systemen Energiedichten von ca. 200 Wh/kg auf Zellebene realisiert werden, die theoretische Grenze liegt bei ca. 350 Wh/kg. Im Vergleich zu den in konventionellen Kraftstoffen gespeicherten Energien (Benzin: 12.800 Wh/kg, Diesel: 11.800 Wh/kg) ist dies aber nach wie vor deutlich geringer. Auf Systemebene, also bei Betrachtung des gesamten Batteriesystems inkl. Gehäuse, Kühlung, Separatoren etc., ist die effektive erzielte Energiedichte im Fahrzeug aufgrund von Wirkungsgradverlusten nochmals geringer. Dies bedeutet, dass die Erhöhung der Energiedichte ein wichtiges Entwicklungsziel ist, um längere Reisedistanzen auch ohne Zwischenladung zu ermöglichen.

Die Leistungsdichte ist ein weiterer wichtiger Faktor eines Energiespeichers. Sie stellt die für die Beschleunigung relevante Leistung dar, die pro Kilogramm Batteriemasse (W/kg) oder Batterievolumen (W/l) bereitgestellt werden kann. Hohe Leistungsdichten sind insbesondere bei Hybridfahrzeugen relevant, während in Batteriefahrzeugen zur Erzielung hoher Reichweiten v. a. Batterien mit hoher Energiedichte eingesetzt werden. Beeinflusst wird die Leistungsdichte im System durch die Reaktionsrate des Transfers von Elektronen und Ionen, wobei große Oberflächen zwischen Elektroden und Elektrolyt positiv auf diesen Austausch wirken. Auch kann durch eine hohe Leistungsdichte nicht nur die Abgabe von Energie, sondern auch die Aufnahme beschleunigt werden. Eine hohe Leistungsdichte kann damit die Ladezeit der Batterie verkürzen.

Die Lebensdauer einer Traktionsbatterie ist abhängig vom tatsächlichen Lebensalter und von der Zyklenstabilität, also der Anzahl an partiellen oder vollen Auf- und Entladevorgängen, die sukzessive einen Verlust an Energie- und Leistungsdichte des Batteriesystems bewirken. Während kleinere hybridelektrische Fahrzeuge auf ausreichende Teilzyklenstabilität angewiesen sind, da sie im „Charge Sustaining"-Modus (CS) betrieben werden, müssen reine Batteriefahrzeuge eine ausreichende volle Zyklenstabilität aufweisen, da sie im „Charge Depleting"-Modus (CD) arbeiten. Plug-in-Hybridfahrzeuge müssen in beiden Modi operieren können (Böhme und Frank, 2017). Generell wird davon ausgegangen, dass die derzeit im Fahrzeug verbaute Batterie mindestens die Lebensdauer des Gesamtfahrzeugs besitzt, was ca. 15 Jahre oder 200.000 bis 250.000 km Laufleistung bedeutet. Der derzeitige Stand der Technik bei Batteriesystemen für den Automotive-Bereich ermöglicht ca. 3.000 reversible Ladezyklen (Füßel, 2017). Der Alterungsprozess wird zudem maßgeblich durch Temperatur und Qualität des Batteriemanagementsystems beeinflusst, beispielsweise beim Schnellladevorgang: Die hierfür notwendigen hohen Ladeströme erwärmen die Batterie und führen zu einer beschleunigten Alterung der Elektroden und des Elektrolyts.

Zusätzlich zu den technischen Anforderungen einer ausreichenden Leistungsfähigkeit besteht in den Bereichen Crashsicherheit, Thermomanagement, Batteriemanagement und Recycling Forschungsbedarf. Die folgende Abbildung stellt die Key-Performance-Parameter aus Sicht der Fahrzeughersteller bei batterieelektrischen Fahrzeugen auf Batteriezell- und -packebene für heutige und zukünftige Batteriegenerationen im Vergleich dar.



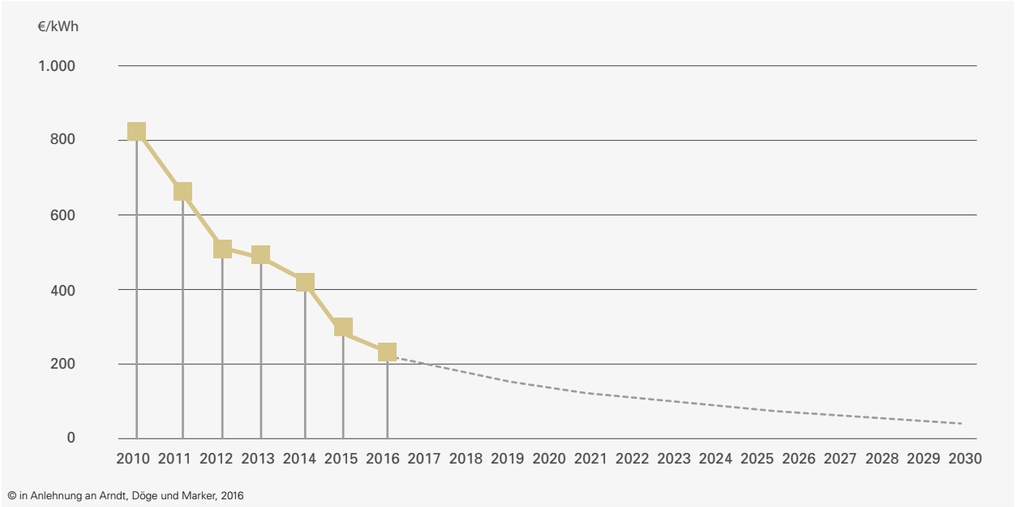
1 I Batteriezelle für EV. 2 I Batteriepack für EV mit 80 kWh.
3 I Bei 15 Mio. Zellen über Lebenszyklus eines Fahrzeugs oder einer Fahrzeugfamilie (entspricht heute bei Gen 2a ~ 70k Fahrzeuge mit 20 kWh Energieinhalt).

© NPE, 2016

Abbildung 12: Key-Performance-Parameter aus Sicht der Kunden/OEM für BEV

Die zukünftige Verfügbarkeit des für die Umsetzung der Elektromobilität entscheidenden Rohstoffs Lithium ist z.T. durch geostrategische Verhältnisse geprägt. Die Entwicklung eines freien Markts für Lithium könnte so erschwert werden. Die derzeit bekannten globalen Lithium-Vorkommen belaufen sich auf ungefähr 30 Mio. t, wovon ca. 20 Mio. t auf Südamerika entfallen. Ein Elektrofahrzeug benötigt ca. 0,1–0,15 kg Lithium je kWh, sodass die Masse sich auf ca. 3 kg für kleinere E-Fahrzeuge und 10–15 kg für größere beläuft (eMAP, 2015). Die Gefahr einer Verknappung angesichts der verfügbaren geologischen Ressourcen wird auch bei steigendem Bedarf durch die Elektrifizierung für Lithium eher nicht gesehen. Hingegen wird die Verfügbarkeit von Kobalt in Untersuchungen als kritischer bewertet. Nach derzeitiger Einschätzung könnten sich dessen begrenzte Reserven als limitierender Faktor für die Batterieproduktion erweisen. Die derzeit monopolistische Versorgungssituation aus dem Kongo ist verknüpft mit politischen Risiken und sozial problematischen Bedingungen in Bezug auf die Arbeitsbedingungen beim Abbau des Rohstoffs (e-mobil BW, 2017). Risiken ergeben sich weiterhin aus der Entwicklung der Rohstoffpreise: So ist beispielsweise der Preis für Kobalt von ca. 24.000 Dollar je Tonne im Jahr 2016 auf ca. 78.000 im Jahr 2018 gestiegen (Lindinger, 2018). Weitere potenziell kritisch verfügbare Rohstoffe sind Kupfer, Neodym und Dysprosium (e-mobil BW, 2017).

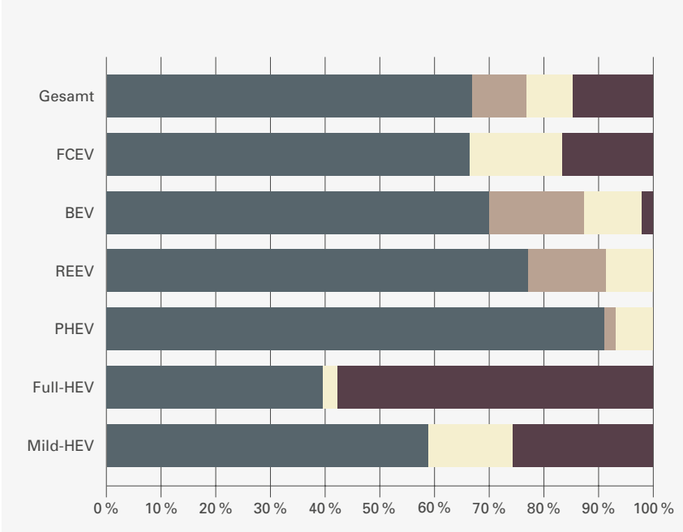
Eine marktnahe Anwendung der alternativen Batterietechnologien (Lithium-Schwefel, Lithium-Luft, Feststoffkörper) wird in den nächsten 10–15 Jahren erwartet. Bis dahin aber entwickeln sich auch die derzeitigen Lithium-Ionen-Batterien weiter – nicht nur über technische Verbesserungen, sondern auch über sinkende Kosten. Durch die zunehmende Nachfrage nach Batteriezellen und Verbesserung der Fertigungstechnologie können Skaleneffekte in der Produktion realisiert werden, die zu kostengünstigerer Herstellung und damit zu abnehmenden Preisen führen. Sofern diese Effekte an den Endkunden weitergegeben werden, könnten die Preise für Hybrid- und Elektrofahrzeuge deutlich sinken und mit denen konventionell angetriebener Fahrzeuge konkurrieren. Aktuelle Studien weisen bereits Kostenreduktionen auf ca. 200 Euro/kWh auf Systemebene nach – eine Reduktion um ca. 80 % in den letzten sieben Jahren. Im Jahr 2010 betrugen die Herstellkosten noch zwischen 600 und 900 Euro pro kWh. Abbildung 13 stellt den aus aktuellen Studien ableitbaren Entwicklungsverlauf der Herstellkosten von Lithium-Ionen-Batterien auf Systemebene dar.



© in Anlehnung an Arndt, Döge und Marker, 2016

Abbildung 13: Entwicklung der Li-Ion-Batteriekosten (Systemebene) 2010–2016 und erwartete Entwicklung

Der Stand der Technik ist bei den stärker elektrifizierten Hybrid- und Batteriefahrzeugen vor allem die Lithium-Ionen-Batterie. Energiespeicher auf Nickel-Metallhydrid-Basis wurden bislang hauptsächlich in Mild- und Full-Hybrid-Fahrzeugen eingesetzt, wie Abbildung 14 verdeutlicht. Als spezifische Bauform des Lithium-Ionen-Akkus spielen auch Materialkombinationen wie Lithium-Eisenphosphat und Lithium-Polymer bei den vorgestellten Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeugen eine Rolle.

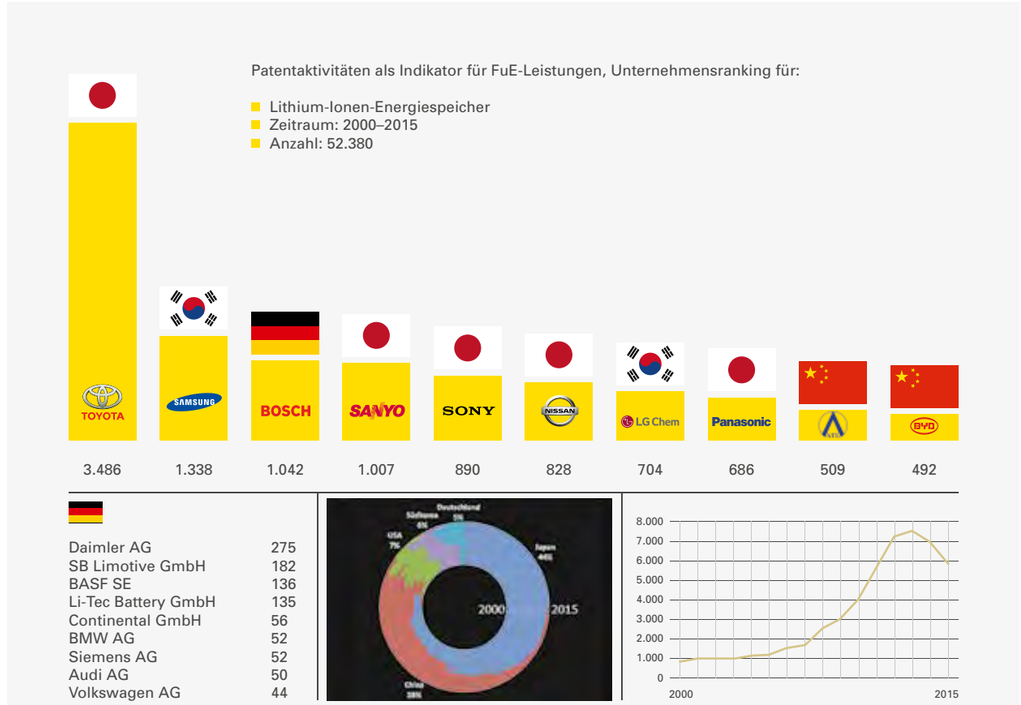


© DLR Vehicle Concept Database, 2018

Abbildung 14: Anteil ausgewählter Batterietechnologien nach Antriebskonzept

Bei Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Bezug auf die Lithium-Ionen-Batterie sind weltweit sowohl die Automobilhersteller selbst und deren Zulieferer als auch Forschungsinstitutionen, Universitäten sowie etablierte Technologiekonzerne wie Samsung, LG und Panasonic aktiv. Neben der E-Maschine und der Leistungselektronik ist dies die wichtigste Technologie der Elektromobilität. Durch einen etwaigen technologischen Vorsprung im Sinn überlegener Leistungseigenschaften der Batterie oder effizienterer Produktionsprozesse können Hersteller Wettbewerbsvorteile gegenüber der Konkurrenz erlangen und die Attraktivität ihres Produkts steigern. Die Batterie ist auch für das Endprodukt ein marktdifferenzierender Faktor, da sie erheblich die Produktkosten, die Ladefähigkeit und die Reichweite ebenso wie die Fahrdynamik (z. B. Beschleunigungsfähigkeit) beeinflusst. Die FuE-Ausgaben der Unternehmen sind demnach Investitionen in technologische Vorteile, die möglichst konkret in Produkte Eingang finden sollen. Patente schützen das gewonnene Know-how für die Hersteller und stellen sicher, dass die Erfindung nicht (straffrei) kopiert werden kann. Entsprechend groß ist der Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen auf der einen und Patentanmeldungen auf der anderen Seite, da diese oftmals direktes – und messbares – Ergebnis der Aufwendungen sind.

Abbildung 15 stellt die Patentsituation im Bereich Lithium-Ionen-Energiespeicher der Jahre 2000 bis 2015 dar. Im Detail abgebildet sind die führenden Patentanmelder auf internationaler Ebene (Top 10) sowie eine Rangliste der folgenden deutschen Unternehmen. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum weltweit über 52.000 Patente im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie angemeldet. Während bis 2007 ein zwar stetiges, aber relativ flaches Wachstum mit jährlichen Anmeldungen von ca. 1.000 bis 1.500 Patenten zu verzeichnen war, nahm dieses Wachstum bis 2013 erheblich zu und erreichte einen Höchststand von 7.500.



© DLR TechScout

Abbildung 15: Patentanalyse für Lithium-Ionen-Energiespeicher, 2000–2015

Die höchsten Anteile an den Patenten haben Institutionen und Firmen aus Japan, China, den USA, Südkorea und Deutschland. Toyota ist mit Abstand führend (Japan, 3.486 Patentanmeldungen), gefolgt von Samsung (Südkorea, 1.338) und Bosch als erstem deutschen Unternehmen (1.042). Sanyo (1.007), Sony (890), Nissan (828) und Panasonic (686) sind als weitere Vertreter mit Hauptsitz in Japan unter den Top 10. LG Chem auf Platz 7 (704) stellt das zweite südkoreanische Unternehmen in der Rangliste dar. Zwei chinesische Unternehmen in der Rangliste sind: Amperex Technology (509) auf Rang 9 und BYD (492) auf Rang 10. Dies zeigt, dass aktuell der chinesische Markt nicht nur für die Patentanmelder eine große Rolle spielt, sondern dass dort mittlerweile auch konkrete Technologieentwicklung stattfindet. Unter den weiteren deutschen Unternehmen sind als OEM Daimler (275), BMW (52), Audi (50) und VW (44) gelistet.

Exkurs:

Die Patentanalyse dient als originäres Instrument der strategischen Unternehmensführung zur Untersuchung wettbewerbsrelevanter Aktivitäten in definierten Technologiefeldern und zielt als Planungs- und Entscheidungshilfe auf die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für das Technologiemanagement ab (Chang, 2012). Zu diesem Zweck werden der enge Zusammenhang zwischen Investitionen im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) als Inputfaktor und Patentanmeldungen als Outputfaktor herangezogen. Patente beinhalten per Definition Erfindungen (Inventionen), die über den jeweils aktuellen Stand der Technik hinausgehen und in zukünftigen Produkten in konkreter Anwendung (Innovation) mit wirtschaftlichem Interesse Verwendung finden können (Pienkos, 2004).

Neben der Nutzung als strategisches Planungstool ist die Patentanalyse zur Darstellung technologieorientierter Wettbewerbs- und Trendanalysen geeignet. Patentinformationen werden damit als Indikatoren technologischer Trends und Entwicklungen sowie zur Bewertung der relativen Stärke von Technologieposition und Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich von Institutionen, Ländern und/oder Weltregionen genutzt.

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden insgesamt 150.191 Patente im Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeuge erfasst, die als relevant für den Antriebsstrang elektrifizierter PKW bewertet und deshalb für die nachfolgende Analyse herangezogen wurden. Die jeweiligen Such- und Recherchestrategien in den Themenfeldern „Lithium-Ionen-Energiespeicher", „E-Maschine" und „Leistungselektronik" wurden in den Datenbanken Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO) in Kombination von IPC-Klassen (International Patent Classification, z. B. B60L, B60K, B60W, H02K, H02W, H01F) und Schlüsselworten ausgeführt.

Weiterentwicklung des Elektromotors

© Bosch

Der Elektromotor übernimmt in reinen Batterie- und auch in Brennstoffzellenfahrzeugen komplett den Vortrieb. Bei Hybridfahrzeugen hingegen werden die Drehmomente beider Motoren kombiniert, meist durch eine direkte Kopplung von Elektro- und Verbrennungsmotor über ein Stirnradgetriebe oder eine Kette. So können z. B. bei Beschleunigungsvorgängen bessere Fahrleistungen erzielt werden (Boost).

Die im Fahrzeug verbaute E-Maschine ist hocheffizient mit Wirkungsgraden über 90 %. Sie kann in den meisten Fällen zudem sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden, um Energie beim Bremsvorgang rückzugewinnen und wieder in die Batterie einzuspeisen. Dies erhöht die Gesamteffizienz des Antriebsstrangs und die Bremsenergie wird nicht vollständig in Wärme umgesetzt.

Obwohl die elektrische Maschine eine reife Technologie ist und seit Jahrzehnten in unterschiedlichen Varianten Anwendung findet, investieren OEM und Zulieferer in die Weiterentwicklung der Technologie, um die speziellen Anforderungen an E-Motoren im Automotive-Bereich zu bedienen. Generell liegen diese – neben Leistungseigenschaften – in der Realisierung ausreichender Dauerhaltbarkeit, Temperaturbeständigkeit und Wartungsfreiheit.

Diesbezügliche FuE-Aktivitäten konzentrieren sich hauptsächlich auf das Ziel, den Wirkungsgrad und die Leistungsdichte des E-Motors weiter zu steigern. So können z. B. Größe und Masse der E-Maschine reduziert werden. Die Zielwerte liegen bei bis zu 5 kW/kg, wobei derzeit ca. 2 kW/kg erreicht werden. Zudem ist die Weiterentwicklung geeigneter Produktionsprozesse (v. a. für die Wicklung und Magnetisierung) sowie zur Reduzierung des Materialeinsatzes bedeutsam, da diese Aspekte einen beträchtlichen Teil der Herstellkosten einer E-Maschine ausmachen. Auch ist die Substitution kostenintensiver und teilweise schwer verfügbarer Seltenerdmetalle wie Neodym und Dysprosium wichtig, die z. B. in permanentmagnetisch erregten Synchronmaschinen verwendet werden (ELAB, 2012).

Grundsätzlich lassen sich bei E-Maschinen vier Funktionsweisen unterscheiden: Gleichstrommotoren, Asynchronmotoren, Synchronmotoren und Reluktanzmotoren. Im Automotive-Bereich werden aktuell permanent erregte Synchronmotoren bevorzugt eingesetzt, v. a. aufgrund überlegener Eigenschaften in Bezug auf Wirkungsgrad, Leistungsdichte und thermische Stabilität. Zudem können sie relativ kompakt gebaut werden, sodass die insbesondere in Hybridfahrzeugen auftretende geringe Bauraumverfügbarkeit besser gehandhabt werden kann. Auch elektrisch erregte Synchronmaschinen (ohne Permanentmagnete) sowie robuste, aber größere und schwerere Asynchronmaschinen könnten in der Zukunft eine Rolle spielen. Allerdings hängt dies auch von der Preisentwicklung der Seltenerdmetalle ab. Zurzeit werden Asynchronmaschinen z. B. von Tesla und Daimler eingesetzt. Der in Abbildung 16 dargestellte hohe Anteil fremderregter E-Motoren beim Brennstoffzellenfahrzeug ist so u. a. auch auf die bei Daimler – z. B. in der A-Klasse F-Cell – genutzte Motorentechnologie zurückzuführen.

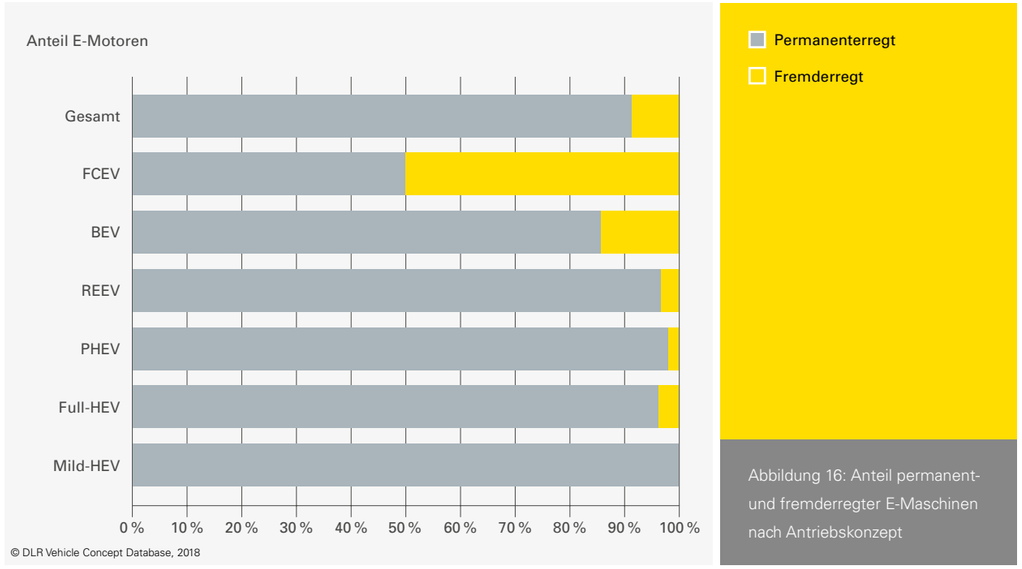


Abbildung 16: Anteil permanent- und fremderregter E-Maschinen nach Antriebskonzept

Auch der Einbauort der E-Maschine(n) im Fahrzeug lässt sich unterschiedlich realisieren: zentral im Fahrzeug, radnah auf der Achse oder als Radnabenantrieb im Rad selbst verbaut. Bei Hybridfahrzeugen ist der E-Motor meist in kompakter, hochintegrierter Form im Hybridgetriebe installiert. Alle Varianten besitzen spezifische Vor- und Nachteile, wobei bei reinen E-Fahrzeugen die zentrale oder radnahe Variante derzeit von den Herstellern favorisiert wird, wie Abbildung 17 zeigt. Ein Trend geht so beispielsweise auch zur Entwicklung von Antriebssystemen, die hochintegriert in den Achsen selbst verbaut sind. Deren Kern beinhaltet dann einen mittig positionierten E-Motor, das Getriebe (meist ein zweistufiges 1-Gang-Getriebe), das Differenzial, die Leistungselektronik sowie Kühlelemente und das Gehäuse.

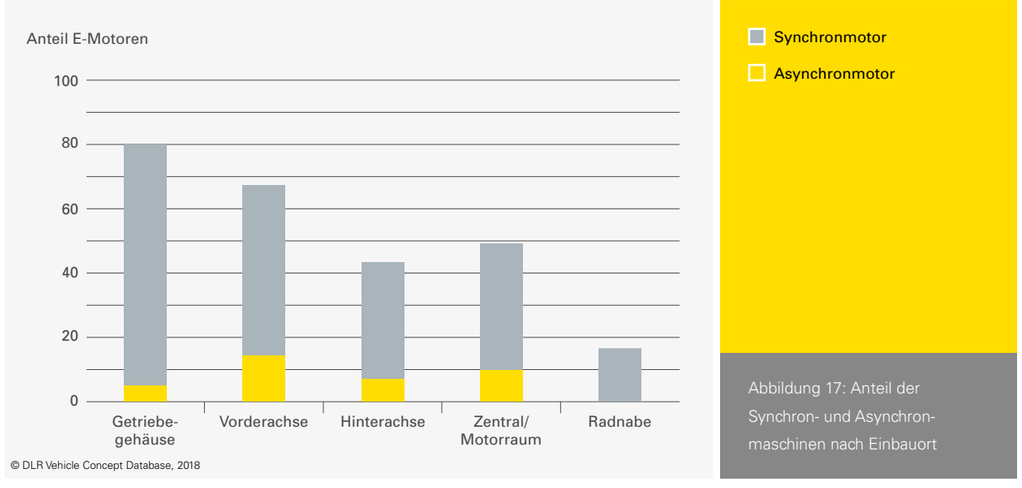


Abbildung 17: Anteil der Synchron- und Asynchronmaschinen nach Einbauort

Aktuell steigende Patentierungsaktivitäten sind auch auf FuE-Arbeiten zu diesen hochintegrierten Antriebsachsen zurückzuführen. Die Patentanalyse in Bezug auf elektrische Maschinen für den Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge zeigt über den gesamten Zeitraum einen konstant starken Anstieg: Während im Jahr 2000 nur 1.209 Erfindungen geschützt wurden, waren es 2015 insgesamt 8.986.

Die Unternehmen mit den größten Patentportfolios illustriert Abbildung 18. Toyota führt die Rangliste mit insgesamt 3.616 Patenten an, gefolgt von Bosch (2.113) und Honda (1.473). Auf den Rängen 4 bis 9 folgen japanische Zulieferer wie Sumitomo Electric Industries (1.432) und die JTEKT Corporation (1.082), aber mit Nissan (1.114) auch ein weiterer japanischer OEM. Die Top 10 komplettiert als zweitbestes deutsches Unternehmen die Daimler AG mit insgesamt 776 Patentanmeldungen. Weitere deutsche OEM sind mit VW (389), BMW (368), Audi (290) und Porsche (176) vertreten.

Weiterentwicklung der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik ist neben der Batterie und dem Elektromotor eine Schlüsseltechnologie der Elektrifizierung. Hauptaufgabe der Komponente ist es, die Energieflüsse im

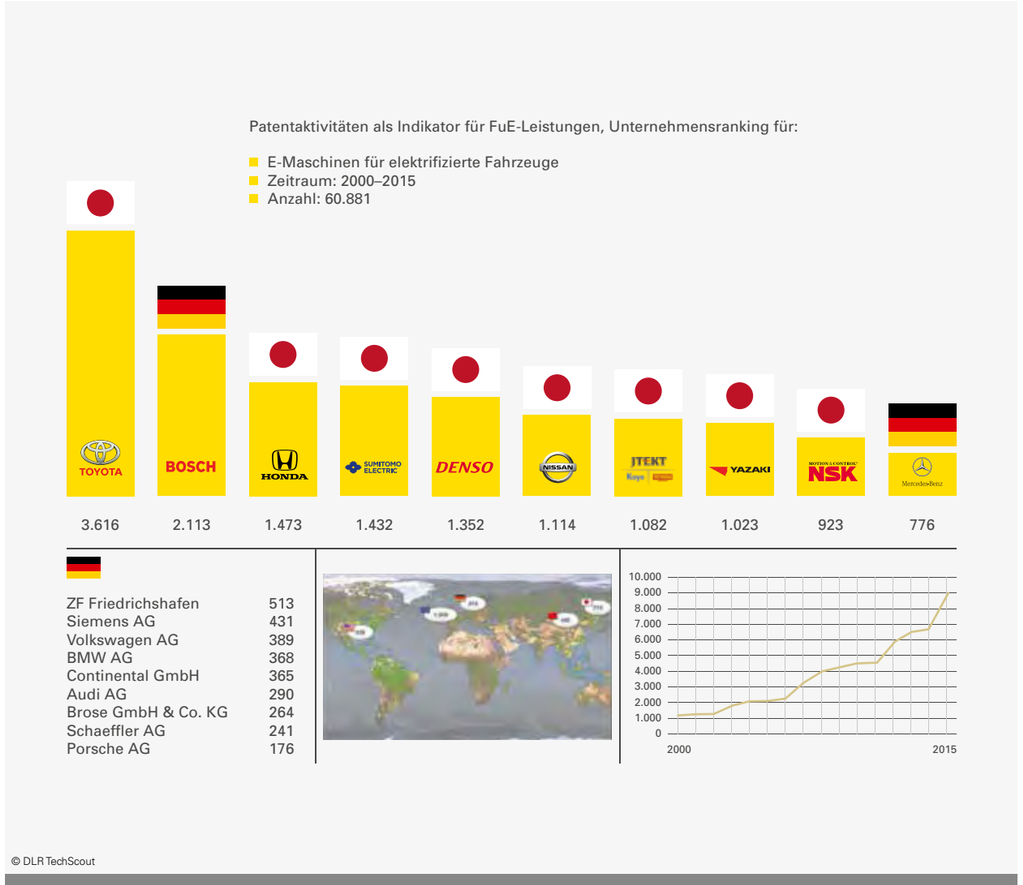


Abbildung 18: Patentanalyse für E-Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge, 2000–2015

© Bosch

Fahrzeug zu steuern und in geeigneter Form den elektrischen Verbrauchern zur Verfügung zu stellen. Beispielsweise muss der von der Batterie bereitgestellte Gleichstrom für den Elektromotor in einen Wechselstrom gewandelt werden – beim Rekuperationsvorgang in umgekehrter Richtung.

In elektrifizierten Fahrzeugen kommen mehrere Leistungselektroniksysteme zum Einsatz, da mehrere Bordnetze mit unterschiedlichen Spannungen (z. B. 12/48 V) installiert sind. Zudem wird ein Anschluss an das Hochvoltnetz der Batterie und an externe Stromquellen für den Ladevorgang des Fahrzeugs benötigt. Aktuelle Systeme sind hocheffizient und erreichen Wirkungsgrade von mehr als 95 %, sie sind zudem relativ langlebig und wartungsfrei (Tille, 2016).

Aktuelle FuE-Anstrengungen konzentrieren sich wesentlich darauf, Volumen und Masse der Komponente zu verringern sowie Effizienz und Temperaturbeständigkeit für eine Anwendung im Automobil zu erhöhen. Ziel der Hersteller ist es, die Leistungselektronik in der Nähe zur E-Maschine wirkungsortnah zu integrieren oder gar eine Hochintegration im Fahrzeug zu realisieren. Das bedeutet, dass E-Maschine und Leistungselektronik in einer einzigen, kompakten Einheit vereint werden. So können Komplexität und Kosten, z. B. für Kabelstränge im Fahrzeug, verringert werden. Ein weiterer Trend liegt darin, die Spannungen im Fahrzeug weiter zu steigern, um Wirkungsgradverluste zu verringern und Kühlanforderungen zu vermindern. Spannungen von 800 bis 1.000 V sind denkbar (STROM, 2014). Zusätzlich ist die Entwicklung neuer Halbleitermaterialien für die Hersteller und Zulieferer von hoher Relevanz, um die Leistungselektronik kleiner, leichter und effizienter zu gestalten sowie ggf. ganz ohne aktive Kühlung betreiben zu können. Wichtigste Enabler sind sogenannte Wide-Bandgap-Materialien wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN), die mit höheren Frequenzen schneller arbeiten und die klassischen Siliziumhalbleiter (Si) ablösen könnten. Allerdings müssen die Herstellkosten dieser Bauteile noch verringert werden, um mit den konventionellen Si-Modulen konkurrieren zu können (Wallmann, 2016).

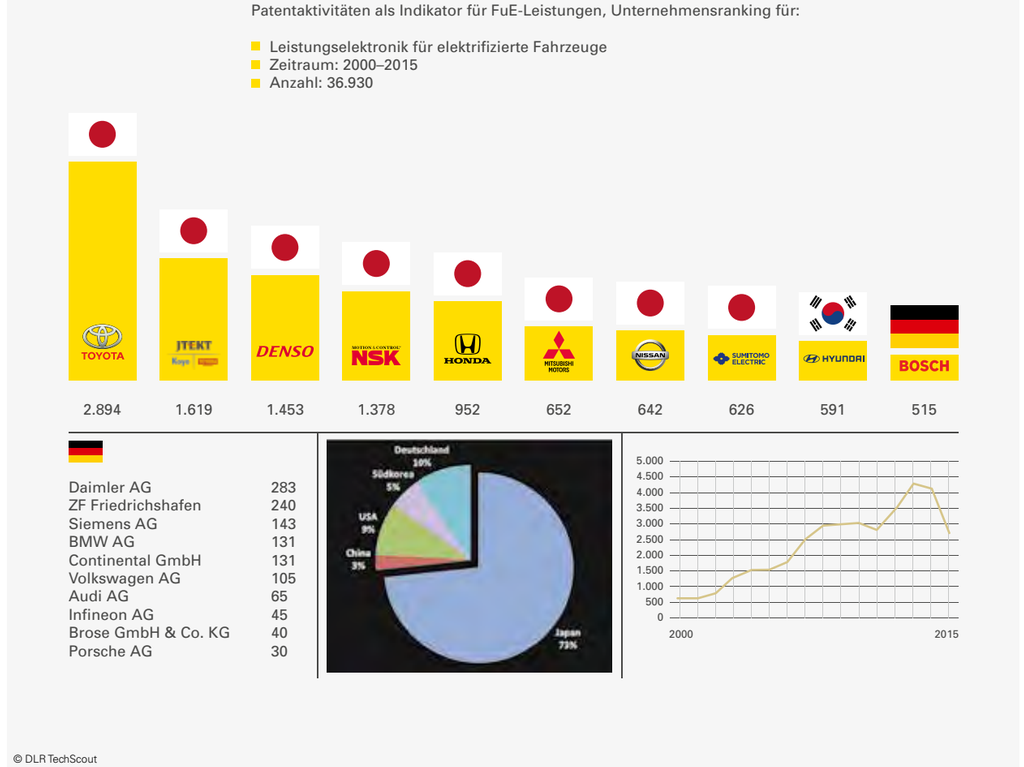
Die Patentanalyse zur Leistungselektronik für elektrifizierte Fahrzeuge offenbart eine große Dominanz japanischer Unternehmen (Abbildung 19): In den Top 10 belegen japanische OEM und Zulieferer die ersten acht Plätze, wobei Toyota wiederum mit Abstand führend ist (2.894 Patentanmeldungen). Weitere japanische OEM sind mit Honda (952), Mitsubishi (652) und Nissan (642) vertreten. Hyundai auf Platz 9 (Südkorea, 591) und Bosch auf Platz 10 (515) komplettieren die Rangliste. Unter den deutschen Automobilherstellern ist Daimler mit 283 Patenten im Portfolio führend, gefolgt von BMW (131), VW (105), Audi (65) und Porsche (30).

2000–2015 wurden weltweit insgesamt 36.930 Patente angemeldet, wobei auch hier eine deutliche sukzessive Steigerung erkennbar ist. Der Höchststand wurde mit 4.298 Anmeldungen 2013 erreicht, danach erfolgte allerdings wieder ein Rückgang bis zum Jahr 2015.

Weiterentwicklung der Brennstoffzellensysteme

© Daimer AG

Rein batteriebetriebene ebenso wie Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen nur elektrische Maschinen zum Vortrieb. Im BEV ist die Batterie der alleinige Energiespeicher. Im FCEV wird in der Brennstoffzelle in der Regel Wasserstoff in Gleichstrom umgesetzt. Je nach Konstruktion dient der Gleichstrom aus



© DLR TechScout

Abbildung 19: Patentanalyse für Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge, 2000–2015

der Brennstoffzelle anteilig dem direkten Motorantrieb oder dem Laden einer Pufferbatterie. Im FCEV kann die Batterie teilweise über einen Netzstecker zusätzlich geladen werden. Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemisches System, bei dem i. d. R. Wasserstoff und Luft zu elektrischer Energie und Wasser (als Nebenprodukt) im Fahrzeug reagieren. Der Wasserstoff wird in einem Drucktank direkt im Fahrzeug gespeichert und mitgeführt. Wird Wasserstoff in der Brennstoffzelle in elektrische Energie und anschließend mit einem E-Motor in Bewegungsenergie umgesetzt, ist der Wirkungsgrad mit ca. 60 % deutlich höher als bei der thermischen Verbrennung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor (ICE).

Der elektrochemische Prozess verläuft im Vergleich zur klassischen Erzeugung von Bewegungsenergie durch Verbrennung, allerdings effizienter, sauberer und leiser. Größter Vorteil der Technologie im Vergleich zu einem heutigen Lithium-Ionen-Batteriesystem ist die höhere Reichweite, wobei dies hauptsächlich an der hohen Energiedichte des Wasserstoffs liegt: 1 kg Wasserstoff beinhaltet so viel Energie wie ca. 3 kg Benzin. Zudem kann eine vergleichsweise kurze Betankungszeit von ca. 5 Minuten realisiert werden (Eichlseder und Klell, 2012). Im Automobilbereich werden hauptsächlich sogenannte Polymer-Elektrolyt-Membran-(PEM-)Brennstoffzellen eingesetzt, die wassergekühlt bei ungefähr 80 °C betrieben wer-

den und den derzeit höchsten Entwicklungsstand aufweisen. Die Herausforderungen für das Gesamtsystem im Fahrzeug bestehen insbesondere im Thermo- und Energiemanagement, in der Leistungsdynamik sowie in den Kosten. Der Erfolg der Brennstoffzellentechnologie hängt entscheidend von der Kostenentwicklung und der Infrastrukturverfügbarkeit ab (Töpler und Lehmann, 2017). Durch die bei Brennstoffzellenfahrzeugen hohen erzielbaren Reichweiten werden Anwendungspotenziale derzeit auch im Bereich des (Fern-)Güterverkehrs diskutiert.

Abbildung 20 stellt die Patentsituation für Brennstoffzellensysteme elektrifizierter PKW dar. Insgesamt wurden im Zeitraum 2000 bis 2015 weltweit ca. 21.000 Patente im Bereich der Brennstoffzellentechnologie angemeldet, mit jedoch stagnierender oder leicht abnehmender Tendenz seit 2007. In den Top 10 vertreten sind Unternehmen aus Japan, Südkorea, Deutschland und den USA, wobei Toyota nach der Anzahl der Patentanmeldungen führt (4.681). Auf den weiteren Plätzen finden sich Honda (2.257), Nissan (1.992) und Hyundai (1.003), bevor dann Daimler als bestes deutsches Unternehmen auf Rang 5 folgt (835). Bestplatziertes US-amerikanisches Unternehmen ist GM auf Rang 6 (799), Ford ist mit 322 Patentanmeldungen auf Platz 9 vertreten. Eine detaillierte Analyse des Innovationsnetzwerks zeigt zudem die unterschiedlichen Strategien in der Kooperation der Unternehmen bis 2015 auf: Während Toyota weit vernetzt ist und viele gemeinsam angemeldete Patente zur Brennstoffzelle im Portfolio hat, sind die deutschen Unternehmen Daimler, Bosch und BMW weniger stark in der Technologieentwicklung untereinander und mit anderen Technologieunternehmen vernetzt. Unter den weiteren deutschen Institutionen sind als OEM Volkswagen (91), BMW (78) und Audi (29) in der Technologie aktiv. Bosch ist mit 161 Patenten im Portfolio stärkster deutscher Zulieferer.

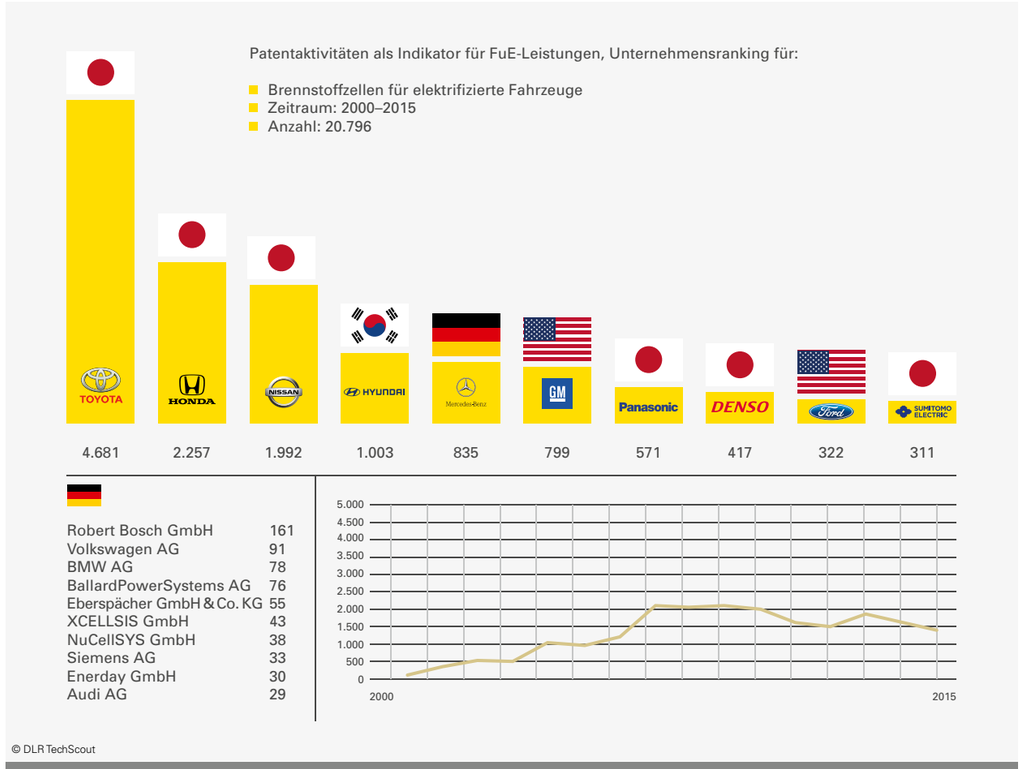


Abbildung 20: Patentanalyse für Brennstoffzellen in Bezug auf elektrifizierte Fahrzeuge, 2000–2015

Abbildung 21: Übersicht über gängige Ladestecker

Die Dauer des Ladevorgangs bei Elektrofahrzeugen ist u. a. von der zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur, der Ladeleistung und der Größe der Fahrzeugbatterie abhängig. Vor allem bei E-Fahrzeugen mit sehr großen Batteriekapazitäten (bis 100 kWh) kann durch die Verwendung eines geeigneten Ladesystems eine deutlich reduzierte Ladezeit realisiert werden.

Es wird zwischen dem Laden mit Gleichstrom (DC-Laden, Schnellladen) und Wechselstrom (AC-Laden, Normalladen) unterschieden. Plug-in-Hybridfahrzeuge und Batteriefahrzeuge können über geeignete Ladevorrichtungen geladen werden, z. B. über eine haushaltsübliche Steckdose, eine in der Garage installierte Wallbox oder öffentlich zugängliche Ladestationen bis hin zu sehr leistungsstarken Superchargern. Auch zu Lösungen für kabelloses Laden (sogenanntes induktives Laden) wird geforscht. Ein kompletter Wechsel des Batteriesystems kommt eher für kleinere Fahrzeuge, wie z. B. Pedelecs, in Betracht.

Das Laden mit Wechselstrom (AC-Laden) wird über einen Ladeanschluss zum ein- bzw. dreiphasigen Wechselstromnetz realisiert und erreicht eine Leistung von 3,7 kW (einphasig, 230 V) bis hin zu 11, 22 oder 43 kW (dreiphasig, 400 V). Das im Fahrzeug eingesetzte Ladegerät steuert dabei den Ladevorgang und speist die Energie in geeigneter Form in die Fahrzeugbatterie.

Beim Laden mit Gleichstrom (DC-Laden) können höhere Leistungen realisiert werden: Aktuell typische Werte sind ca. 50 kW bis zu 86 kW. Über Mittelspannungsnetzanschlüsse können perspektivisch Leistungen bis zu 350 kW übertragen werden. Das Ladegerät ist beim DC-Laden in der Ladesäule integriert, die Steuerung erfolgt durch eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Ladestation und Fahrzeug (DKE und AK EMOBILITY.60, 2016).

Beim induktiven Laden wird die Energie kabellos über ein elektromagnetisches Feld in das Fahrzeug übertragen. Zu diesem Zweck muss das Fahrzeug über einer Primärspule platziert werden, sodass die im Fahrzeug installierte Sekundärspule die Energie aufnehmen kann. Die Energieübertragung erfolgt mit Hilfe des Transformatorprinzips und erreicht bei geringen Abständen und richtiger Ausrichtung der Spulen die höchsten Wirkungsgrade. Aktuelle Systeme arbeiten mit ca. 90 % Wirkungsgrad (Tille, 2016).

Eine weitere Möglichkeit der Energieversorgung bei E-Fahrzeugen ist der Austausch der leeren Batterie gegen eine vollständig geladene. Allerdings ist aufgrund der Komplexität des Systems,

Induktives Laden

der hierfür notwendigen Standardisierung der Batterie- und Anschlusssysteme sowie der Kosten keine Verbreitung bei Elektro-PKW zu erwarten.

Die unterschiedlichen Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Ladepunkt haben eine Vielfalt an Steckerlösungen hervorgebracht, die letztlich in Europa zu einem standardisierten, offenen, universellen Ladesystem vereint wurden: dem Combined Charging System (CCS). Es ermöglicht den Anschluss sowohl für ein- bis dreiphasiges Wechselstromladen als auch für Gleichstromladen bis 200 kW mit einem Potenzial bis 350 kW. Das Ladesystem liefert eine kompatible Steckverbindung für die oben genannten Ladepunkte und beinhaltet alle notwendigen Funktionen zur Steuerung des Ladevorgangs und der Kommunikation. Das System konkurriert allerdings mit weiteren Ladestandards, z. B. mit CHAdeMO (bis 50 kW) und mit den Tesla-Superchargern (ca. 135 kW) (Veneri, 2016). Abbildung 22 zeigt einen Überblick über die E-Mobilitäts-Ladeinfrastruktur.

Einbindung in das Energiesystem

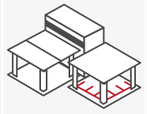
Der Aufbau einer ausreichenden Energieinfrastruktur ist essenzielle Voraussetzung für die Elektromobilität. Vor dem Hintergrund der Energiewende in Deutschland und des damit verbundenen Ziels eines Ausbaus der erneuerbaren Energiequellen, sind geeignete Konzepte zur Einbindung der Fahrzeuge in das Energiesystem zu entwickeln. Zur Kompensation der derzeit noch geringeren Reichweiten der E-Fahrzeuge im Vergleich zu konventionell betriebenen, ist die Verfügbarkeit von privater und öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur – auch von Schnellladestationen entlang von Autobahnen – von hoher Relevanz. Der größte Teil der Ladevorgänge – derzeit ca. 85 % – findet im privaten Bereich statt.

Generell ist davon auszugehen, dass die Anzahl öffentlich verfügbarer Ladestationen und Ladepunkte mit wachsendem Markterfolg der Elektromobilität steigen wird. Der Bedarf in Deutschland für das Jahr 2020 wird von der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) auf 70.000 öffentliche Ladepunkte und 7.100 Schnellladesäulen berechnet, sofern zu diesem Zeitpunkt 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf den Straßen fahren. Derzeit sind ca. 8.300 Ladesäulen und 24.500 Ladepunkte verfügbar, davon ca. 1.600 öffentlich zugängliche Ladepunkte in Baden-Württemberg (Statista, 2018). Der Ausbau der Ladeinfrastruktur wird durch öffentliche Fördergelder unterstützt. Beispielsweise stellt die Bundesregierung seit 2017 ca. 300 Mio. Euro für eine anteilige Finanzierung von Investitionskosten beim Aufbau öffentlich zugänglicher Ladesäulen zur Verfügung. Ziel ist es, mindestens 15.000 Ladesäulen (5.000 Schnell-, 10.000 Normalladestationen) bis 2020 zu installieren (BMVI, 2017). Auch die Landesregierung Baden-Württemberg stellt über die „Landesinitiative Elektromobilität III“ Gelder für den Aufbau eines flächendeckenden Ladesäulennetzes bereit. Um die zahlreichen privatwirtschaftlichen Aktivitäten sowie die Förderaktivitäten des Bundes sinnvoll zu ergänzen und eine flächendeckende Nutzbarkeit von Elektrofahrzeugen in Baden-Württemberg zu unterstützen, hat das Ministerium für Verkehr Ende 2017 die Förderbekanntmachung „Flächendeckendes Sicherheitsladenetz für Elektrofahrzeuge (SAFE)“ veröffentlicht. Im Juni 2018 wurde an ein Konsortium aus EnBW, 74 Stadtwerken und Versorgern sowie drei Kommunen ein Förderbescheid über 2,2 Mio. Euro übergeben. Ziel des Projektes ist, in einem Raster von zehn mal zehn Kilometern jeweils mindestens eine Lademöglichkeit mit mindestens 22 Kilowatt Ladeleistung bereitzustellen. In einem zweiten Raster von 20 mal 20 Kilometern soll es jeweils mindestens eine Schnellladesäule mit 50 Kilowatt Ladeleistung geben. Bis Frühjahr 2019 werden in Ergänzung der bereits bestehenden Ladeinfrastruktur in Baden-Württemberg im Rahmen von SAFE zusätzlich 48 Schnellladestationen und 94 Normalladestationen neu errichtet. Hinzu kommt die Ertüchtigung von zwölf bestehenden Stationen.

Das Energiesystem muss dabei jederzeit in der Lage sein, ausreichend Leistung und Kapazität bereitzustellen – eine Herausforderung v. a. angesichts in Zukunft steigender Marktdurchdringung von E-Fahrzeugen und steigender Anteile an (volatilen) erneuerbaren Energien. Generell ist aber kurz- bis mittelfristig keine Überlastung der Netze zu erwarten. Sofern beispielsweise im Jahr 2025 ca. 3 Mio. Elektrofahrzeuge in Deutschland verkauft wären, läge deren Jahresenergiebedarf bei ca. 3,3 TWh, die maximale Ladeleistung bei 1,5 GW. Dem gegenüber stünden ein deutschlandweiter Gesamtenergieverbrauch von 550 TWh und eine mittlere Leistung von 70 GW, sodass der Bedarf durch Elektrofahrzeuge als vergleichsweise gering einzuschätzen ist. Dennoch kann in der Theorie ein nicht intelligent gesteuertes Laden zu zusätzlichen und erhöhten Lastspitzen führen, was dann Probleme – insbesondere in Niederspannungsnetzen – verursachen könnte (Nobi und Fischhaber, 2015).

Elektrofahrzeuge könnten entsprechend mit flexibel und bedarfsgerecht gesteuerten Lade- und Entladevorgängen integraler Bestandteil eines intelligenten zukünftigen Energiesystems sein. Die Smart-Grid-Steuerung ermöglicht die optimale Einbindung der Fahrzeuge in das Energienetz und nutzt die Fahrzeugbatterien als Steuerelement zur Netzstabilisierung.

Eine intelligente Kommunikation zwischen den zukünftigen Fahrzeugen und den einzelnen Elementen der Energie- und Verkehrsinfrastruktur ist damit Voraussetzung auch für die Elektromobilität. Als Bestandteil der fortschreitenden Digitalisierung bieten Kommunikations- und Konnektivitätstechnologien aber noch viel mehr Möglichkeiten und Potenziale.

Anteile der Ladevorgänge	Privater Aufstellort: aktuell 85 %			Öffentlich zugänglicher Aufstellort: aktuell 15 %		
Typische Standorte für Ladeinfrastruktur						
	Einzel-/Doppelgarage bzw. Stellplatz beim Eigenheim	Parkplätze bzw. Tiefgarage von Wohnanlagen, Mehrfamilienhäusern	Firmenparkplätze auf eigenem Gelände	Autohof, Autobahnraststätte	Einkaufszentren, Parkhäuser, Kundenparkplätze	Straßenrand/ öffentliche Parkplätze
Ladedauer für 20 kWh (Verbrauch für 100 km)	**6 Stunden** (AC 3,7 kW)	**6 Stunden** (AC 3,7 kW) **1–2 Stunden** (AC/DC 11–22 kW)	**6 Stunden** (AC 3,7 kW)	**30 Minuten** (DC 50 kW) **10 Minuten** (DC 150 kW)	**6 Stunden** (AC 3,7 kW)	**1–2 Stunden** (AC/DC 11–22 kW)
Ladedauer perspektivisch				**Wenige Minuten** (DC 350 kW)		
Stromversorgung	Über vorhandenen Hausanschluss	Über vorhandenen Anschluss der Anlage oder separaten Anschluss an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz				Über vorhandene Infrastruktur (z. B. Straßenbeleuchtung) oder neuen Anschluss
Abrechnung		Abrechnung möglich je nach gewünschtem Geschäftsmodell, z. B. kostenlos – pauschal – nach Ladeleistung – nach bezogener Energiemenge				

© in Anlehnung an DKE und AK EMOBILITY60, 2016

Abbildung 22: Übersicht über E-Mobilitäts-Ladeinfrastruktur

2.2 Digitalisierung und autonomes Fahren

In Kürze:

- Wesentlicher Aspekt der Digitalisierung in der Mobilität ist die Konnektivität bzw. Kommunikation der Fahrzeuge untereinander, mit der Infrastruktur oder mit speziellen Plattformen.
- Die Kombination aus vernetzten, intelligenten Verkehrselementen und automatisiert/autonom fahrenden Fahrzeugen führt zur Entwicklung neuer Mobilitätsdienstleistungen und Geschäftsmodelle.
- Neue Anbieter treten in den Markt und konkurrieren mit den „klassischen“ Automobilherstellern und -zulieferern.
- Teilautomatisierte Fahrzeuge existieren schon heute, komplett autonomes Fahren wird bis 2025/2030 erwartet.
- Obwohl die Entwicklung der technischen und rechtlichen Rahmen sich im Anfangsstadium befindet, könnte das autonome bzw. automatisierte Fahren dazu beitragen, die Verkehrssicherheit und die Mobilitätsangebote für alle gesellschaftlichen Gruppen zu erhöhen.

Neben der Veränderung der Antriebstechnik stehen – vor allem aus Sicht der Automobilhersteller – das autonome Fahren und die digitale Vernetzung der PKW im Vordergrund derzeitiger technischer Entwicklungen. „Digitalisierung“ steht

im traditionellen technischen Verständnis für eine Umwandlung von analoger Information und Kommunikation in eine digitale Form. Im heutigen Verständnis ist sie aber viel mehr: Als Kombination unterschiedlicher Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) motiviert und beeinflusst sie eine Vielzahl weiterer technischer Entwicklungen in unterschiedlichsten Branchen – und damit das Produktangebot sowie die Art und Weise, wie diese Produkte produziert werden. Mit der Digitalisierung ändert sich die Art und Intensität, wie Objekte miteinander – teilweise Cloud-gestützt – kommunizieren, bis hin zur künstlichen Intelligenz (KI). Sie verändert zudem gleichzeitig auch die Marktnachfrage, indem sie die Kundenpräferenzen, das Konsum- und Nutzerverhalten sowie Arbeits- und Lebensverhältnisse prägt. Digitalisierung wirkt damit tiefgreifend und strukturverändernd sowohl auf Angebot als auch auf Nachfrage und legt entsprechend – und v. a. in Kombination mit weiteren Trends wie Autonomisierung, Flexibilisierung und Individualisierung – so den Grundstein für die vierte industrielle Revolution („Industrie 4.0"), die nachhaltig auch Produktions- und Arbeitsprozesse verändert. In Kombination mit der Elektrifizierung hat sie das Potenzial für disruptive Veränderungen, auch für den Mobilitätssektor.

So motiviert Digitalisierung z. B. die umfassende Vernetzung des Verkehrssystems und seiner Elemente – wie Fahrzeuge und Infrastruktur – und ermöglicht dadurch optimierte oder völlig neue Mobilitätsangebote und -lösungen. Parallel dazu werden Fahrfunktionen immer stärker automatisiert, bis hin zum völlig autonom fahrenden Auto. Technologien der Kommunikation und Konnektivität, Sensoren und Aktoren, die Gewinnung, Verarbeitung, intelligente Nutzung und Analyse großer Datenmengen durch lernende Systeme hoher künstlicher Intelligenz sind die Grundlage dafür.

Schwerpunkt	Inhalt
Mobilität	Mobilitätskonzepte, Verkehrssteuerung, Fahrzeugbau
Digitale Start-ups	Gründerkultur, Start-up-Ökosysteme, Wagniskapital
Wirtschaft 4.0	Produktion, Arbeitswelt, KMU, Land- und Forstwirtschaft
Bildung und Weiterbildung	Schule, Hochschule, Qualifizierung, Weiterbildung
Digitale Gesundheit	Personalisierte Medizin, Medizintechnik, Vernetzung
Verwaltung 4.0	E-Government, E-Akte, online, Bürgerservice, Daten
E-Kommune	Generationengerecht, Bürgerbeteiligung, ländlicher Raum
Querschnittsthema	
Forschung und Entwicklung, Innovation international an die Spitze	Daten, High Performance Cluster, künstliche Intelligenz
Schnelles Internet in Stadt und Land	Fokus auf ländlichen Raum, Betreibermodell, 5G-Netz
Chance für Nachhaltigkeit und Energiewende	Ressourcen, Kreislauf, Smart Grids
Datensicherheit, Daten- und Verbraucherschutz	Sicherheitsstandards, Cybercrime, Beratung

Tabelle 4: Die Schwerpunkte und Querschnittsthemen der Strategie „digital@bw" und deren Inhalte im Überblick

© in Anlehnung an digital@bw, 2017

Die Digitalisierungsstrategie des Landes Baden-Württemberg veranschaulicht eine Vielzahl der Aspekte dieses Megatrends und dient an dieser Stelle als Orientierungshilfe. Der Koalitionsvertrag der Landesregierung Baden-Württembergs von 2016 enthält die wesentlichen Grundlagen für die Digitalisierungsstrategie des Bundeslandes. Das Innenministerium bündelt alle Digitalisierungsaktivitäten und führt sie ressortübergreifend zusammen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Schwerpunkte und Querschnittsthemen der Strategie „digital@bw" und ihrer Inhalte. Das Verkehrsministerium bearbeitet das Thema Digitalisierung der Mobilität mit einer Reihe von Maßnahmen und Projekten, zusammengefasst u. a. im Arbeitspapier „Intelligente Mobilität der Zukunft: Digitalisierung in der Schlüsselrolle" (Verkehrsministerium Baden-Württemberg, 2017). In der weiteren Darstellung dieser Studie liegt der Fokus auf dem Schwerpunkt Mobilität, insbesondere auf dem automatisierten bzw. autonomen Fahren sowie den entsprechenden Querschnittsthemen aus Infrastruktur und neuen Geschäftsmodellen.

Es lässt sich feststellen, dass die Trends der Elektrifizierung und Digitalisierung zwar unabhängig voneinander stattfinden können, gleichzeitig aber auch voneinander profitieren. Die Herausforderungen, die die Elektrifizierung mit sich bringt – u. a. die noch bedingte Reichweite, die Einbindung in das urbane Verkehrssystem und in das Energiesystem –, erfordern den gleichzeitigen Einsatz „intelligenter" Lösungen. Diese können durch Technologien der Digitalisierung ermöglicht werden.

Die ständige intelligente Vernetzung von Elementen im Mobilitätssystem – die Konnektivität – ist ein wesentlicher Bestandteil der Digitalisierung: Aus der Vielzahl von Daten und Informationen, die die Fahrzeuge senden und empfangen können, entstehen neue Möglichkeiten zur Steuerung der Verkehrswege und -flüsse, aber auch zur Steigerung von Sicherheit und Komfort. Die dafür notwendigen Daten generieren sie mithilfe von Kameras und Sensoren, die innerhalb von Sekundenbruchteilen verarbeitet werden. Außerdem tauschen Fahrzeuge untereinander sowie mit der Verkehrsinfrastruktur permanent und in Echtzeit Informationen aus. Dem Fahrer werden sukzessive mehr und mehr Aufgaben durch Assistenzsysteme abgenommen (Maurer et al., 2015). Autonomes Fahren könnte damit wesentlich dazu beitragen, Mobilitätsangebote für alle gesellschaftlichen Gruppen zu erhöhen, sodass Menschen, die nicht mehr mobil sind oder es bislang nicht waren, mobilisiert werden. Zudem könnten ländliche Regionen durch innovative neue Konzepte besser mit den Zentren bzw. Großstädten vernetzt werden.

Die Technologie für teilautomatisierte und teilautonome Fahrzeuge steht kurz vor der Serienreife und der Einführung in großvolumige Marktsegmente. Auch wenn erste autonome Systeme bereits im Einsatz sind, sind es im Wesentlichen jedoch noch Test- und Forschungsmodelle. Bevor es zu einer umfänglichen Markteinführung komplett autonom fahrender Fahrzeuge kommen kann, müssen erst entscheidende Hürden überwunden werden: So sind beispielsweise die Sensoren (noch) relativ teuer, die Akzeptanz der Nutzer ist eingeschränkt und die notwendigen gesetzlichen Regularien sind noch nicht vorhanden. Dennoch erwarten Experten spätestens im Jahr 2020 teilautonom fahrende Autos im Alltag (Carl, 2015). Zwischen 2025 und 2030 wird voraussichtlich auch das vollständig autonom fahrende Auto auf den Straßen realistisch sein.

Im Folgenden werden die wesentlichen Informationen zum Status des automatisierten und autonomen Fahrens dargestellt, bevor anschließend eine Perspektive auf Potenziale der Digitalisierung für die Mobilität aufgezeigt wird. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf neuen Mobilitätslösungen, -angeboten und Geschäftsmodellen.

2.2.1 Automatisiertes und autonomes Fahren – Status und Fakten

Automatisiertes Fahren bedeutet, dass einzelne Fahraufgaben (schrittweise) vom Menschen auf eine Maschine übertragen werden, um diesen so in bestimmten Fahrsituationen zu unterstützen oder zu entlasten. Ähnlich wie bei der breiten Spanne unterschiedlich elektrifizierter Antriebskonzepte müssen auch bei der Automatisierung mehrere Umsetzungsgrade unterschieden werden:

- rein manuell
- teilautomatisiert
- vollautomatisiert
- assistiert
- hochautomatisiert
- autonom

Die ersten drei Level (Stufe 0 bis 2) beschreiben den Bereich, in dem der menschliche Fahrer mindestens Lenkung oder Geschwindigkeit kontrolliert. Die Stufen 3 bis 4 können als hoch- bzw. vollautomatisiertes Fahren verstanden werden. Stufe 5 bezeichnet das vollständig autonome Fahren, bei dem grundsätzlich kein Fahrer mehr notwendig ist. Die sechs Automatisierungslevel werden in Abbildung 23 mit von oben nach unten steigenden Graden der Automatisierung illustriert und nachfolgend im Detail erläutert.

Stufen	Funktion Fahrer	Funktion System
0 Rein manuell	Dauerhafte gesamte Fahrzeugführung.	
1 Assistiert	Dauerhafte Quer- oder Längsführung.	Jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.
2 Teil-automatisiert	Dauerhafte Systemüberwachung und dauerhafte Bereitschaft zur Übernahme.	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen.
3 Hoch-automatisiert	**Keine** dauerhafte Systemüberwachung erforderlich. Bei Bedarf Übernahme mit ausreichender Zeitreserve.	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen. **Verlängerter Übergabezeitraum.**
4 Voll-automatisiert	**Keine** dauerhafte Systemüberwachung erforderlich.	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen. **Rückführung in risikominimalen Zustand durch System.**
5 Autonom		Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig. Das System ist in allen Situationen in der Lage, das Fahrzeug sicher zu steuern. Das Fahrzeug kommt ganz **ohne Fahrer** aus.

© e-mobil BW, 2015 in Anlehnung BAST und vda

Abbildung 23: Die sechs Stufen des automatisierten Fahrens

Stufe 0: Rein manuell/Driver Only

Der Fahrer muss dauerhaft sowohl Längsführung (Geschwindigkeit) als auch Querführung (Lenkung) steuern. Dies entspricht dem klassischen Autofahren. Die Darstellung von Hinweisen und Informationen unterstützt den Fahrer beim Steuern des Fahrzeuges, so z. B. durch Schildererkennung, Auffahrwarnung oder Warnung bei Geschwindigkeitsüberschreitung.

Beispiele

Müdigkeitsassistent

Die Müdigkeitserkennung warnt den Fahrer bei auftretenden Konzentrationsschwierigkeiten mittels eines akustischen Signals. Zu diesem Zweck können Augenbewegungen per Kamera analysiert oder z. B. auch Mikroimpulse am Lenkrad gemessen werden, um auf die Erschöpfung des Fahrers zu schließen. Ignoriert der Fahrer eine Pausenempfehlung, wiederholt sich die Warnung in regelmäßigen Abständen.

Schildererkennung

Die Verkehrszeichenerkennung zeigt z. B. die zugelassene Höchstgeschwindigkeit und Überholverbote an. Sie ist auch in der Lage, Zusatzschilder wie „bei Nässe“ zu registrieren. Sie arbeitet mittels Kameras, die die Umgebung permanent nach Schildern abtasten und im Display darstellen.

Stufe 1: Fahrerassistenz/assistiert

In Stufe 1 verfügt das Fahrzeug über Systeme, die auf Basis einer Analyse von Umfeldinformationen entweder die Geschwindigkeitssteuerung oder die Lenkung übernehmen können. Der Fahrer muss die jeweils andere Führung übernehmen. Beispiele sind der Tempomat oder der Spurhalteassistent.

Beispiel

Spurhalteassistent

Der Spurhalteassistent ermöglicht die Steuerung von Lenkbewegungen während der Fahrt. Dafür werden die Straßenmarkierungen von Sensoren und Kameras analysiert und ausgewertet. Der Computer steuert das Fahrzeug zwischen den Markierungen.

Stufe 2: Partielle Automation/teilautomatisiert

Das Auto kann mehrere Automatisierungsaufgaben gleichzeitig übernehmen, so erkennt z. B. der Staupilot die Fahrbahnbegrenzung ebenso wie die Geschwindigkeit und Entfernung des Vorausfahrenden. Auf Grundlage dieser Informationen ist das System in der Lage, das Fahrzeug zu beschleunigen, zu bremsen und zu lenken. Der Fahrer selbst muss die Umgebung jederzeit im Blick behalten und, sofern etwa höhere Geschwindigkeiten wieder möglich sind, das Steuer übernehmen. Ein konkretes Beispiel ist der Autopilot von Tesla, der eine Kombination aus einem Abstandsregeltempomat und einem Lenkassistenten darstellt. Eine weitere konkrete Umsetzung ist der mittlerweile weit verbreitete Einparkpilot.

Beispiel

Einparkpilot

Der Fahrer kann den Einparkpiloten flexibel aktivieren. Daraufhin tasten Ultraschallsensoren an den Kotflügeln bis zu einer Fahrtgeschwindigkeit von 30 km/h den Straßenrand auf eine ausreichend große Lücke ab. Sobald eine entsprechende Lücke gefunden wurde, informiert das System über die entsprechende Ausgangsposition für die Einfahrt in die Lücke. Der Fahrer legt den Rückwärtsgang ein, fährt langsam los und lässt das Lenkrad los. Das Lenkrad wird vom System gesteuert, sodass das Fahrzeug in die Parklücke hineinfährt. Der gesamte Vorgang dauert knapp 15 Sekunden. Sicherheitshalber bricht der Parkassistent ab, sobald der Fahrer das Lenkrad berührt oder schneller als 7 km/h fährt.

Stufe 3: Bedingte Automation/hochautomatisiert

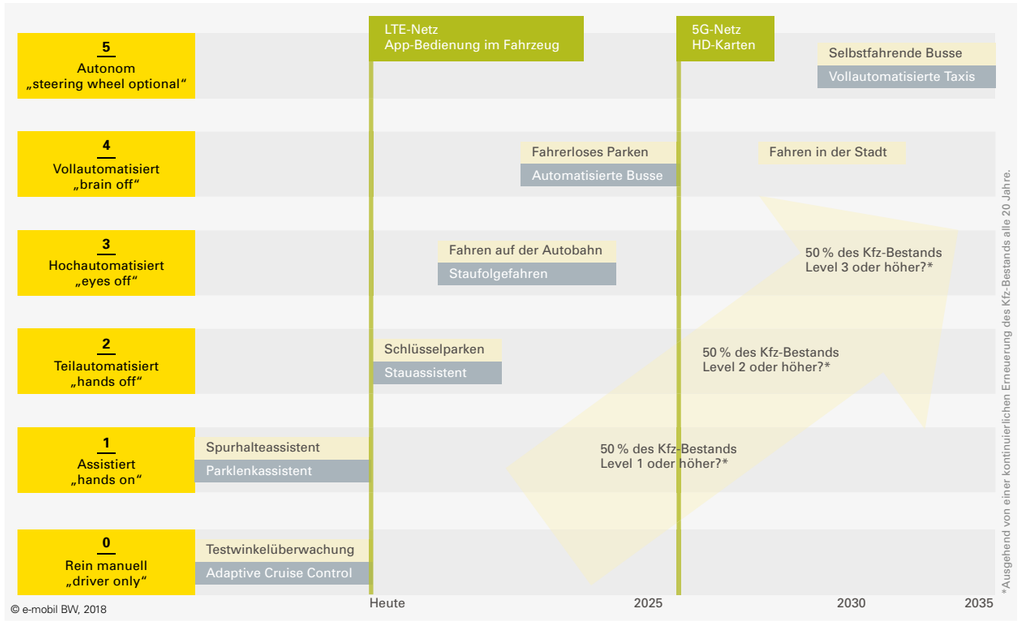
In Stufe 3 übernimmt das Fahrzeug sowohl Längs- als auch Querführung. Auf diesem Automationsniveau muss der menschliche Fahrer jederzeit bereit sein, das Steuer zu übernehmen. Das erste serienmäßige Fahrzeug, das automatisiertes Fahren auf diesem Level 3 verspricht, ist der neue Audi A8 mit einem Stauassistenten, der bis 60 km/h alle Fahraufgaben übernimmt und in dieser Zeit den Fahrer obsolet macht. Nur in besonderen Situationen muss der Fahrer das Lenkrad übernehmen, wird aber vorher darauf hingewiesen.

Stufe 4: Hohe Automation/vollautomatisiert

Der wesentliche Unterschied zu Stufe 3 besteht darin, dass das System alle Aufgaben ausführt. Dies bedeutet, dass im Notfall das System nach einer vordefinierten Strategie reagiert, wie etwa Bremsen bis zum Stillstand und Absetzen eines Notsignals.

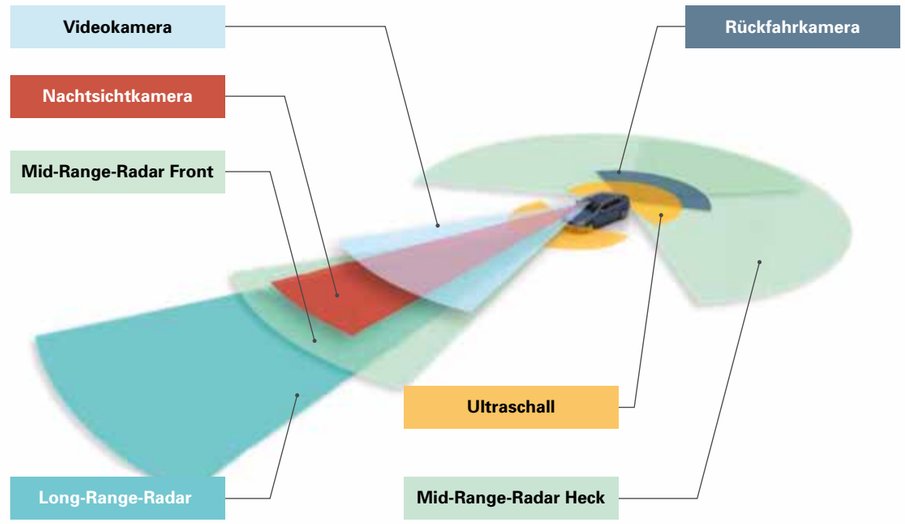
Stufe 5: Volle Automation/autonom

Auf der höchsten Stufe wird schließlich ein System beschrieben, das alle Aufgaben des Fahrens übernimmt, wenngleich alternativ das Fahrzeug aber auch von einem Menschen gesteuert bzw. ferngesteuert werden kann (Schacht, 2017).



© e-mobil BW, 2018

Abbildung 24: Beispiele für Fahrzeugsysteme zur Automatisierung und Vernetzung

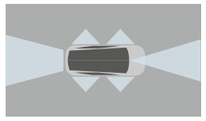


© Robert Bosch GmbH, 2017

Abbildung 25: Sensoren für die Umfelderkennung

Teilautomatisiertes Fahren ist bereits möglich; die Fahrzeugtechnik und die Ausstattung von Straßen sind in Serienreife vorhanden, um – zumindest auf Autobahnen – das hochautomatisierte Fahren in absehbarer Zukunft einzuführen. Die für das automatisierte oder autonome Fahren notwendigen Systeme im Fahrzeug ersetzen dabei die manuellen Aufgaben des Fahrers: Sehen, Denken, Ausführen. Dies passiert in einer Kombination aus real installierter Hardware (z. B. zur Umfelderkennung) und intelligenter Software (z. B. zur Datenverarbeitung).

Insbesondere in komplexen Verkehrssituationen müssen autonom fahrende Fahrzeuge in Sekundenbruchteilen die richtigen Entscheidungen auf Basis komplexer Informationen aus dem Umfeld treffen können. Halten beispielsweise zeitgleich zwei Fahrzeuge gleichberechtigt an einer Kreuzung, verständigen sich Menschen auf höchst unterschiedliche Art (Blick, Geste, Mimik etc.), um die Situation zu lösen. Voll autonome Fahrzeuge müssen im Verkehrsgeschehen ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die unterschiedlichen Komponenten automatisierter und autonomer Fahrzeuge werden im Folgenden beschrieben.



Kernkomponente: Sehen

„Sehen“ – Umfeldsensorik und Kamerasysteme

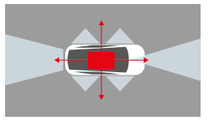
Eine zuverlässige Umfelderkennung ist wesentliche Voraussetzung für jedes automatisierte Fahrsystem. Dafür sind hochmoderne Kamerasysteme sowie Umfeldsensoren notwendig, die auf Basis von Ultraschall, Radar und Laser die Umgebung permanent in Kombination abtasten, um Streckenverlauf, Straßenmarkierungen und andere Verkehrsteilnehmer selbstständig erkennen. Die Verarbeitung der Daten bietet dem Fahrzeug ein vollständiges Bild seiner Umgebung, unabhängig von Witterungs- und realen Sichtverhältnissen. In einem vernetzten Mobilitätssystem können die Daten einzelner Fahrzeuge und Informationen aus der Verkehrsinfrastruktur ausgetauscht werden, sodass ggf. akute Gefahrensituationen erkannt und an die relevanten Verkehrsteilnehmer weitergeleitet werden. So ist ein „Sehen“ auch weit über das unmittelbare Umfeld hinaus möglich. Diese Car-to-X-Kommunikation wird später noch erläutert.

Folgende Komponenten werden für die Umfelderkennung genutzt (e-mobil BW, 2015).

Zur Messung der Distanz eines Objekts im unmittelbaren Umfeld (z. B. ein anderes Fahrzeug, ein Fußgänger, ein Bürgersteig) werden **Ultraschallsensoren** eingesetzt, die laufend kurzwellige Impulse aussenden. Über das Echolotprinzip wird die Laufzeit der ausgesendeten und reflektierten Signale ausgewertet und so die relative Entfernung zum Objekt ermittelt.

Radarsensoren ergänzen die Umfelderkennung in weiterer Entfernung zum Fahrzeug. Dabei werden elektromagnetische Funkwellen im Radiofrequenzbereich ausgesendet und anhand der Reflexion als Sekundärsignal ausgewertet.

Den für den Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich decken **Kamerasysteme** ab. Sie verwenden halbleiterbasierte Bildsensoren zur Wandlung von Licht in digitale Bildsignale. Vorteilhaft sind Kamerasysteme auch deshalb, weil sie große Kontraste verarbeiten können. Zusätzlich werden **Lasersysteme** eingesetzt, die der optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung dienen. Über das Lichtlaufzeitverfahren werden die reflektierten Lichtimpulse ausgewertet. Im Automobilbereich werden bevorzugt LIDAR-Systeme (Light Detection and Ranging Systems) genutzt.

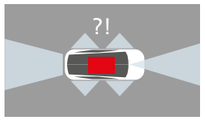


Kernkomponente: Denken

„Denken“ – Steuereinheiten, Algorithmen, maschinelles Lernen, digitale Karten

Elektronische Steuereinheiten bilden die Schaltzentrale des automatisierten Fahrsystems. Sie sind dafür zuständig, die Sensorsignale zu sammeln, zu interpretieren, auszuwerten und zu einem dreidimensionalen Bild zu verarbeiten. Auf dieser Basis wird in Sekundenbruchteilen die optimale Reaktion auf die gegebene Situation ermittelt und eine Entscheidung getroffen, wie das Fahrzeug diese am besten umsetzen kann. Die finale Entscheidung leitet das System an die mechatronischen Aktoren weiter. Herausforderung ist dabei insbesondere die Interpretation des unmittelbar möglichen Verhaltens einzelner Ver-

kehrsteilnehmer (die ggf. nicht vernetzt sind), sodass eine mit hoher Wahrscheinlichkeit hinterlegte Prognose entsteht. Auf deren Basis und relativ zur eigenen Position und Bewegung wird dann das optimale Verhalten in komplexen Verkehrssituationen errechnet. Klar geregelte, standardisierte Mechanismen zur Signalisierung des geplanten Verhaltens sowie hochpräzise digitale Abbildungen des aktuellen Umfelds unterstützen bei der Entscheidungsfindung.



Kernkomponente: Ausführen

„Ausführen" – Aktoren und mechatronische Systeme

Nach Verarbeitung der Daten muss die Entscheidung ausgeführt werden, hierfür sind sogenannte Aktoren für automatisierte Fahrsysteme wichtig: Mechatronische Systeme wie Antriebs-, Brems-, Lenk- und Fahrwerksysteme reagieren in Sekundenbruchteilen auf die aktuelle Verkehrssituation und setzen die von der Steuerung als optimal errechnete Lösung präzise um. Auf diese Weise können Fahrzeuge selbstständig lenken oder die Spur halten, vor einer Kurve vorausschauend die Geschwindigkeit optimal verringern, in eine enge Parklücke manövrieren oder einem Hindernis selbstständig ausweichen und abbremsen. Dies alles nachweislich in deutlich höherer Geschwindigkeit als der Mensch und dazu noch verlässlicher und ermüdungsfrei. Allerdings, und das ist die aktuelle Herausforderung, ist dies noch nicht in allen komplexen Verkehrssituationen so. Somit ist nach wie vor der Mensch (noch?) der Maschine überlegen.

IT-Infrastruktur, Kommunikation und Daten

Die „Digitale Transformation" wird in vielen Bereichen unserer Gesellschaft stattfinden und wirksam werden. IT- und Datenmanagement wird als wichtiger und substanzieller Faktor zur Steigerung der Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit gesehen. Die von diesen Entwicklungen angestoßenen Veränderungen werden sich auch in Transformationen im Bereich Mobilität widerspiegeln, wobei die Themen IT-Sicherheit und Datenschutz im Kontext des automatisierten Fahrens eine besondere Herausforderung darstellen. Zahlreiche Beispiele der letzten Jahre zeigen, welche Manipulationsgefahren und sicherheitsrelevanten Eingriffe in den Straßenverkehr durch nicht ausreichend geschützte Fahrzeug-IT entstehen. Im Jahr 2015 mussten z. B. in den USA 1,4 Mio. Fahrzeuge der Marken Jeep, Chrysler und Dodge (Fiat Chrysler) für Softwareupdates zurückgerufen werden, nachdem Hackern über das Infotainment-System der Zugriff auf die interne Kommunikationsstruktur (CAN-Bus) gelungen war, sodass das Fahrzeug u. a. abgebremst werden konnte (BBC, 2015).

Die Anforderungen an die Infrastruktur werden mit dem Grad an Automatisierung ansteigen. IT-Infrastruktur hat dabei zunächst eine unterstützende Funktion und wird zunehmend zur Notwendigkeit. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Kommunikationsinfrastruktur. Hier gilt es grundsätzlich – nicht zuletzt auch wegen der europäischen und internationalen Dimension –, solche technischen Lösungen vorzuziehen, die möglichst geringe Eingriffe in die aktuelle Infrastruktur erfordern und möglichst flexibel einsetzbar sind.

Für die erste Generation des automatisierten Fahrens reicht eine flächendeckende Einhaltung bzw. Umsetzung der bestehenden Standards der verkehrstechnischen Infrastruktur. Ab der zweiten Generation muss das Umfeld des Fahrzeugs präziser beschrieben werden können. Hier sind eine durchgängige Abdeckung mit Mobilfunknetzen sowie eine bessere Qualität der Informationen zur Verkehrslage einschließlich hochpräziser Karten erforderlich. Für vollautomatisiertes und autonomes Fahren ist in allen Umgebungen eine exakte Positionsbestimmung notwendig. Dies erfordert neben einem flächendeckenden und robusten Mobilfunknetz auch eine sichere und leistungsfähige IT-Infrastruktur für die Verkehrstelematik.

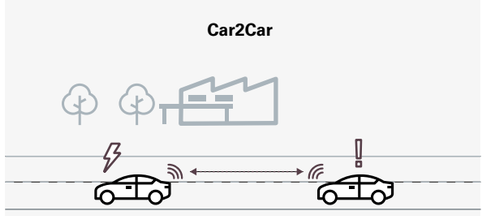
Sowohl Einsatz als auch Verkauf der Fahrzeuge müssen grenzüberschreitend möglich sein. Dafür ist mittelfristig eine möglichst weltweite, zumindest aber EU-weite Harmonisierung anzustreben (Pfleger, 2016). Hinsichtlich der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur werden folgende Formen unterschieden:

- Car2X – Fahrzeug mit Umwelt
- Car2Car – Fahrzeug mit Fahrzeug
- Car2Infrastructure – Fahrzeug mit Verkehrsinfrastruktur
- Car2Backend – Fahrzeug mit einem zentralen Rechenzentrum

Car2X-Kommunikation

„Car2X-Kommunikation" ist der Oberbegriff für diverse Kommunikationsverbindungen der Fahrzeuge mit der Umwelt. Ab April 2018 wird jedes in der Europäischen Union angebotene Neufahrzeug obligatorisch das Notrufsystem „eCall" mit einer eigenen SIM-Karte enthalten. Die SIM-Karte ist eine sogenannte „Dormant SIM", die nur im Falle eines detektierten oder manuell ausgelösten Notrufs aktiviert wird und eine Authentifizierung im Mobilfunknetz ermöglicht. Eine unmittelbare Nutzung des „eCall"-Moduls für Car2X-Funktionen ist daher aktuell noch auszuschließen. Zukünftige SIM-Karten nach 5G-Netzwerkstandard haben eine wesentlich höhere Datenübertragungsrate und können so Car2X-Funktionen unterstützen (Frankfurter Allgemeine, 2015). Das bedeutet, dass aktuelle und zukünftige Fahrzeuge bereits mit Technologien ausgestattet sind, die eine entsprechende Kommunikation erlauben, derzeit aber noch nicht dafür genutzt werden.

Car2Car-Kommunikation

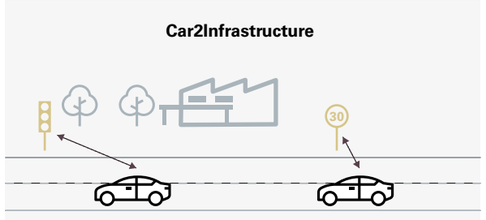


© eigene Darstellung

Abbildung 26: Car2Car-Kommunikation

Der Ausdruck „Car2Car-Kommunikation" bezeichnet eine direkte Informationsübermittlung zwischen Fahrzeugen, um Fahrer frühzeitig über kritische oder gefährliche Situationen zu informieren. Der direkte Datenaustausch zwischen Fahrzeugen wird mittels eines WLAN-basierten Funkstandards umgesetzt. Wenn z. B. ein Fahrzeug auf einer unübersichtlichen Straße vor einem Hindernis gerade noch stoppen kann, warnt das nachfolgende Fahrzeug wenige Sekunden später automatisch seinen Fahrer, der dann rechtzeitig reagieren und somit einen Unfall vermeiden kann.

Car2Infrastructure-Kommunikation

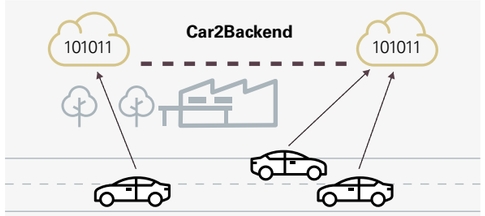


© eigene Darstellung

Abbildung 27: Car2Infrastructure-Kommunikation

Unter „Car2Infrastructure" wird die direkte Informationsübermittlung zwischen Fahrzeugen und straßennaher Infrastruktur verstanden. Hierbei handelt es sich z. B. um Lichtsignalanlagen oder intelligente Verkehrszeichen.

Car2Backend-Kommunikation



© eigene Darstellung

Abbildung 28: Car2Backend-Kommunikation

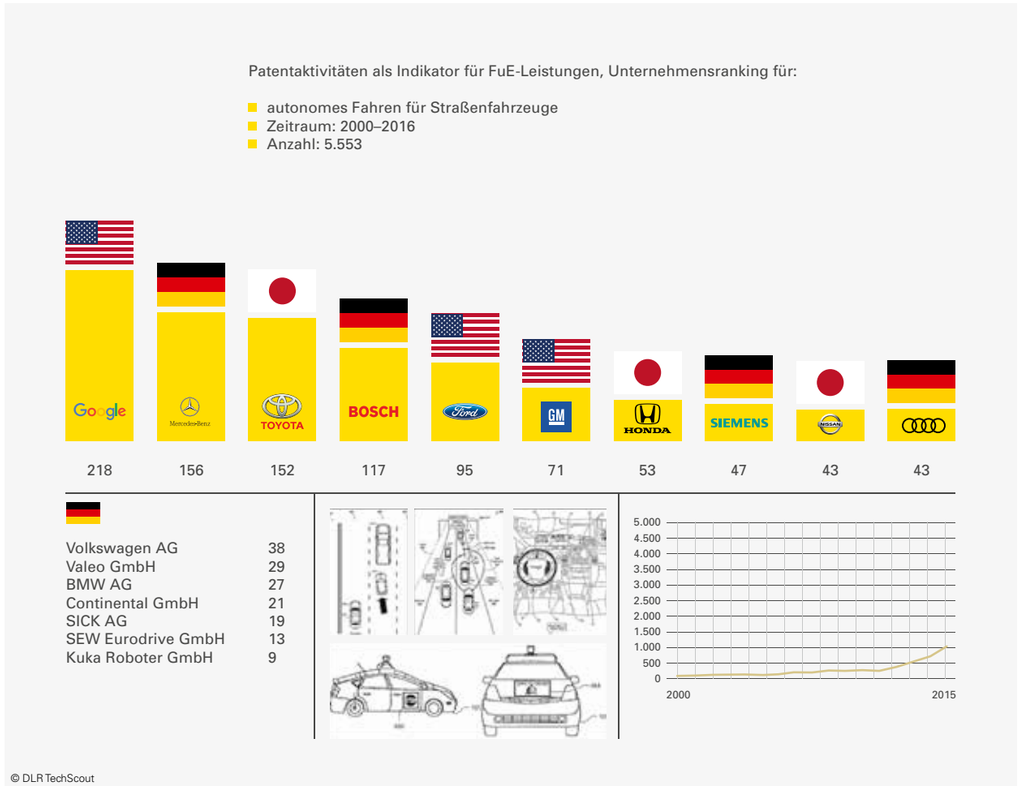
Unter „Car2Backend"- bzw. mobilfunkbasierter Kommunikation ist die Informationsübertragung zwischen Fahrzeugen und Verkehrsleitzentralen sowie herstellereigenen/herstellerübergreifenden Backends zu verstehen. Beispielsweise können Erfassung und Vermittlung der Positionen von Tagesbaustellen erfolgen, sodass frühzeitige Umfahrungen und damit die Verminderungen von Staubildungen möglich sind (Oberkersch, 2015).

Über technische Lösungen für das automatisierte/autonome Fahren sowie die Vernetzung und Kommunikation der einzelnen Verkehrsträger hinaus sind allerdings weitere Bereiche zu regeln: Insbesondere muss, auch im Vorgriff auf das vollautomatisierte oder das autonome Fahren, die funktionale Sicherheit redundant (doppelt) gewährleistet sein, um den Ausfall einzelner Komponenten abzusichern. Digitale Karten müssen weiter präzisiert werden und immer auf dem aktuellen Stand verfügbar sein. Für die Übergabe der Fahrzeugsteuerung von den Fahrzeugsystemen an die Fahrerin oder den Fahrer müssen geeignete und zugelassene Schnittstellen gefunden werden. Außerdem ist jederzeit die Datensicherheit (Verschlüsselungen und Datenspeicherung) zu gewährleisten.

Auch im Bereich des autonomen Fahrens werden massive Anstrengungen zur Weiterentwicklung der Technologien (z. B. Sensorik, Umfelderkennung) sowie der Steuerung des Fahrzeugs (z. B. Entscheidungsalgorithmen, Positionserkennung) unternommen und es wird intensiv in Forschung und Entwicklung investiert. Hierbei ist interessant, dass neue Player in die Entwicklung eintreten und diese insbesondere auf das

rein autonome Fahren (SAE Level 5) fokussieren. Die Patentanalyse für das rein autonome Fahren zeigt dies auch: Das US-amerikanische Unternehmen Google führt hier mit 218 angemeldeten Patenten die Technologieentwicklung an, gefolgt von Daimler (156), Toyota (152) und Bosch (117). Die insgesamt starke Stellung deutscher Unternehmen in diesem Bereich zeigt auch, dass in den Top 10 mit Siemens (Rang 8, 47 Patentanmeldungen) und Audi (Rang 10, 43) zwei weitere deutsche Unternehmen vertreten sind. Mit Ford auf Platz 5 (95) und GM auf Platz 6 (71) sind allerdings auch zwei weitere US-amerikanische Unternehmen zu erkennen.

Insgesamt wurden im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2016 5.553 Patente angemeldet, die den Stand der Technik beim rein autonomen Fahren in Bezug auf PKW und LKW erweitern und verbessern. Während bis zum Jahr 2013 insgesamt eine nur sehr geringe Patentierungsaktivität zu erkennen ist, steigt diese ab dann kontinuierlich an und erreicht in dieser Untersuchung mit 1.053 Patenten im Jahr 2016 den Höchststand. Unter den weiteren deutschen Automobilherstellern ist Volkswagen mit 38 Patenten im Portfolio vertreten, gefolgt von BMW (27). Die Zulieferer Valeo (29), Continental (21), Sick (19), SEW Eurodrive (13) und Kuka Roboter (9) komplettieren die Aktivitäten aus deutscher Sicht.



© DLR TechScout

Abbildung 29: Patentanalyse für „Autonomes Fahren (SAE Level 5)" in Bezug auf Straßenfahrzeuge (PKW, LKW), 2000–2016

2.2.2 Perspektiven der Digitalisierung und neue Mobilitätskonzepte

Die technischen Lösungen für das vernetzte und (teil-)automatisierte Fahren stehen, wie beschrieben, grundsätzlich zur Verfügung, befinden sich zum Teil schon in der Serienanwendung oder werden derzeit noch in Forschung und Entwicklung erprobt. Die marktnahe Anwendung vollständig autonom fahrender Autos ist für 2025/2030 projiziert. Damit einher gehen eine Vielzahl an Chancen und Möglichkeiten, Mobilität neu zu gestalten, also beispielsweise effizienter, sicherer, umweltfreundlicher und nutzer- bzw. bedarfsgerechter. Dies sowohl für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den Güterverkehr als auch für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sowie für neue Lösungen und Geschäftsmodelle an den Schnittstellen dieser Verkehrsarten. Diese könnten zu einer Erschließung neuer Geschäftsfelder und einer Ausweitung des Angebots an Mobilitätsdienstleistungen führen.

© HERE Global B.V., 2017

Verkehrsflusssteuerung

Eine Verbesserung von Verkehrseffizienz und -sicherheit kann beispielsweise durch neue Formen der Organisation und **Steuerung des Verkehrsflusses** erreicht werden, insbesondere in Ballungsgebieten. Durch die ständige Vernetzung der Verkehrsteilnehmer und aktuelle Informationen zu den Verkehrswegen und -lagen, können kooperative und aufeinander abgestimmte Verkehrssituationen geschaffen werden, die über eine Optimierung der Fahrzeugverteilung individuelle Vorteile für den einzelnen Verkehrsteilnehmer ermöglichen. So ist es möglich, Reisezeit einzusparen, den Reisekomfort zu erhöhen und gleichzeitig auch Energieverbrauch und Emissionen aus dem Verkehrssektor zu reduzieren.

Ein optimiertes und vernetztes Verkehrssystem bietet außerdem die Möglichkeit, aktuelle Informationen zu **lokalen Gefahrenstellen** (z. B. Schlaglöcher, vereiste Fahrbahnen, Stauenden, Unfälle) in Echtzeit weiterzugeben, sodass die Verkehrsteilnehmer frühzeitig informiert und ggf. Ausweichrouten definiert werden können. Eine Herausforderung stellt dabei der Übergang vom derzeitigen Zustand nicht- oder nur teilvernetzter Fahrzeuge zur vollen Vernetzung dar, da das Gesamtsystem nur bei möglichst flächendeckender Vernetzung aller Elemente optimal umgesetzt werden kann.

© HERE Global B.V., 2017

Gefahrenwarnung

© Exa Corporation, 2017

Platooning

Auch der LKW- und Güterverkehr kann durch neue Formen der Vernetzung von Fahrzeugen profitieren: Beim sog. **Platooning** werden dicht hintereinander fahrende Fahrzeuge elektronisch zu einer Gesamteinheit gekoppelt und im Verband vom führenden Fahrzeug (manuell) gesteuert. Hochautomatisierte Systeme stellen die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und das korrekte Verhalten der einzelnen Einhei-

ten im „Schwarm“ sicher. Generell ist dieses Konzept auch bei PKW und in urbanen Umfeldern anwendbar, wird aktuell aktuell aber wegen der Rahmenbedingungen vor allem im Fernverkehr verfolgt. Neben Komfort- und Sicherheitsvorteilen auf langen Strecken ist durch verbesserte Aerodynamik bei Kolonnenfahrt auch eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs möglich. Zudem ist durch die geringeren Abstände der Fahrzeuge auch generell eine Steigerung der Kapazitätsauslastung der Straßen umsetzbar.

Digitalisierung ermöglicht zudem neue Formen des Carsharing: An der Schnittstelle von Individual- und öffentlichem Personenverkehr bietet **Carsharing** die Möglichkeit eines umweltschonenderen Verkehrsverhaltens und stellt aufgrund seines Potenzials zur Nutzungsintensivierung und angesichts der Entkopplung vom persönlichen Autoeigentum einen Ansatz dar, der sich an dem Nachhaltigkeitsleitbild „Nutzen statt Besitzen“ orientiert. Aktuelle Studien belegen, dass ein Carsharing-Fahrzeug im Schnitt vier bis acht private PKW in urbanen Räumen ersetzt (Bundesverband Carsharing, 2016).

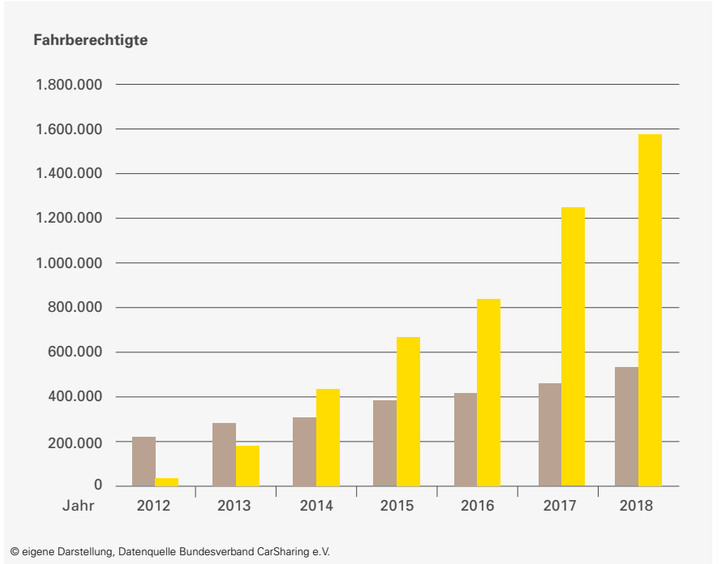
In ursprünglicher Form des Carsharing war es üblich, das Fahrzeug ähnlich wie einen Mietwagen von einer Station abzuholen, zu nutzen und danach wieder dort abzugeben. Im vergleichsweise neuen Ansatz „Free Floating“ sind die Fahrzeuge nicht an festgelegten Verleihstationen positioniert, sondern frei über das Geschäftsgebiet verteilt. Kunden können das nächstgelegene Fahrzeug über die entsprechende Smartphone-App lokalisieren und spontan mieten. Die Nutzer müssen sich zu Mietbeginn weder auf eine Rückgabezeit noch auf einen Rückgabeort festlegen, sondern können das Fahrzeug nach der Nutzung auf einem beliebigen Parkplatz im Stadtgebiet abstellen. Da es sich bei Free Floating um ein innerstädtisches Mobilitätskonzept für Kurzzeitmieten handelt, erfolgt die Abrechnung im Minutentakt und beinhaltet gefahrene Kilometer, Versicherung, Kraftstoff und Parkgebühren. Kunden zahlen eine einmalige Registrierungsgebühr, aber weder Kaution noch monatliche oder jährliche Mitgliedsbeiträge. Hierzu sind Car2Go und DriveNow Beispiele.

Im März 2018 gaben BMW und Daimler bekannt, ihre Carsharing- und Mobilitätsdienste Car2Go und DriveNow in einem Gemeinschaftsunternehmen zusammenzulegen, um sich die Kosten zu teilen, schneller zu wachsen und damit auf die wachsende Konkurrenz durch neue Anbieter besser reagieren zu können (u. a. ZEIT ONLINE, 28.03.2018).

Eine Unterform des Sharing-Ansatzes ist auch **Rideselling** (Fahrdienstvermittlung): Hier werden Fahrdienstanbieter und -nachfrager über eine zentrale Plattform vernetzt. Der Fahrdienstvermittler „Uber“ ist dafür ein prominentes Beispiel. Dessen Angebot an Mobilitätsdienstleistungen ist breit gefächert: von Hubschrauberfahrten über Einkaufsdienste bis hin zu Essenslieferungen. Ihnen allen gemein ist ein sog. Surge-Preismodell, d. h. die dynamische Preisgestaltung, die Fahrten bei starker Nachfrage deutlich teurer werden lässt. Zur Autoindustrie hat Uber ein sehr pragmatisches Verhältnis. So arbeitet das Start-up bereits seit Jahren mit Toyota zusammen. Ziele des Autobauers sind, über die Kooperation zusätzliche Fahrzeuge an Uber-Fahrer zu verkaufen, die den Wagen mit ihren Verdiensten über die App finanzieren können, und zudem Forschungsprojekte zum autonomen Fahren voranzutreiben (Hecking, 2016). In Deutschland und einigen EU-Ländern ist die Vermittlung von privaten Fahrern jedoch aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen (noch) nicht gestattet.

Als weitere, neue Form des Sharing ist das sog. **Ridesharing** (auch Carpooling) zu nennen. Hierbei bieten Privatpersonen Mobilitätsdienste im eigenen PKW an. Internetbasierte Mitfahrzentralen bilden hier Plattformen zur Vermittlung von Mitfahrgelegenheiten, wodurch Fahrtanbieter und Fahrgäste sich begegnen und gemeinsame Fahrten für bestimmte Wegstrecken zurücklegen können. Eine der führenden digitalen Plattformen ist mit rund 5,5 Mio. Nutzern Blablacar. Der Einsatz von Algorithmen zur Berechnung optimierter Fahrtstrecken und bestmöglicher Treffpunkte in Echtzeit auf Basis der von Anbieter und Nutzer zur Verfügung gestellten Daten soll die bedarfsorientierte Ausrichtung weiter erhöhen.

Generell wächst die Nachfrage nach Carsharing-Angeboten in Deutschland beständig: Während im Jahr 2010 noch ca. 150.000 registrierte Nutzer vorhanden waren, stieg die Anzahl bis 2015 schon auf über 1 Mio. Mittlerweile sind über 1,7 Mio. Nutzer registriert (DLR, 2017).



© eigene Darstellung, Datenquelle Bundesverband CarSharing e.V.

Abbildung 30: Entwicklung des Carsharing in Deutschland nach Varianten, Stand 01.01.2018

Wesentlich für den Erfolg des Carsharing ist dessen Einbindung in eine intermodal verknüpfte Mobilität, die flexible Übergänge unterschiedlicher Verkehrsträger ermöglicht. Die Digitalisierung bietet dabei Zugänge zu einer besseren Vernetzung der unterschiedlichen Verkehrsmittel und einer vereinfachten Abrechnung über Apps wie moovel oder Mobilitätskarten wie die polygo-Card des Verkehrsverbunds Stuttgart.

Einer der Pioniere auf dem Gebiet intermodaler Mobilitätsdienstleistungen ist moovel. Das Tochterunternehmen der Daimler AG bietet Kunden mit Smartphone-basierten Dienstleistungen flexible, bedarfsorientierte Mobilitätslösungen an. Die Smartphone-App erlaubt es Kunden, unterschiedliche Mobilitätsangebote zu vergleichen und so den optimalen Weg zum Zielort zu finden. Damit können verschiedene Mobilitätsoptionen wie öffentliche Verkehrsmittel, Car- und Bikesharing, Taxi oder Mitfahrgelegenheit bequem im Hinblick auf Zeitaufwand und Kosten verglichen werden. moovel integriert das Buchen und Bezahlen von Deutsche-Bahn- und mytaxi-Fahrten.

Insgesamt treten gerade bei den durch die Digitalisierung und Vernetzung der Fahrzeuge entstehenden Mobilitätsdienstleistungen und -angeboten neue Anbieter in den Markt ein. Zudem konkurrieren die „klassischen“ Fahrzeugherstel-ler und Kfz-Zulieferer mit Unternehmen aus den Informations- und Kommunikationstechnologien, die ebenfalls Geschäftspotenziale in einem vernetzten und automatisierten Mobilitätssystem erschließen wollen. So haben Google, Amazon und Tesla beispielsweise in relativ kurzer Zeit das nötige Know-how entwickelt und drängen mit neuartigen Mobilitätsangeboten in Verkehrsmärkte (Kollosche und Schwedes, 2016).

Die klassischen Automobilbauer reagieren darauf, indem sie das ursprüngliche Geschäftsmodell um zusätzliche Angebote und Dienstleistungen erweitern: So will sich VW unter dem Begriff „New Volkswagen“ beispielsweise vom reinen Autobauer zum „Mobilitätsanbieter“ entwickeln (Handelsblatt, 2016). Die Daimler AG ist neben moovel beispielsweise auch an der Smartphone-App „mytaxi“ beteiligt, zudem im Besitz von Car2Go, dem weltweit größten Anbieter von stationsunabhängigem Carsharing mit knapp 50.000 Fahrzeugen und weltweit 1,2 Mio. Kunden. Auf Wunsch der Kunden wird das Geschäftsmodell derzeit mit größerer Modellvielfalt (zusätzlich zum Smart auch A- und B-Klasse sowie GLA und CLA) für unterschiedliche Mobilitätsanlässe erweitert und um weitere Fahrzeuge vergrößert. Allerdings wurden im Geschäftsbericht 2015 Verluste für Deutschland, die USA, Kanada und Italien in Höhe von 64 Mio. Euro ausgewiesen, die auch mit den Kosten für den Geschäftsausbau begründet wurden. Es gibt

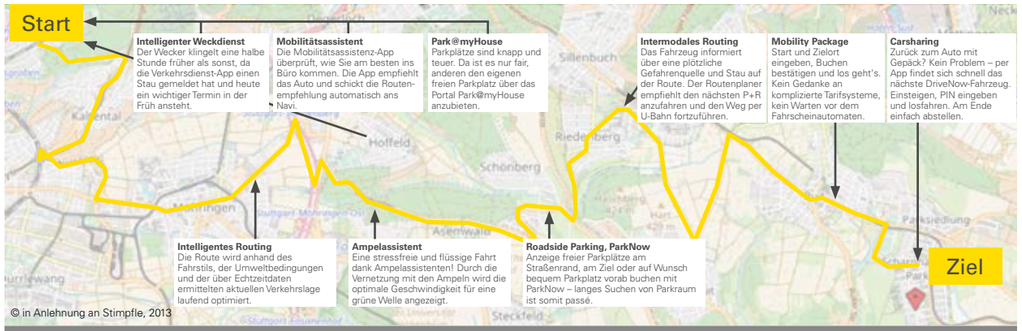


Abbildung 31: Aktuelles digitales Geschäftsmodell am Beispiel BMW AG

noch keine Aussagen darüber, wann Car2Go flächendeckend wirtschaftlich erfolgreich arbeiten könnte. Nach eigenen Angaben sind bei der Daimler AG 800 Mitarbeiter mit der Forschung zu neuen Mobilitätskonzepten und neuen Antrieben beschäftigt. Zudem hat die Mercedes-Benz Bank eine Vorreiterrolle beim vollständig digitalen Fahrzeugkauf übernommen (Greencar Magazine, 2018). BMW liefert ein weiteres Beispiel eines digitalen Geschäftsmodells und zeigt auf, was ein klassischer Fahrzeughersteller perspektivisch anbieten kann.

BMW denkt dabei über das bisherige Geschäftsmodell hinaus und betrachtet nicht nur Verkauf und Instandhaltung, sondern weitere digitale Möglichkeiten. Diese werden mit einer Beispielfahrt einer „Customer Journey", wie in Abbildung 31 zu sehen, illustriert.

Eine begleitende Entwicklung ist die Entstehung neuer branchenübergreifender Partnerschaften wie die Kooperation zwischen u. a. BMW, Fiat/Chrysler, Intel, Mobileye, Magna und Delphi zur Bereitstellung einer Plattform für autonome Fahrzeuge, die sich flexibel für die Integration durch verschiedene Automobilhersteller anpassen lässt. Das Ziel ist der Einsatz der Plattform im Jahr 2021. Eine ähnlich neuartige Zusammenarbeit an einem selbstfahrenden Fahrzeug mit künstlicher Intelligenz verbindet Audi und den Chiphersteller NVIDIA (Dittberner, 2017).

Eine BMW Perspektive:

Morgens weckt die in die ConnectedDrive-App integrierte Weckfunktion den Nutzer passend zur aktuellen Verkehrsinformation. Beim Frühstückskaffee kann dann durch eine Mobilitätsassistenz-App der beste Weg ins Büro gefunden werden. Die App empfiehlt das Auto und schickt die Routenempfehlung an das Fahrzeug. Parkplätze in Büronähe sind schwer zu finden, sodass BMW die Möglichkeit anbietet, Park@myHouse zu nutzen, wobei Privatpersonen den Parkplatz vor ihrer Haustür anbieten können. Während der Fahrt wird die Route anhand des Fahrstils, der Umweltbedingungen und der in Echtzeit gelieferten Verkehrsdaten laufend optimiert. In der Innenstadt unterstützt der Ampelassistent eine flüssige und stressfreie Fahrt. Durch ParkNow ist es möglich, innerhalb des Navigationssystems freie Parkplätze angezeigt zu bekommen. Langes Suchen von Parkraum entfällt dadurch. Nachmittags auf dem Weg zum Kongress informiert das Fahrzeug durch intermodales Routing, welches Verkehrsmittel das optimale für den zurückzulegenden Weg ist. Mithilfe des Mobility Package kann die Fahrkarte direkt über das Smartphone gebucht werden. Für den Rückweg empfiehlt sich dann ein Carsharing-Dienst mit DriveNow (Stimpfle, 2013).

Auch öffentliche Verkehrsunternehmen sehen sich als Anbieter neuer Mobilitätsdienstleistungen. Mit dem Ausbau der Informationstechnik sind in immer größerem Umfang anbieterübergreifend Informationen zu durchgehenden Reiseketten oder zur Verfügbarkeit von Verbindungen nutzbar. Denkbar werden hier neue Optionen neben dem Taktfahrplan, bei denen stärker nach Bedarf gefahren wird, und neue Abrechnungslösungen. Allerdings entsteht zusätzlicher Aufwand für die technischen Lösungen zum Datenaustausch und für die regelmäßige Informationspflege. Inwieweit öffentliche Verkehrsunternehmen einen damit möglicherweise verbundenen Trend zu weiterer Flexibilisierung und Individualisierung bedienen können, ist offen.

Weiterhin sind die Hersteller über den gesamten Lebenszyklus eng mit ihrem Produkt verbunden, auch während der Nutzungsphase, da die Fahrzeuge jederzeit Informationen zum Zustand an eine Zentrale senden können. Dieses Wissen ermöglicht neue Angebote und über zusätzliche Services potenzielle Einnahmequellen. Ebenso wichtig ist aber auch der neue Zugangskanal zum Kunden: Gerade im Bereich der Gebrauchtwagen gibt es nun die Möglichkeit, mit den bisher unbekannten Käufern in Kontakt zu treten. Der Kunde und die Informationen über ihn sowie das Fahrzeug werden daher immer wichtiger. Hersteller und andere Unternehmen, wie z. B. Versicherungen, sind an diesen Daten interessiert und bereit, dafür zu bezahlen. Von Interesse sind sowohl fahrerbezogene als auch anonymisierte Massendaten. So hat Capgemini als eines der großen Beratungshäuser der Automobilbranche auf das Dreieck aus vernetztem Fahrzeug, vernetztem Kunden und den Möglichkeiten, diese Daten mithilfe von Big Data Analytics optimal auszuwerten, hingewiesen.

Auch Werbung im Fahrzeug wird als potenziell großes Geschäftsmodell angesehen. Welches Potenzial in diesem Geschäft steckt, haben bereits Unternehmen wie Google gezeigt. Mit dem neuen Wissen über Kunden und ihre Vorlieben, typische Fahrtwege oder auch die aktuelle Position kann Werbung zielgerichteter wirken als bisher. Die ersten Hersteller bieten bereits Einkaufsmöglichkeiten im Fahrzeug an, wenn auch vorerst nur für Telematikdienste (Weyer und Grambow, 2018; IAO und Horvath, 2016).

Die Beispiele und Ansätze zeigen, dass infolge der Digitalisierung, des Zugangs zu Daten und der Geschwindigkeit der Veränderung sehr schnell neue Geschäftsmodelle durch Start-ups sowie kreative Ideen entstehen können. Diesem speziellen Ansatz wird allgemein eine hohe Bedeutung beigemessen und alle größeren Stakeholder befassen sich mit dieser Option.

Insgesamt ist zu erwarten, dass die Vernetzung und die Automatisierung des Fahrens durch die Zunahme von Assistenzsystemen und zugehörigen Diensten zu einer Erhöhung der Wertschöpfung im Automobilbau führen. Nach Angaben einer Studie der Unternehmensberatung Frost und Sullivan soll der globale Markt für autonomes Fahren 2025 bis zu 83 Mrd. US-Dollar erreichen (Frost und Sullivan, 2017). Eine Studie der Deutschen Bank sieht den kontinuierlich wachsenden Markt demgegenüber aber nicht vor dem Jahr 2040 von autonomen Fahrzeugen durchdrungen.

Regularien, Normen und Standards

Exkurs: Status zur Rechtslage des automatisierten Fahrens (Stand 03/2018)

Der Bundestag hat am 30.03.2017 die Regelungen zum Fahren von Autos mit hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktion verabschiedet. Der Gesetzentwurf stellt klar, dass der Betrieb im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung zulässig ist. Ferner wird geregelt, dass im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung die Funktionen genutzt werden können, wenn der Fahrzeugführer besonders geregelte Pflichten zur unverzüglichen Wiederaufnahme der Fahrzeugsteuerung beachtet. Damit darf sich der Fahrzeugführer im Fall, dass das Fahrzeug die Kontrolle übernommen hat, vom Verkehrsgeschehen und von der Fahrzeugführung abwenden. Allerdings muss er wahrnehmungsbereit sein und jederzeit die Steuerung wieder übernehmen können, wenn die Verkehrssituation es erfordert bzw. das System dazu auffordert. Die Verantwortung bleibt also beim Fahrer. Mit der aktuellen Rechtslage ist eine Grundlage geschaffen, um zumindest hochautomatisierte Fahrzeuge rechtssicher in den Verkehr bringen und betreiben zu können. Das Thema automatisiertes Fahren ist jedoch nach allgemeinem Verständnis noch nicht hinreichend geregelt und bedarf weiterer deutlicher Anpassungen.

Für die Einführung von autonomen Systemen müssen diverse nationale sowie internationale rechtliche Bedingungen und Vereinbarungen, wie bspw. das Straßenverkehrsrecht, eingehalten bzw. überarbeitet werden. Auf der rechtlichen Seite stehen dem automatisierten oder autonomen Fahren noch einige große Hindernisse gegenüber, denn mit derzeit gelten-

dem Recht und den definierten Regelungen sowie den technischen Richtlinien sind nur Fahrerassistenzsysteme und eingeschränkt teilautonome Systeme zulässig. Ein entscheidender Faktor ist, dass der menschliche Fahrer als Hauptadressat der Fahraufgabe das Fahrzeug jederzeit überwachen muss, um gegebenenfalls übersteuernd eingreifen zu können.

Die Bundesregierung beschloss im März 2017 erste Regelungen zum autonomen Fahren – zu einer der Schlüsseltechnologien in puncto Mobilitätswandel. Kern des Gesetzes ist die rechtliche Gleichstellung von menschlichem Fahrer und Computer. Hoch- oder vollautomatisierte Fahrsysteme dürfen damit künftig die Fahraufgabe selbstständig übernehmen. Der Fahrer darf dem Gesetz zufolge bei der hochautomatisierten Fahrt die Hände vom Lenkrad nehmen, um etwa im Internet zu surfen oder E-Mails zu checken. Eine Rückübernahme der Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer ist nur dann vorgeschrieben, wenn das System ihn dazu auffordert oder die Verkehrssituation es erfordert. Die allgemeine Formulierung des Gesetzesentwurfs stößt auf Kritik, Konkretisierungen zum Vorteil der Fahrer werden gefordert (Spiegel, 2017).

Die Vorstellung, fahrfremden Nebentätigkeiten während eines autonomen Fahrbetriebs nachgehen zu können, ist somit vorerst weitgehend nicht erfüllbar. Der automatisierte Betrieb, wie er ab Stufe 3 definiert wird, bei dem das Fahrzeug sowohl die Längs- als auch die Querführung vollständig übernimmt und der Fahrzeugführer das System nicht dauerhaft überwachen muss, ist weiterhin nicht zulässig. Auch die Problematik der Dilemma-Situationen kann mit rechtlichen Mitteln nicht gelöst werden, da sich ein System, das im Ernstfall die Tötung eines Menschen zulässt, verfassungsrechtlich nicht durchsetzen lässt.

Fest steht, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen neu ausgehandelt und bestehende Regelungen sowie internationale Verträge und Richtlinien modifiziert und ergänzt werden müssen (Bach, 2016). Unstrittig ist dabei, dass der Einsatz autonomer Systeme statt menschlicher Fahrer eine Vielzahl von Menschenleben retten könnte. Logik und Statistik sind aber nicht ausreichend für die Akzeptanz beim Menschen, weil sie den Bereich der damit einhergehenden ethischen Dilemmata außen vor lassen. Zur Diskussion der ethischen Fragen rund um das automatisierte und vernetzte Fahren hat die Bundesregierung eine Ethik-Kommission eingesetzt, die im Sommer 2017 einen ersten Bericht vorgelegt hat. Der Bericht der Ethik-Kommission umfasst insgesamt 20 Thesen (BMVI, 2017).

Kernpunkte sind:

- Das automatisierte und vernetzte Fahren ist ethisch geboten, wenn die Systeme weniger Unfälle verursachen als menschliche Fahrer (positive Risikobilanz).
- Sachschaden geht vor Personenschaden: In Gefahrensituationen hat der Schutz menschlichen Lebens immer höchste Priorität.
- Bei unausweichlichen Unfallsituationen ist jede Qualifizierung von Menschen nach persönlichen Merkmalen (Alter, Geschlecht, körperliche oder geistige Konstitution) unzulässig.
- In jeder Fahrsituation muss klar geregelt und erkennbar sein, wer für die Fahraufgabe zuständig ist: der Mensch oder der Computer.
- Es muss dokumentiert und gespeichert werden, wer fährt (u. a. zur Klärung möglicher Haftungsfragen).
- Der Fahrer muss grundsätzlich selbst über Weitergabe und Verwendung seiner Fahrzeugdaten entscheiden können (Datensouveränität).

2.3 Automobil-Produktion 4.0

In Kürze:

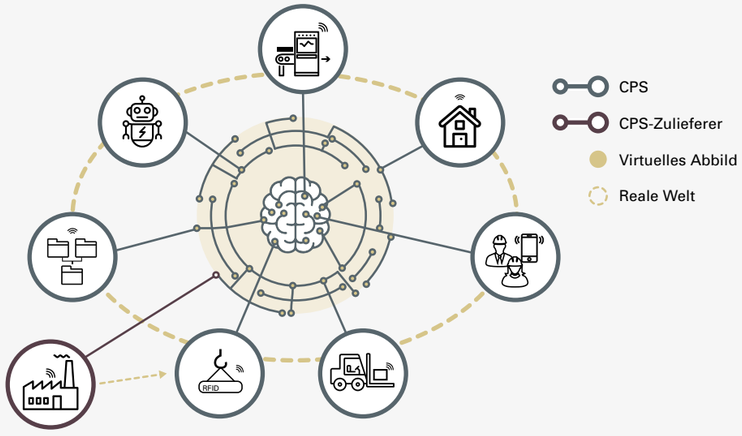
- Mit dem Schlagwort „Industrie 4.0“ ist die Vorstellung einer hochautomatisierten und flexibilisierten Produktion verbunden, die durch den flächendeckenden Einsatz digitaler Technologien ermöglicht wird. Umgesetzt ist dieses Konzept aktuell jedoch nur in einzelnen Bereichen oder Betrieben.
- Die Automobilindustrie reagiert auf den intensiven Wettbewerbsdruck mit einer kontinuierlichen Anpassung der Produktion und der eingesetzten Produktionstechnologien, sie gilt als ein Impulsgeber und Treiber für die Modernisierung von Fertigungs- und Logistikkonzepten.
- Die Anwendung von Industrie 4.0-Konzepten wird daher mittelfristig die Produktionsarbeit und damit auch die Qualifikationsstruktur der Beschäftigten in der Automobilindustrie deutlich verändern.
- Die (Netto-)Beschäftigungswirkungen der Industrie 4.0-Konzepte sind zurzeit nur schwer quantifizierbar.

Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf der Untersuchung der strukturellen Wirkungen des technologischen Wandels im Kfz und beschreibt die damit einhergehende Transformation der Automobilbranche Baden-Württembergs. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Automobilbranche ebenfalls einem technologischen Wandel in Produktion, Entwicklung und Verwaltung unterworfen ist, der allgemein unter Begriffen wie „Industrie 4.0“, „Internet of things“ oder „Digitalisierung der Produktion“ diskutiert wird. Auch dieser Transformationsprozess wird Wirtschaftsstruktur und Beschäftigung in der Automobilbranche in Baden-Württemberg deutlich verändern, deshalb sei er an dieser Stelle kurz beschrieben.

2.3.1 Digitalisierungskonzepte

Kürzer werdende Innovationszyklen und eine wachsende Bedeutung individualisierter Kundenwünsche stellen die Produktionsunternehmen vor große Herausforderungen: „Modellzyklen mit einer Länge von fünf bis acht Jahren, wie sie bislang in der Branche üblich waren, dürften schon bald der Vergangenheit angehören. Stattdessen wird die Modellpalette jährlich aktualisiert …“ (PWC, 2017). Die Automobilindustrie reagiert seit Jahren mit Differenzierung der Modelltypen und Steigerung der Ausstattungsvarianten auf veränderte Marktbedingungen. An die Werke der OEM und mehr noch an deren Zulieferer werden so höchste Flexibilitätsanforderungen gestellt. Diese können als wesentliche Treiber für die historische Entwicklung der Produktionskonzepte in der Automobilbranche gesehen werden. Die eng mit der Erfolgsgeschichte der Automobilindustrie verbundene fordistische Massenproduktion setzte auf Skaleneffekte großer Fertigungslose (Industrie 2.0). Ab den 1970er Jahren führte der vermehrte Einsatz digitaler Maschinensteuerungen und flexibler Automatisierung zu größerer Produktionsflexibilität (Industrie 3.0). Lean-Konzepte und ganzheitliche Produktionssysteme unterstützten seit den 1990er Jahren diesen Flexibilisierungsprozess organisatorisch. Industrie 4.0 ermöglicht nun durch die digitale Vernetzung aller Wertschöpfungsschritte im Unternehmen und außerhalb die Optimierung des Produktionsprozesses mit Echtzeitdaten. Hohe Agilität der Produktionskonzepte und höchste Effizienz auch bei kleinen Losgrößen sollen so realisiert werden (Kagermann et al., 2013; BITKOM und Fraunhofer IAO, 2014; Wolf et al., 2018).

Technologisch wird dies durch die fortschreitende Entwicklung von IT-Technologien, Sensortechnik, künstlicher Intelligenz und digitaler Vernetzung ermöglicht. Am Beispiel der digitalen Fabriksteuerung in der Smart Factory lässt sich die Vision der Industrie 4.0 anschaulich verdeutlichen. Nach vollständiger Umsetzung dieser Konzepte wird es möglich sein, alle Objekte eines Geschäftsprozesses mit ihrem „digitalen Zwilling“ („Digital Twin“) in einer virtuellen Parallelwelt abzubilden, wo dann durch Data Mining und künstliche Intelligenz autonome Entscheidungen getroffen und auf die reale Welt übertragen werden. Im Gegensatz zu den gescheiterten CIM-Konzepten (CIM – Computer-integrated Manufacturing) der 1990er Jahre handelt es sich hierbei nicht um ein IT-gestütztes zentrales Produktionssteuerungsprogramm. Vielmehr verschmelzen physische und virtuelle Welt in Form von cyberphysischen Systemen (CPS), die sich in dezentralen Datennetzen zu verteilter Intelligenz organisieren. Der aktuelle Status von Maschinen, Materialien, Zwischenprodukten, Betriebsaufträgen, Beschäftigten etc. wird in diesem Cyber-Abbild der Produktionswirklichkeit in Echtzeit vorgehalten. Damit können die beteiligten cyberphysischen Systeme autonome Entscheidungen treffen, die alle relevanten Einflussgrößen des Gesamtsystems berücksichtigen. So können mit RFID-Chips gekoppelte Werkstücke ihren Produktionsweg durch die Werkshalle selbstständig navigieren. Intelligente Maschinen kommunizieren mit anderen Maschinen (M2M) und schicken unzählige Maschinenzustandsdaten in die Cloud, in der KI-Systeme kontinuierlich den Zustand der Maschinen diagnostizieren, Maschinenparameter optimieren und vorsorgende Wartungsarbeiten auslösen. In ähnlicher Weise werden auch die unternehmensexternen Kunden-, Lieferanten- und Logistikprozesse umfassend digitalisiert und als virtuelles Abbild im Datennetzwerk integriert. Produktionsprobleme bei Zulieferern oder Störungen im Logistikprozess können so in der Cyber-Realität des Produktionsprozesses berücksichtigt werden, lange bevor der Wareneingang im Unternehmen Fehlteile registriert (Fraunhofer IPA, 2014; Bruhn und Hadwich, 2017; Lerch et al., 2017; Ziemke, Stöckel und Thomsen, 2016).



© eigene Darstellung

Abbildung 32: Smart Factory – dezentrale Intelligenz im Datennetz cyberphysischer Systeme (CPS)

Mit diesen umfassenden Echtzeitdaten aus den Produktionsprozessen und der Produktionsumwelt können im Cyber-Abbild der Produktionswirklichkeit kontinuierlich und in höchster Geschwindigkeit unzählige Fabriksteuerungsvarianten simuliert und der optimale Produktionsprozess ermittelt werden. Im Netzwerk installierte künstliche Intelligenz kann auf diese Weise eigene Prozesserfahrungen machen (als „nicht triviale Maschine“) und schließlich autonome Entscheidungen treffen (Brödner, 2015).

2.3.2 Technologien

Diese Vision von Industrie 4.0 ist aktuell noch in keinem Unternehmen vollständig realisiert. Allerdings können die dazu notwendigen Technologien schon in vielen Beispielen und Pilotprojekten gerade auch in der Automobilindustrie gefunden werden (Bauernhansl, ten Hompel und Vogel-Heuser, 2014). Beispielsweise wird derzeit im Mercedes-Benz Werk in Sindelfingen die Informationserfassung entlang des gesamten Fertigungsprozesses für jeden Arbeitsschritt „digitalisiert“: „Statt eines Papierblattes, das mit Klebestreifen am Chassis befestigt ist und mit Häkchen dokumentiert, was Werker an jeder Station machen, lesen Kameraaugen jeden Arbeitsschritt ein und zeigen am Monitor den aktuellen Arbeitsstatus“ (Habrich-Böcker und Beuthner, 2017: 59). Audi setzt für die Fertigung des neuen A8 derzeit in Neckarsulm eine „modulare Montage“ um, die künftig ohne das klassische Fließband auskommen soll. Die Fahrzeuge fahren selbstständig bzw. mit fahrerlosen Transportsystemen an die jeweils nächste Fertigungsstation. Damit wird die statische Kopplung der einzelnen Arbeitsschritte (Fließband) von einer flexiblen und echtzeitdatengesteuerten Arbeitsorganisation abgelöst. In der dualen Berufsausbildung von Audi werden Ausbildungsinhalte örtlich und zeitlich flexibel über Tablets vermittelt (weitere Beispiele bei Spath, 2013; Bornemann, 2015; Arntz et al., 2016; Korge, Schlund und Marrenbach, 2016; Mandl, 2017).

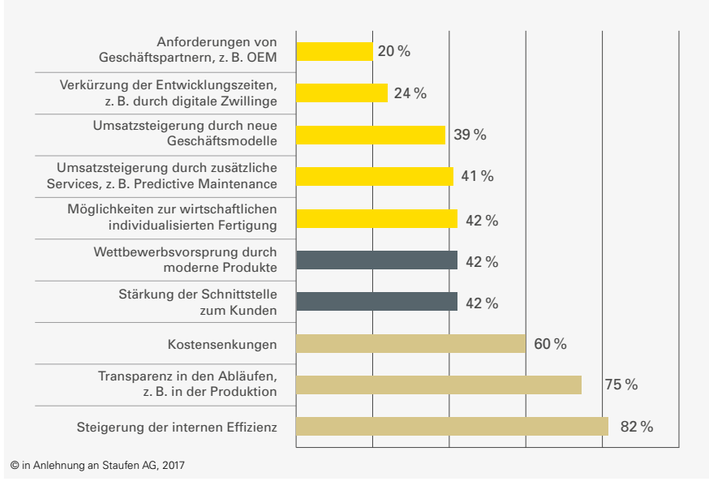
Ein weiteres Einsatzfeld der neuen digitalen Technologien sind die Logistikbereiche. Zunehmend konfigurieren Lagerarbeiter ihre Aufträge mit digitalen Assistenzsystemen (Datenbrille, Pick-by-Voice). Materialkisten am Montageplatz melden ihren Füllstand autonom ans Lager, an den Lieferanten oder starten selbstständig Fertigungsaufträge. Vollautomatische Flurförderzeuge liefern die Teile termingenau an ihren Bestimmungsort (Mättig, Jost und Kirks, 2018).

Bei Wartungs-/Instandhaltungsarbeiten sowie bei externen Serviceeinsätzen werden Tablets zur Unterstützung der Einrichter eingesetzt. Datenbrillen visualisieren technische Zeichnungen und Montagehinweise direkt ins Sichtfeld der Servicemitarbeiter. Bei komplexen Fragestellungen können sie online mit den Experten in der Zentrale kommunizieren, die indirekt über die Datenbrille des Servicemitarbeiters den Reparaturvorgang auch visuell verfolgen können. Instandhaltungsbeschäftigte werden mit Datenbrillen an virtuellen Produktionsanlagen ausgebildet. Werkzeugmaschinen sind über eine Cloud mit den Maschinenbauern vernetzt, lösen Verschleißteilbestellungen automatisch aus und minimieren Ausfallzeiten über „Predictive Maintenance“ (vorausschauende Wartung) (Schreier, 2017).

Auch in der Verwaltung werden die neuen digitalen Möglichkeiten schon umfassend genutzt. Digitale Vernetzung und insbesondere die Nutzung des Internets schaffen hier neue Möglichkeiten eines „globalen Informationsraums“ (Boes und Kämpf, 2016). Mobiles Arbeiten, internationale Arbeitsteams, aber auch vermehrter Einsatz externer Mitarbeiter lassen den traditionellen Betriebsbegriff verschwimmen. Im Büro führt die Anwendung von Rationalisierungskonzepten wie beispielsweise „Lean Office“ zusammen mit einer zunehmenden Datenvernetzung zu einer neuen Arbeitssteuerung im digitalen Workflow. Internetplattformen und Produktkonfiguratoren digitalisieren den Kunden- und Lieferantenkontakt, Selfservice-Funktionen ersetzen im Personalbereich Teile der persönlichen Mitarbeiterbetreuung. Betriebliche Social Media digitalisieren und standardisieren die Kommunikation und das Wissensmanagement im Unternehmen. In der Automobilwirtschaft verändern sich dadurch nicht nur Arbeitsabläufe bei den Herstellern und Zulieferern, sondern vor allem das Kfz-Gewerbe steht vor großen Veränderungen (Seibold und Stieler, 2016; Dispan, 2017; Dispan und Stieler, 2018).

Die vollständige Umsetzung der „Industrie 4.0“ wird allerdings weder kurzfristig noch mittelfristig abgeschlossen sein. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass die umfassende und flächendeckende Umsetzung noch bis zu 20 Jahre dauern wird. Viele der dafür notwendigen technischen Grundlagen befinden sich noch in einem Forschungsstadium, das eine industrielle Nutzung vor 2030 eher unwahrscheinlich macht. So sind beispielsweise selbstorganisierende Kommunikationsnetze, miniaturisierte intelligente Sensorik oder Semantikvisualisierung heute noch Gegenstand von Grundlagenforschung. Zudem stehen anbieterunabhängige Standards wie die Kommunikation von Teilen mit ihren Bearbeitungsmaschinen noch aus. All das sind aber wichtige Voraussetzungen für die vollumfängliche Realisierung der Industrie 4.0-Vision (Bischoff, 2015; Korge, Schlund und Marrenbach, 2016).

Auf der anderen Seite darf die hohe Dynamik in der Umsetzung betrieblicher Digitalisierungsstrategien nicht unterschätzt werden. Die zur Verfügung stehenden Industrie 4.0-Technologien werden aktuell in vielen Unternehmen eingesetzt und führen dort zu Prozessinnovationen und Rationalisierungseffekten, in einigen Fällen auch zu neuen Geschäftsmodellen. Außerdem wird die Organisation von globalisierten Produktionsnetzwerken und verteilten Wertschöpfungsketten durch die Digitalisierung unterstützt und damit beschleunigt. Die durchgängige Datenvernetzung der internationalen Produktionswerke ermöglicht höchste Flexibilität bei der Kapazitätsplanung sowie beim Benchmarking der Werksperformance. Der direkte Zugriff auf die Produktions- und Plandaten von Zulieferern und Kunden steigert die Effizienz und Flexibilität der unternehmensübergreifend organisierten Wertschöpfungsketten. Eine Studie der Staufen AG (2017) veranschaulicht allerdings, dass aktuell die Motive der Unternehmen für den Einsatz von Industrie 4.0-Lösungen noch eher „konservativ“ sind.



© in Anlehnung an Staufen AG, 2017

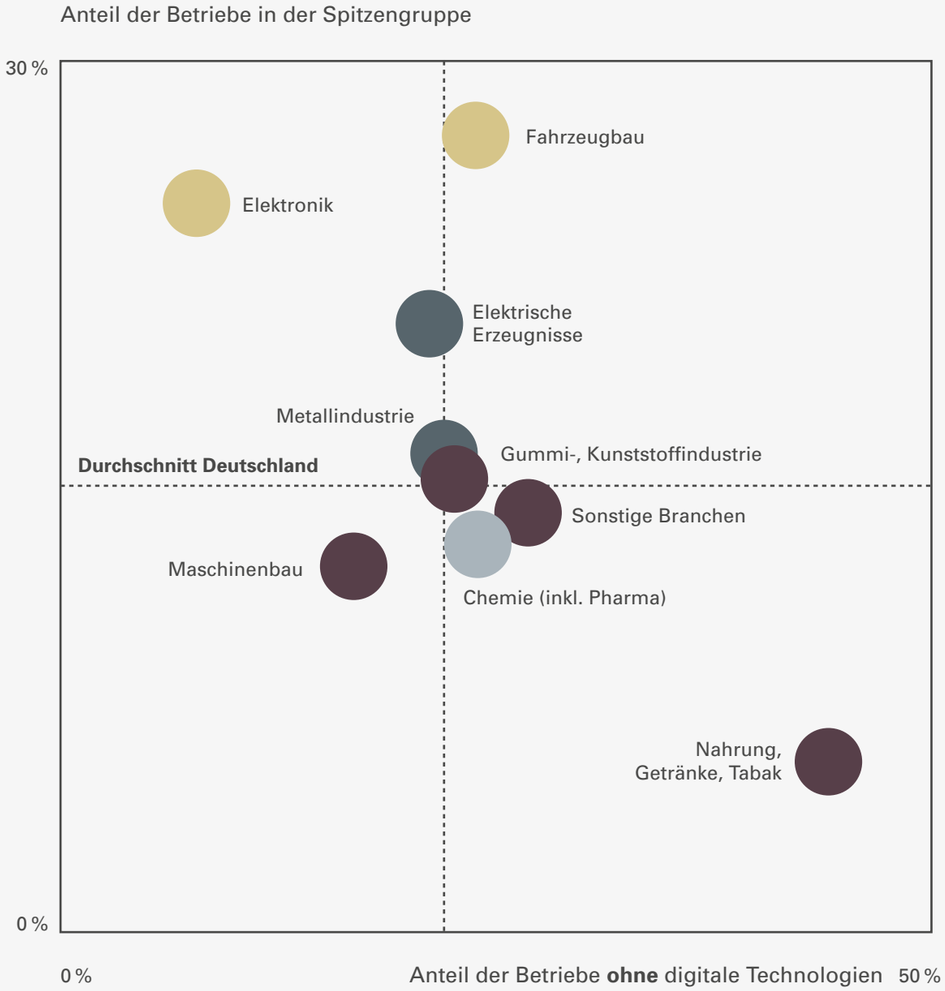
Abbildung 33: Digitalisierungsmotive der Industrie-4.0-Anwender

Effizienzsteigerung, Transparenz in den Produktionsprozessen und Kostensenkung werden als die absolut häufigsten Motive für Industrie-4.0-Anwendungen genannt, während neue Geschäftsmodelle, Kundenwünsche oder verkürzte Entwicklungszeiten deutlich seltener genannt wurden. Industrie 4.0 erscheint zurzeit in den Motiven der Unternehmen noch eher als klassisches Automatisierungsinstrument denn als neue virtuelle Produktionswirklichkeit. Daher zeigen sich in den unterschiedlichen Branchen und Unternehmen differenzierte Umsetzungsgeschwindigkeiten (Brändle und Morlock, 2017). Allgemein wird davon ausgegangen, dass der Fahrzeugbau einer der Hauptanwender der neuen digitalen Produktionsstrategien werden wird. Die hohen und immer weiter steigenden Flexibilisierungsanforderungen individualisierter Märkte und der globale Preisdruck erfordern mittlerweile im Fahrzeugbau höchste Prozesseffizienz und Produktivitätsfortschritte. So war der Fahrzeugbau – und zwar sowohl die Endhersteller als auch deren Zulieferer – bei der Entwicklung und Anwendung neuer Produktionstechnologien und -methoden schon immer Vorreiter (z. B. Lean Management und ganzheitliche Produktionssysteme). Ein von der Staufen AG jährlich erhobener Industrie 4.0-Index scheint diese Vorreiterrolle des Fahrzeugbaus zu bestätigen: Für die Automobilbranche wird hier mit 46 von 100 möglichen Punkten der höchste Branchenindex ermittelt (Durchschnitt über alle Branchen = 41). Dieser Index ist seit seiner Erhebung im Jahr 2014 um den Faktor 2,5 gestiegen. Das zeigt die ausgeprägte Dynamik der Entwicklung.

Lerch et al. (2017) haben aus der Analyse des Einsatzes unterschiedlicher Digitalisierungstechnologien einen Industrie 4.0-Readiness-Index abgeleitet. Eine Branchenauswertung der Daten zeigt, dass der Fahrzeugbau den höchsten Anteil der Betriebe in der Industrie 4.0-Readiness-Index-Spitzengruppe stellt. Allerdings sind hier auch überproportional viele Betriebe mit dem geringsten Industrie 4.0-Index, die „Nichtnutzer", zu finden.

Dieses von den Verfassern als Industrie 4.0-Polarisierung der Branche beschriebene Phänomen ist vermutlich der starken Betriebsgrößendifferenzierung der Branche geschuldet. Denn gerade bei kleinen Betrieben zeigte sich ein sehr hoher Anteil von „Nichtnutzern".

Die vorgestellten Studien und betrieblichen Beispiele zeigen, dass Industrie 4.0-Technologien immer stärker in den Unternehmen eingesetzt werden, wenn auch die vollständige Umsetzung der Industrie 4.0-Vision noch in der Zukunft liegt. Aber schon eher konventionell motivierte Automatisierungsansätze können zu grundsätzlichen Veränderungen der Mensch-Maschinen-Schnittstelle in der Arbeit und vermutlich zu großen Rationalisierungseffekten führen. In der Forschung werden zurzeit unterschiedliche und teilweise gegensätzliche Auswirkungen auf Unternehmen, Beschäftigung und Qualifikationsstruktur der Beschäftigten diskutiert, von der Erleichterung und Aufwertung der Arbeit durch den Einsatz von Robotern und Assistenzsystemen bis hin zur starken Polarisierung von niedrig qualifizierter Zuarbeit für Maschinen und Expertentätigkeiten (Absenger et al., 2016; Ittermann, Niehaus und Hirsch-Kreinsen, 2015; Pfeiffer et al., 2016; Huchler, 2016; Hirsch-Kreinsen et al., 2018).



© Lerch et al., 2017

Abbildung 34: Anteile der Betriebe im Industrie-4.0-Readiness-Index nach Branchen

03

Branchenbeschreibung und Marktanalyse

VVS Films/
AdobeStock

03

Branchenbeschreibung und Marktanalyse

© vadimguzhva/istockphoto

In Kürze:

- Die Automobilindustrie ist in Baden-Württemberg eine der industriellen Kernbranchen. Allein die „Herstellung von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen" mit einem Jahresumsatz von gut 105 Mrd. Euro (2017) erbringt rund ein Zehntel der gesamten Bruttowertschöpfung des Landes.
- Die direkten und indirekten Beschäftigungseffekte der Automobilindustrie sind für knapp 11 % der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigungsverhältnisse in Baden-Württemberg verantwortlich.
- Fast 470.000 Beschäftigte sind im gesamten Automobilcluster in Baden-Württemberg tätig, davon knapp 312.000 im Wertschöpfungskern und 74.000 in FuE-nahen Arbeitsfeldern.

Die Automobilbranche ist eine der Kernindustriebranchen in Deutschland und Baden-Württemberg mit entsprechend hoher Bedeutung für die jeweilige Wertschöpfungs- und Beschäftigungssituation. Mit über 470.000 Beschäftigten bilden die Unternehmen den größten „Arbeitgeber" im Bundesland und tragen in hohem Maße zum Erfolg und zur herausragenden Position in Forschung, Entwicklung und Innovation im internationalen Vergleich bei. Entsprechend stark ist die Branche auch vom Technologiewandel betroffen – wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben.

Im Folgenden werden zunächst die Automobilbranche Deutschlands und insbesondere Baden-Württembergs detailliert analysiert und die Besonderheiten der dortigen Wertschöpfungs- und Beschäftigungsstruktur dargestellt. Anschließend werden die derzeitige Marktsituation im Automotive-Bereich generell sowie in der Elektromobilität im Speziellen dargestellt und die wesentlichen politischen Rahmenbedingungen für Deutschland und Baden-Württemberg im internationalen Vergleich zusammengefasst.

Unter „Automobilcluster" bzw. „Automobilwirtschaft" werden in dieser Studie diejenigen Unternehmen zusammengefasst, die sich auf die Produktion, den Vertrieb, die Werkstätten sowie weitere Dienstleistungen um Kraftfahrzeuge (PKW und Nutzfahrzeuge) ausgerichtet haben. Teil davon ist die „Automobilindustrie", mit der die Unternehmen aus dem verarbeitenden Gewerbe zusammengefasst sind. Im Folgenden wird differenziert nach dem Wertschöpfungskern, dem Wertschöpfungscluster und dem gesamten Automobilcluster. Zum Wertschöpfungskern, der auf die Herstellung von Kraftfahrzeugen spezialisiert ist, zählen die Endhersteller von Fahrzeugen (OEM) und die Zulieferer (Tier 1 und 2), deren Produkte in enger Kooperation mit den Endherstellern entwickelt und produziert werden. Diese Unternehmen des Wertschöpfungskerns bilden das Innovationscluster der Automobilindustrie. Die Erweiterung zum Wertschöpfungscluster schließt diejenigen Zulieferer ein, deren Produkte bzw. Dienstleistungen zwar in die Herstellung der Fahrzeuge einfließen, die sich aber nicht auf diese Branche spezialisiert haben. Das sind beispielsweise Materiallieferanten, die sich durch ihre Prozesskompetenz z. B. in der Metallbearbeitung oder der Beschichtung von Oberflächen auszeichnen. Die Ergänzung mit dem Kfz-Gewerbe führt schließlich zum vollständigen Automobilcluster.

Der Begriff der „Fahrzeugindustrie" bezieht sich auf die enger gefasste Branchenabgrenzung der Wirtschaftsstatistik, umfasst also den Wirtschaftszweig „Herstellung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeugteilen" (29.1, 29.2 und 29.3 nach der WZ 2008), teilweise wird die Fahrzeugindustrie mit dem „Sonstigen Fahrzeugbau" (30 nach der WZ 2008) zum gesamten Fahrzeugbau zusammengefasst.

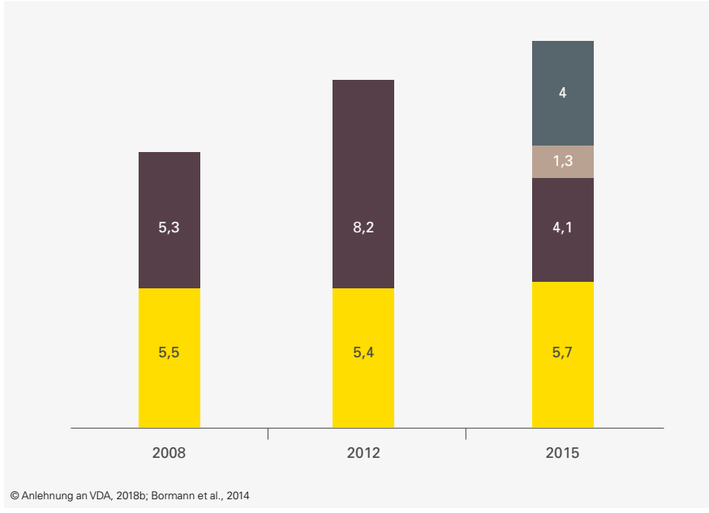
3.1 Rahmendaten der deutschen Automobilindustrie

Der Gesamtumsatz der deutschen Automobilindustrie lag im Jahr 2016 laut Verband der Automobilindustrie (VDA, 2018a) bei gut über 406 Mrd. Euro. Der Exportanteil in Höhe von 256 Mrd. Euro betrug demnach 63 % des Gesamtumsatzes. In der Beschäftigtenstatistik der Bundesagentur für Arbeit sind (Stichtag 30.06.2017) der „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen" (Wirtschaftszweig 29 der WZ 2008) 923.800 sozialversicherungspflichtige Beschäftigte zugeordnet, davon 468.400 (ca. 51 %) den Automobilherstellern (OEM – Original Equipment Manufacturer), 413.000 (ca. 45 %) der Automobilzulieferindustrie (AZI) sowie 42.300 Beschäftigte (ca. 4 %) den Aufbauten und Anhängern.

Bei den Innovationsausgaben führt der Fahrzeugbau mit einem Umfang von 52,4 Mrd. Euro die Rangfolge in absoluter Höhe an – das ist fast ein Drittel aller Innovationsausgaben der deutschen Wirtschaft. Mit 17,6 Mrd. Euro für Forschung und Entwicklung (31 % der gesamtwirtschaftlichen FuE-Ausgaben) und knapp 93.000 FuE-Beschäftigten gilt die Automobilbranche als die forschungsintensivste Industriebranche Deutschlands (VDA, 2017a). Die Forschungs- und Entwicklungsintensität des Fahrzeugbaus rangierte im Jahr 2016 mit einem Umsatzanteil von etwa einem Zehntel in der Spitzengruppe der Industriebranchen (knapp hinter der Elektroindustrie und vor der Chemie- und Pharmaindustrie). In Baden-Württemberg wird sogar knapp die Hälfte der FuE-Aufwendungen im Wirtschaftssektor durch den Fahrzeugbau erbracht (ZEW, 2018; Einwiller, 2017). Die Branche profitiert vom weltweit weiterhin wachsenden PKW-Markt: Der weltweite Absatz an PKW zeigte in den letzten zehn Jahren (ausgenommen die Krisenjahre 2008/2009) hohe Wachstumszahlen, wenngleich eine erhebliche regionale Differenzierung festzustellen ist: Während in Europa eher von einer Stabilisierung beziehungsweise einer Stagnation des Absatzmarktes gesprochen wird, konzentriert sich das weltweite Absatzwachstum auf Asien (insbesondere China) und auf Nordamerika (siehe z. B. Commerzbank, 2017).

Darauf haben auch die deutschen OEM mit einer neuen Markterschließungsstrategie reagiert: Sollten früher die Märkte außerhalb Europas vorrangig durch Export der in Deutschland und Europa produzierten Kfz erschlossen werden, hat sich inzwischen ein **globales Produktions- und Innovationsnetzwerk** herausgebildet, das regionale Märkte aus regionaler Produktion beliefert. Schade et al. konstatieren diesbezüglich: „Mengenmäßige Ausweitungen der Fertigungskapazitäten haben die deutschen Hersteller (OEM; Anm. d. Verf.) in der Vergangenheit fast ausschließlich im Ausland realisiert" (Schade et al., 2014; siehe auch Weber et al., 2013; Voskamp und Witte, 2012; Schwarz-Kocher et al., 2019). Tatsächlich verdeutlichen die jährlich vom VDA veröffentlichten Produktionszahlen, dass die deutschen OEM das große Absatzwachstum zwischen 2008 und 2015 überwiegend an den Auslandsstandorten realisiert haben.

Zwar weist der VDA (2018b) für das Jahr 2016 noch einen Anteil exportierter PKW-Einheiten der Inlandsstandorte der deutschen OEM von 77 % aus, allerdings gehen 73 % dieses Exports in europäische Länder. Auch hierin zeigt sich, dass die Weltregionen Nordamerika und Asien weitestgehend durch lokale Produktion erschlossen werden. **So wurden 2015 gerade einmal 205.000 PKW von deutschen OEM nach China exportiert, während im gleichen Zeitraum 4 Mio. PKW deutscher Hersteller in China gebaut wurden.** Dazu passt auch, dass trotz starken Umsatzwachstums in China der PKW-Exportwert (in Euro) nach China seit 2011 nicht mehr gestiegen ist (VDA, 2018b; Außenhandelsstatistik Destatis; eigene Berechnungen). Eine wichtige Ausnahme bilden hier einige Oberklassemodelle wie z. B. die Mercedes S-Klasse, der Audi A8 und alle Porsche-Typen. Hier erfolgt die Weltmarktproduktion noch ausschließlich in Europa. Aufgrund der relativ geringen Stückzahlen sind deren Wirkungen auf das Wertschöpfungsvolumen insbesondere bei den Automobilzulieferern aber eher gering. In der Bewertung der Beschäftigungswirkungen in Kapitel 5 werden die Exportanteile der baden-württembergischen Automobilindustrie konkret berücksichtigt.



© Anlehnung an VDA, 2018b; Bormann et al., 2014

Abbildung 35: PKW-Fertigung der deutschen OEM in Mio. Einheiten

Eine Besonderheit der deutschen und insbesondere der baden-württembergischen Automobilproduktion ergibt sich durch deren überproportional hohe Abhängigkeit vom Premiumsegment. So ist die Produktion des Premiumsegments in Deutschland zwischen 2002 und 2014 noch um 32 % gestiegen, während die Produktion anderer Fahrzeuge um 11 % abgenommen hat. Laut VDA stammen ca. 80 % der 2012 weltweit verkauften Premiumfahrzeuge von deutschen Marken (Baader, 2015; Diez, 2015).

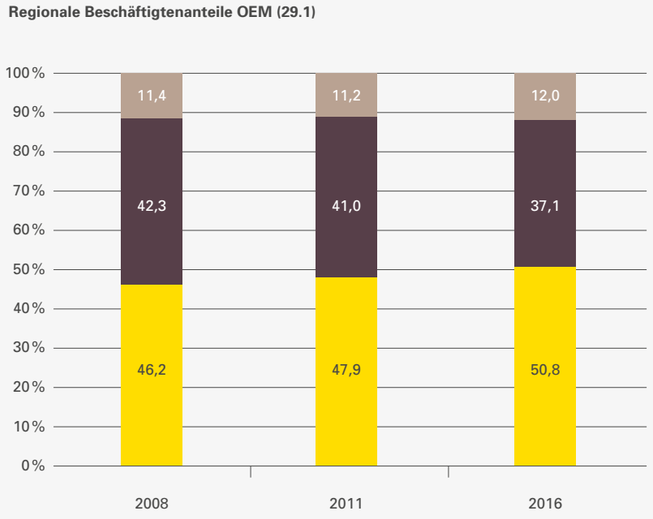
Neben den OEM haben die Zulieferer einen erheblichen Anteil am großen Branchenerfolg. Sie haben sich in den letzten Jahrzehnten von der „verlängerten Werkbank" zu strategisch handelnden Partnern und Systemlieferanten im Produktions- und Innovationsnetzwerk entwickelt. So ist aus der ehemals OEM-zentrierten, hierarchisch organisierten Struktur ein zunehmend dezentrales Unternehmensnetzwerk mit verteilten Kompetenzen entstanden. Die herausragende Innovationskraft, höchste Flexibilität und die hohe Produktivitätsentwicklung der Branche sind wesentlich dieser komplementären Spezialisierung im Unternehmensnetzwerk geschuldet. **Die Automobilzulieferindustrie hat heute nicht nur ca. 80 % der Wertschöpfung der Automobilbranche übernommen, sondern ist auch für große Anteile der Produktinnovationen verantwortlich:** Sie liefert über 60 % der FuE-Wertschöpfung in der Branche (Kleinhans et al., 2015; Blöcker et al., 2009; Commerzbank, 2014; Blöcker, 2015; Schwarz-Kocher et al., 2019; Jürgens und Meißner, 2008).

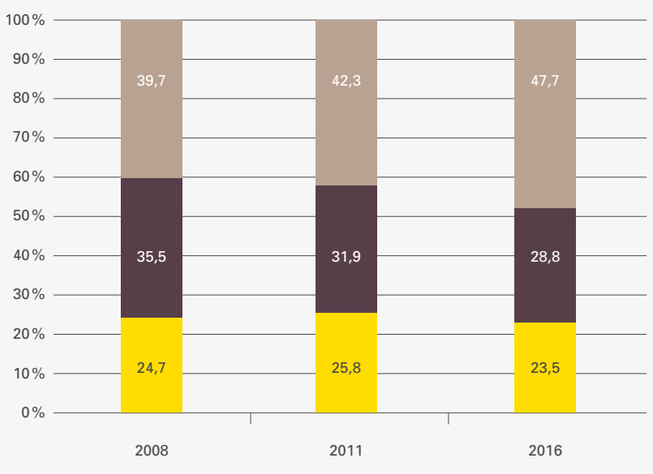
Bedeutender Erfolgsfaktor der Automobilzulieferindustrie ist neben einer starken Innovationsausrichtung die europäische Internationalisierung der Produktionsnetzwerke. Seit Anfang der 1990er Jahre wurden vermehrt Produktionsstandorte in Mittelosteuropa gegründet und ausgebaut. Durch unterschiedliche qualitative Upgrade-Prozesse dieser Standorte und die Arbeitsteilung im internationalen Produktionsnetzwerk ist es den Unternehmen gelungen, die Kostenvorteile der mittelosteuropäischen Standorte zu nutzen, ohne auf die vom Kunden geforderte Hochqualitätsproduktion zu verzichten. Der Überblick über die regionale Verteilung der europäischen Beschäftigten offenbart, dass der Automobilzulieferindustrie die Nutzung der sogenannten Low-Cost-Countries in Mittelosteuropa wesentlich besser gelingt als den OEM.

	Gesamtumsatz	Exportanteil am Umsatz	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (allein in WZ 29)
Deutschland	406.716 Mrd. €	63 %	923.800
Baden-Württemberg	104.730 Mrd. €	72 %	215.050

Tabelle 5: Umsatz, Exportquote und sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in der deutschen und der baden-württembergischen Automobilindustrie (WZ 29) im Jahr 2016

© Dispan et al., 2017; Daten für den Gesamtumsatz und Exportanteil basieren auf Angaben des Statistischen Bundes- bzw. Landesamts; Daten für die Beschäftigtenzahl auf Angaben der Bundesagentur für Arbeit





© Eurostat 2018, eigene Darstellung

Anteil Mitteleuropa
Anteil Westeuropa
Anteil Deutschland

Abbildung 36: Regionale Verteilung der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Europa 2008, 2011 und 2016

Die OEM profitieren indirekt von dieser vor allem kostengetriebenen, innereuropäischen Internationalisierung der Produktionsnetzwerke der Automobilzulieferer durch günstige Teilepreise. An den deutschen Produktionsstandorten der Zulieferindustrie wird diese Entwicklung oft als Bedrohung der Beschäftigung wahrgenommen. Fast 50 % der deutschen Zuliefererstandorte haben zwischen 2012 und 2017 Verlagerungen von Produktionsarbeit nach Mittelosteuropa (MOE) erlebt. Bei 30 % der Betriebe wurde deshalb Beschäftigung abgebaut (Krzywdzinski et al., 2016).

Insgesamt müssen die Zulieferer einen doppelten Strukturwandel managen. Aufgrund der Globalisierungsstrategien der OEM sind sie gefordert, ihnen nach Asien und Nordamerika zu folgen und dort eigene Produktionsstätten aufzubauen. Zusätzlich zwingt sie der Preisdruck der OEM, immer mehr Produktion in die Low-Cost-Country-Standorte in Mittelosteuropa zu verlagern. Die deutschen Standorte fokussieren sich im Gegenzug auf die vielfältigen Innovationsaufgaben. Die konzernweiten Innovationszentren werden gerade in Deutschland kontinuierlich ausgebaut. Aber auch die deutschen Werke richten sich immer mehr zu Innovationsorten aus, die Produktionskompetenz in den Innovationsprozess einbringen und als Kompetenzknoten im internationalen Produktionsnetzwerk agieren (Schwarz-Kocher et al., 2019).

3.1.1 Besonderheiten der baden-württembergischen Automobilindustrie

Insbesondere in Baden-Württemberg leistet die Automobilwirtschaft einen wesentlichen Beitrag zu der guten wirtschaftlichen Situation. Das Bundesland gilt als weltweit führendes Zentrum der Automobilindustrie mit einem **vollständig entwickelten „Automotive-Cluster“,** in dem die gesamte Wertschöpfungskette der Automobilproduktion und anhängender Dienstleistungen abgedeckt ist.

Diese regionalen Branchencluster gelten als wesentliches Merkmal erfolgreicher Volkswirtschaften. Damit wird die räumliche Konzentration von Unternehmen bezeichnet, die über ein gemeinsames Produkt einschließlich produktspezifischer Forschungstätigkeiten und Dienstleistungen verbunden sind. Die räumliche Nähe bietet Clusterunternehmen Wettbewerbsvorteile angesichts hervorragender Möglichkeiten zu Kooperationen, zum Wissenstransfer zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und weiteren unterstützenden Einrichtungen der Regionalpolitik und der Wirtschaftsförderung. Damit gehen eine regionale Spezialisierung des Arbeitskräftepotenzials und die Entstehung eines spezifischen Innovationssystems einher (Dispan et al., 2009; Porter, 1991; Dispan et al., 2017; Münzenmeier, 1988; e-mobil BW et al., 2015).

Der anhaltende wirtschaftliche Erfolg beruht nicht zuletzt auf der großen Innovationskraft der Automobilindustrie in Deutschland und insbesondere in Baden-Württemberg. Der große Anteil der Automobilzulieferindustrie am Innovationserfolg der Branche wurde bereits dargestellt. Baden-Württemberg zeichnet sich gerade dadurch aus, dass sehr viele Innovationszentren der Automobilzulieferindustrie hier lokalisiert sind. Neben den großen Konzernen wie Bosch, Mahle oder ZF sind auch zahlreiche Entwicklungszentren bedeutender mittelständischer Innovationstreiber angesiedelt, z. B. Elring-Klinger, Getrag als Teil des Magna-Konzerns, KS Kolbenschmidt, Mann + Hummel sowie Eberspächer. Diese besondere Innovationsrolle Baden-Württembergs kann auch statistisch belegt werden. In der Berufsstatistik der Bundesagentur für Arbeit zeigt sich, dass der Anteil der Ingenieure an den Beschäftigten des Wirtschaftszweigs 29.3 „Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen“ in Baden-Württemberg mit 12 % doppelt so hoch wie im Bundesdurchschnitt liegt.

Dominierende Automobilregion in Baden-Württemberg ist die Region Stuttgart, in der 55 % des landesweiten Branchenumsatzes erwirtschaftet werden. Dazu tragen die beiden Hersteller Daimler und Porsche bei, aber auch große Automobilzulieferer wie Bosch, Mahle und Eberspächer sowie zahlreiche weitere kleinere und mittlere Automobilzulieferer. Fast ein Fünftel des Umsatzes wird in der Region Mittlerer Oberrhein erzielt, wo neben den Werken von Daimler in Rastatt und Gaggenau große Zulieferer wie Bosch und LuK ansässig sind. An dritter Stelle folgt die Region Heilbronn-Franken mit dem Audi-Werk in Neckarsulm und weiteren Unternehmen wie Getrag und KS Kolbenschmidt. Eine sehr spezifische Rahmenbedingung der Automobilbranche in Baden-Württemberg stellen die auf das Premiumsegment ausgerichteten baden-württembergischen OEM dar – diese Spezialisierung ist hier stärker ausgeprägt als über ganz Deutschland hinweg betrachtet.

Allein die Branche „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ als Kern des Automobilclusters setzte 2017 in Baden-Württemberg und 106 Mrd. Euro um, realisierte also ein Viertel des Branchenumsatzes in Deutschland. Außerdem trägt die Automobilindustrie mit fast einem Drittel zum Gesamtumsatz der Industrie Baden-Württembergs bei. Bei einem Auslandsumsatz von 79,8 Mrd. Euro liegt die Exportquote mittlerweile bei 72 %, also noch einmal höher als in der gesamten deutschen Automobilindustrie.

	Gesamtumsatz in Mio. €				Auslandsumsatz in Mio. €			
	2009	2015	2017	2009–2017	2009	2015	2017	2009–2017
Baden-Württemberg	53.599	107.190	105.457	+96,8 %	31.734	79.779	75.917	+139,2 %
Deutschland	265.593	401.014	422.957	+64,8 %	151.024	258.177	271.674	+79,9 %

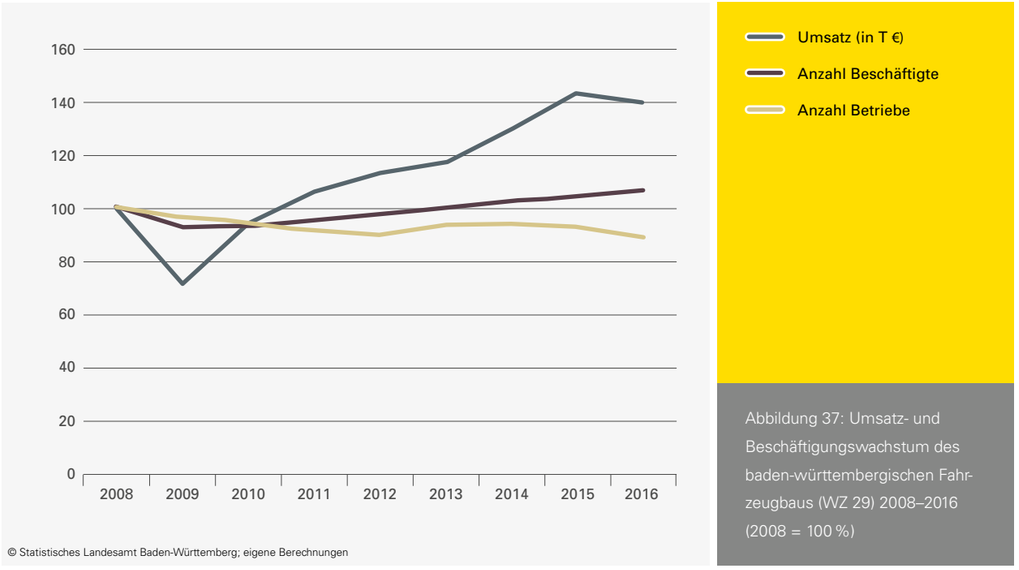
Tabelle 6: Umsatzsteigerung der Branche „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen" 2009–2017

© Statistisches Landesamt Baden-Württemberg und Statistisches Bundesamt; eigene Berechnungen

Der Umsatz ist seit der Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/2009 deutlich gewachsen. Auch die Beschäftigung im Fahrzeugbau (hier der Wirtschaftszweig 29 „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen") hat in dieser Zeit zugenommen, wenngleich der Anstieg deutlich niedriger als das Umsatzwachstum ausfiel. Das ist möglicherweise ein Beleg dafür, dass das Umsatzwachstum stark durch die Produktion im Ausland gestützt wird. Dabei muss berücksichtigt werden, dass zu dem hohen Umsatzwachstum auch die Leistung der Automobilzulieferer und der dort Beschäftigten beigetragen hat, die nicht dem WZ 29 zugeordnet werden.

Die Zahl der Betriebe hat dagegen leicht abgenommen – die Konzentration in der Branche setzt sich fort.

Ein enger Verbund von Produktion und Dienstleistung wie in der baden-württembergischen Automobilindustrie wird als Basis einer zukünftig intensiven Wertschöpfung gesehen (Zika et al., 2015). Der Fahrzeugbau (Wirtschaftsabteilungen 29 und 30 der WZ 2008) hat mittlerweile einen Anteil von 10 % an der gesamten Bruttowertschöpfung Baden-Württembergs – und er hat in den letzten Jahren überproportional zum Wachstum beigetragen: Von 2008 bis 2015 wuchs die Bruttowertschöpfung Baden-Württembergs um 21,8 %, die des Fahrzeugbaus dagegen um 64,9 % (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, eigene Berechnungen).



© Statistisches Landesamt Baden-Württemberg; eigene Berechnungen

Abbildung 37: Umsatz- und Beschäftigungswachstum des baden-württembergischen Fahrzeugbaus (WZ 29) 2008–2016 (2008 = 100 %)

Zur besonderen Bedeutung der baden-württembergischen Automobilindustrie trägt auch ihr hoher Anteil an den Investitionen bei. Verbunden mit einer kürzeren Nutzungsdauer beispielsweise im Vergleich zu Gebäuden müssen Industrieunternehmen für die Aufrechterhaltung und Erneuerung ihrer Produktionsanlagen laufend Investitionen tätigen. Allein der Wirtschaftszweig 29 „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen" hat 2016 in Baden-Württemberg gut 4,9 Mrd. Euro investiert. Ausgehend von rund 1,9 Mrd. Euro im Jahr 2000 stieg das Investitionsvolumen dieser Branche über jetzt drei Investitionszyklen hinweg deutlich an. Damit nahm auch der Anteil des Wirtschaftszweigs 29 an den gesamten Industrieinvestitionen Baden-Württembergs stetig zu und lag 2016 bei 38 %, wobei dieser Anteilszuwachs größtenteils zwischen 2000 und 2003 stattfand (von 21,4 % auf 37,8 %).

Bundesweit lag der Anteil der Automobilindustrie an den Industrieinvestitionen mit etwa einem Viertel deutlich niedriger. Der Großteil der Investitionen (92 %) wird für Maschinen, maschinelle Anlagen, Betriebs- und Geschäftsausstattung verwendet. Auch die Investitionsquote (als Verhältnis der Investitionen zum Umsatz) und die Investitionsintensität (als durchschnittliche Investition je Beschäftigten) in der Automobilindustrie liegen deutlich über denen anderen Branchen sowie über dem Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes insgesamt (Heinze, 2018 und 2017; Ramsauer, 2015; Gurka, 2016).

	2010	2014	2015	2016	Veränderung 2010 bis 2016
Verarbeitendes Gewerbe					
Investitionen	8.599.232 T€	10.947.110 T€	11.799.965 T€	12.785.655 T€	+49 %
Investitionen je Besch.	7.497 €	8.904 €	9.529 €	10.200 €	+36 %
Investitionen i. V. z. Umsatz	3,2 %	3,3 %	3,4 %	3,7 %	-
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (WZ 29)					
Investitionen	3.270.569 T€	3.623.158 T€	4.033.121 T€	4.910.992 T€	+50 %
Investitionen je Besch.	16.571 €	16.719 €	18.301 €	21.771 €	+31 %
Investitionen i. V. z. Umsatz	4,6 %	3,7 %	3,8 %	4,7 %	-
Anteil an den Investitionen im VG	37,3 %	33,1 %	34,2 %	38,4 %	-

Tabelle 7: Investitionen, Investitionsintensität und Investitionsquote im verarbeitenden Gewerbe und im Fahrzeugbau Baden-Württembergs 2010 bis 2016

© Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018, eigene Berechnungen

Allerdings unterscheiden sich OEM und Zulieferer in ihrem Investitionsverhalten: Die OEM (WZ 29.1) lagen 2016 mit einer Investitionsintensität von 29.683 Euro je Beschäftigten deutlich über den Zulieferern (29.3) mit 9.413 Euro. Entsprechend liegt die Investitionsquote der OEM mit 4,9 % vom Umsatz deutlich höher als die der Zulieferer mit 4 %. Dieser Unterschied bestand auch schon in den Jahren davor, beispielsweise 2013 (Statistisches Landesamt, 2017; Ramsauer, 2015). In dieser hohen Investitionstätigkeit der Branche überlagern sich die im ersten Kapitel beschriebenen Vorhaben zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung durch den Einsatz digitaler Technologien mit Investitionen zur Umstellung auf die Produktion von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

3.1.2 Clustersegmente der Automobilindustrie in Baden-Württemberg

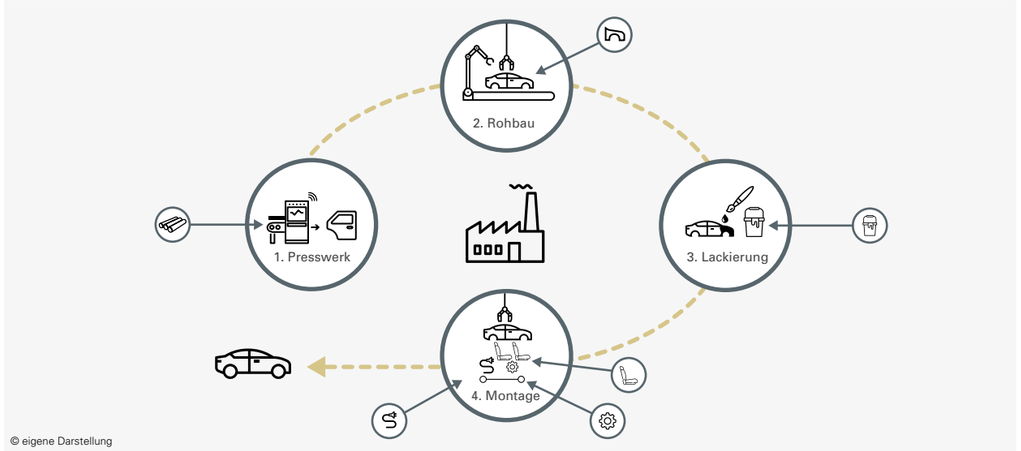
Die Unternehmensverflechtungen des Automobilclusters werden klassischerweise in einem dreistufigen Modell dargestellt:

Wertschöpfungskern	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren (WZ 29.1), Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern (WZ 29.2) sowie Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen (WZ 29.3)
Erweitertes Wertschöpfungscluster	Beschäftigte aus anderen Produktionszweigen, die ebenfalls Produkte für den Fahrzeugbau herstellen, wie beispielsweise Metall- und Kunststoffkomponenten, elektronische Teile, Autoglas etc.
Gesamtes Automobilcluster	Kfz-Handwerk, Kfz-Handel und weitere Dienstleistungen

Die Strukturstudie soll die Auswirkungen des technologischen Wandels zu neuen Mobilitätslösungen und Fahrzeugen auf die Beschäftigungsstruktur untersuchen. Für diese Aufgabe ist die genannte Clusterstruktur zu grob: Die Auswirkungen dieser Transformation auf die unterschiedlichen Wertschöpfungs- und Beschäftigungsfelder werden damit nicht genau genug abgebildet. So wird sich zum Beispiel der Elektromobilitäts-Transformationsprozess auf Produktionsbeschäftigte in der Komponentenfertigung, in der Montage und in FuE-Bereichen jeweils sehr unterschiedlich auswirken. Deshalb wird über bisherige Clusterdarstellungen hinaus genauer die Struktur der Wertschöpfungskette dargestellt, indem die Spezialisierung auf das Produkt „Kraftfahrzeug" differenziert betrachtet wird. Dafür wird zunächst – ausgehend vom Montagewerk eines OEM – die Arbeitsteilung zwischen Automobilzulieferindustrie und OEM schematisch veranschaulicht, um im nächsten Schritt die Unternehmen und Beschäftigten unterschiedlichen Wertschöpfungssegmenten zuzuordnen.

Im **Presswerk** werden aus den angelieferten Stahlelementen Unterboden, Body (Seitenwände, Dach), Türen etc. geformt, die dann im **Rohbau** zu einer Rohkarosse zusammengefügt werden. In der **Lackierstraße** erhält die komplette Karosse in einem mehrstufigen Prozess die Grundierung und die finale Oberflächenlackierung. Parallel dazu wird im **Motorenbau** (meist in einem eigenen OEM-Werk) aus Hunderten Einzelteilen, wie Motorblock, Kolben, Ventile, Kurbelwelle etc., die kundenspezifische Motorvariante zusammengebaut. Getriebe und Achsen werden von Zulieferern oder in eigenen Werken hergestellt. In der Montage wird das gesamte Fahrzeug zusammengefügt. Diese Zusammenführung des Fahrwerks (Motor, Getriebe, Achsen) mit der Karosserie wird „Hochzeit" genannt. Dieser Grundaufbau wird dann in der **Montage** mit Interieur (Sitze, Himmel, Innenverkleidung etc.), Elektronik (Cockpit und Instrumente, Beleuchtung, Motorsteuerung etc.), Reifen etc. zum kundenspezifischen PKW komplettiert. All diese Arbeitsschritte werden im OEM-Montagewerk vollzogen. Die hier verbauten Komponenten und Teile werden entweder im OEM-Komponentenwerk gefertigt oder von externen Zulieferern geliefert. Dabei steigt seit Langem der Anteil der Zulieferer an der Komponentenfertigung und damit an der Wertschöpfung der Branche, während die Fertigungstiefe bei den Herstellern im Gegenzug sinkt (Dölle, 2013; Jürgens und Meißner, 2008).

Die stetig wachsende Produkt- und Produktionskompetenz der Zulieferer führte dazu, dass sie heute die meisten Komponenten für die OEM auch selbst entwickeln. Im Kern des Wertschöpfungs- und Innovationsclusters der Branche ist ein Netzwerk verteilter Kompetenzen aus OEM und Zulieferer entstanden, zu dem neben den Systemzulieferern auch viele Teilezulieferer der Wertschöpfungsstufen Tier 1 und Tier 2 gehören (Meißner, 2013; Blöcker, 2015; Schwarz-Kocher et al., 2019).



© eigene Darstellung

Abbildung 38: Tätigkeiten in einem PKW-Montagewerk

Es werden nicht alle Arbeitsschritte bei den OEM und den Zulieferern durch deren Stammbelegschaft ausgeführt. Hohe Flexibilitätsanforderungen führen dazu, dass ein erheblicher Teil der Produktionsarbeit durch Leiharbeitnehmer ausgeführt wird, die statistisch als Beschäftigte von Unternehmen der Arbeitnehmerüberlassung im Dienstleistungssektor geführt werden. Andere Produktionsaufgaben werden per Werkvertrag an spezialisierte Unternehmen vergeben. Insbesondere Logistik- und Transportaufgaben, Werkschutz, Reinigung und Kantine werden heute kaum noch von Stammbeschäftigten der OEM und der Automobilzulieferer übernommen. Die mit diesen **werksinternen Dienstleistungen** beauftragten Unternehmen werden in der aktuellen Klassifizierung der Wirtschaftszweige nicht der Automobilbranche zugeordnet.

Die Produktion bei OEM und Automobilzulieferern wäre nicht vorstellbar ohne einen stetig wachsenden Anteil indirekt Beschäftigter in Entwicklung, Vertrieb und Verwaltung. Auch in diesem Bereich nutzen die OEM mehr und mehr die Strategie der komplementären Spezialisierung. So werden z. B. spezifische Entwicklungsschritte in der FuE an **Entwicklungsdienstleister** vergeben.

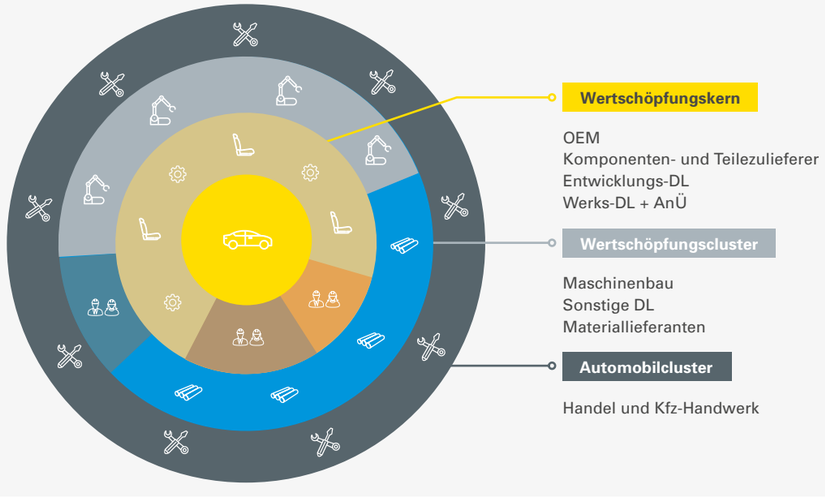
Alle aufgezählten Beschäftigten zählen zum **Wertschöpfungs- und Innovationskern der Automobilbranche.** Unabhängig von ihrer Unternehmenszugehörigkeit sind sie oder ihr Produkt direkt in den Produkterstellungsprozess eines Kfz integriert. Ihre Produkte beziehungsweise Dienstleistungen und damit auch ihre Kompetenzen sind spezifisch auf die Anforderungen des Produkts ausgerichtet. Die Unternehmens- und Standortkompetenzen sind auf die Anforderungen der Branche ausgerichtet und unverzichtbarer Teil des Kfz-Produktinnovationssystems. Deshalb sind Beschäftigte in diesem Wertschöpfungs- und Innovationskern der Branche von technologischen Veränderungen des Produkts besonders betroffen.

Um diesen Wertschöpfungskern herum gibt es noch eine Vielzahl weiterer Unternehmen und Funktionen, die wichtige Beiträge für die Branche liefern, aber eher mittelbar in den Produktionsprozess des einzelnen Fahrzeugs integriert sind. Diese Unternehmen zählen zum **erweiterten Wertschöpfungscluster** der Automobilbranche und finden ihre Kunden unter den OEM und Zulieferern. Dazu gehören die nachgelagerten Teilelieferanten (Tier 3–n), Materiallieferanten, z. B. von Metallblechen und Kunststoffgranulat, sowie die Lieferanten von Standardmaterialien wie Schrauben, Verpackungsmaterial etc. Eine zweite wichtige Unternehmensgruppe im erweiterten Produktionscluster sind die Maschinen- und Anlagenbauer, die die Branche mit effizienten Produktionsanlagen ausrüsten und so die Grundlage für deren Prozess- und Produktinnovationen schaffen. Auch der Werkzeugbau, der als Ausrüster die breite Spanne vom Presswerkzeug für den Karosseriebau über Bohrer bis zum Spritzgusswerkzeug herstellt, gehört in diese Gruppe. Des Weiteren zählen Unternehmen des Dienstleistungsbereichs dazu, die eher beratende Funktionen in der Branche übernehmen, wie beispielsweise

Unternehmensberater, Wirtschaftsprüfer, Marketingagenturen und Finanzdienstleister, oder Unternehmen, die in die Abwicklung externer Geschäftsprozesse involviert sind, wie z. B. Handelsunternehmen.

Die Unternehmen aus dem erweiterten Produktionscluster können genauso bedeutende oder sogar entscheidende Beiträge für den Unternehmenserfolg liefern (z. B. neue Automatisierungskonzepte aus dem Maschinenbau) wie die Unternehmen im Clusterkern, unterscheiden sich von diesen aber dadurch, dass der Fahrzeugbau für ihre Branchen nur ein – wenn auch teilweise der bedeutendste – Kunde unter mehreren ist. Dies gilt auch dann, wenn sich einzelne Branchensegmente und -unternehmen intensiv auf die Anforderungen ihrer Kfz-Kunden spezialisiert haben, wie beispielsweise der automobilabhängige Werkzeugmaschinenbau. Technologische Veränderungen im Kraftfahrzeug können sich auch auf diese Unternehmen gravierend auswirken, wenn sie sich auf die Automobilindustrie als Kunden spezialisiert haben. Gleichwohl können sie auf Absatzveränderungen reagieren und sich auf andere Kundensegmente konzentrieren. Je nach Spezialisierung fällt diese Anpassung manchen Unternehmen leichter (z. B. Schraubenlieferanten), anderen jedoch sehr schwer (z. B. Lackieranlagenhersteller). Die Beschäftigungswirkungen des Elektromobilitäts-Transformationsprozesses müssen daher für jedes Teilsegment einzeln untersucht werden. Außerhalb des Produktionsclusters sind zahlreiche Unternehmen zwar nicht direkt am Produktionsprozess des Kfz beteiligt, widmen sich in ihren Geschäftsfeldern aber dem Vertrieb bzw. Service dieser Kfz. Neben den Vertriebsniederlassungen der OEM gehört das Kfz-Gewerbe mit Autohäusern und Kfz-Werkstätten zu dieser Gruppe. Diese Unternehmen sind ebenfalls Teil des **Automobilclusters.** Zu dessen erweitertem Wirkungsbereich zählen auch die Unternehmen aus Autovermietungen und Carsharing, die Kfz-Versicherer oder Unternehmen des Straßenbaus, die Beschäftigten der Verkehrsüberwachung, die Taxiunternehmen und noch viele Berufsgruppen mehr, deren Arbeitsbereich von der Nutzung des Kfz abhängt. In unserer Betrachtung wird dieser erweiterte Wirkungskreis im Automobilcluster nicht berücksichtigt.

Um das gesamte Automobilcluster lassen sich zudem indirekte Wirkungen auf alle anderen Wirtschaftszweige und -sektoren zeigen. So würde z. B. ein massiver Beschäftigungsabbau im Automobilcluster einer Region auch auf Einzelhandel, Baukonjunktur usw. wirken. Derartige Folgen ließen sich aus einer volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung ableiten, werden aber in unserem Zusammenhang nicht betrachtet. Damit ergibt sich folgende Wertschöpfungsstruktur der Automobilbranche, deren einzelne Wertschöpfungssegmente äußerst divers auf die technologischen Veränderungen des Kfz reagieren.



© eigene Darstellung

Abbildung 39: Erweiterte Darstellung des Automobilclusters in Baden-Württemberg

3.1.3 Zuordnung der Beschäftigung zu den Clustersegmenten

Grundlage der Darstellung von Beschäftigtenzahlen ist die amtliche Beschäftigungsstatistik mit Sonderauswertungen der Bundesagentur für Arbeit für Baden-Württemberg, anhand derer die Beschäftigten entsprechend der Systematik der Wirtschaftszweige (WZ 2008) einzelnen Branchen mit über 800 Wirtschaftsunterklassen zugeordnet werden können. Im Folgenden wird erläutert, wie die dort gemeldeten Beschäftigten den oben dargestellten Wertschöpfungssegmenten zugeordnet werden. Dazu war es notwendig, zusätzliche Methoden und Datenquellen auszuwerten und die Ergebnisse zusammenzuführen:

- Beschäftigtendaten der Bundesagentur für Arbeit,
- Input-Output-Analysen,
- Expertengespräche/Nachfragen bei Unternehmen,
- Marktanalyse der baden-württembergischen Entwicklungsdienstleister,
- Sonderauswertungen zweier Betriebsrätebefragungen (IG Metall/Krzywdzinski et al., 2016).

Die Kombination dieser Methoden liefert eine wissenschaftliche Grundlage für die Abschätzung der in den einzelnen Wertschöpfungssegmenten arbeitenden Beschäftigten. Darauf aufbauend werden im fünften Kapitel die Beschäftigungswirkungen des Elektromobilitäts-Transformationsprozesses differenzierter abgebildet.

Exkurs:
Methodik zur Darstellung der Beschäftigung

Die Beschäftigtenzahlen im folgenden Abschnitt beziehen sich auf die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten, zu denen etwa 80 % der Erwerbstätigen gehören. Unberücksichtigt bleiben Beamte, Selbstständige und mithelfende Familienangehörige. Grundlage für die Ermittlung der Beschäftigtenzahlen ist eine Sonderauswertung der Bundesagentur für Arbeit für Baden-Württemberg zum Stichtag 30.06.2017. Sie folgt der Systematik der Wirtschaftszweige aus dem Jahr 2008 (WZ 2008), in der insbesondere in den Wirtschaftsgruppen (sog. 3-Steller) 29.1 und 29.3 die Hersteller von Kraftwagen und Kraftwagenteilen sowie ein Teil der Automobilzulieferer und in den Wirtschaftsgruppen 45.1, 45.2 und 45.3 Handel, Instandhaltung und Reparatur von Kraftwagen sowie Kraftwagenteilen und -zubehör ausgewiesen werden. Der Wirtschaftszweig 29.2 Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern (in Baden-Württemberg ca. 5.300 Beschäftigte) bleibt in unserer Untersuchung unberücksichtigt, da seine Angehörigen nicht von der Produktion der PKW-Antriebsstränge abhängen.

Die Beschäftigtenstatistik lässt jedoch nicht zu, die Verflechtungen der Automobilindustrie und damit deren Beschäftigungswirkung in anderen Wirtschaftszweigen abzuschätzen. Deshalb wird ergänzend die Input-Output-Analyse (Statistisches Bundesamt, 2016) zum Stand 2014 ausgewertet, die die Beiträge anderer Wirtschaftszweige in die Automobilindustrie auf Basis der Wirtschaftsabteilungen (sog. 2-Steller) darstellt. Eine Plausibilitätskontrolle dieses Arbeitsschrittes erfolgt über eine Auswertung der europäischen Produktionsstatistik zum Stand Oktober 2017 (Quelle Eurostat: PRODCOM-Liste, PRCCODE 24511110). Hier wurden die Anteile einzelner Güterarten (sogenannte 9-Steller der Produktionsstatistik) an dem gesamten Wirtschaftszweig (2-Steller) errechnet und auf diese Weise die Größenordnungen der Verflechtung aus der Input-Output-Analyse bestätigt. Da die Produktionsstatistik nur für das verarbeitende Gewerbe vorliegt, wurden die stärksten Beschäftigungseffekte der Automobilindustrie auf den Dienstleistungssektor bei den Entwicklungsdienstleistern, aber auch beispielsweise bei der Arbeitnehmerüberlassung oder bei Sicherheits- und Reinigungsdienstleistungen auf Grundlage von Expertengesprächen und Marktauswertungen validiert.

Darüber hinaus ergaben zwei Betriebsrätebefragungen ergänzende Zuordnungsdetails, beispielsweise zur Abhängigkeit vom Antriebsstrang und zum Verhältnis von PKW und Nutzfahrzeugen (eine Befragung führte die IG-Metall-Bezirksleitung Baden-Württemberg bei über 80 Betriebsratsgremien von Automobilzulieferern im Sommer 2017 durch, die zweite Befragung fand im Rahmen eines Projekts zur deutschen Automobilzulieferindustrie durch IMU Institut, Sustain Consult und WZB Berlin im Jahr 2017 statt).

Der Clusterkern

Zum Clusterkern gehören alle Beschäftigten der **OEM-Standorte** in Baden-Württemberg. In einer IHK-Aufstellung der größten Unternehmen Baden-Württembergs verteilen sich diese Beschäftigten[1] im Wesentlichen auf folgende Unternehmen (IHK, 2017):

- **Daimler AG** mit über 70 %,
- **Audi AG** mit über 10 %,
- **Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG** mit ebenfalls über 10 % der Beschäftigten.

Unsere Standortanalysen haben aktuell insgesamt ca. 121.000 Beschäftigte der OEM in Baden-Württemberg ergeben. Davon arbeiten ca. 57.000 in den Montagewerken und etwa 15.500 Beschäftigte in den Hauptverwaltungsbereichen der Unternehmen. Etwa 26.000 Beschäftigte arbeiten in den Komponentenwerken der OEM (insbesondere die Mercedes-Benz-Werke in Untertürkheim und in Gaggenau), ca. 22.500 in Forschung und Entwicklung.

Ebenfalls zum Wertschöpfungs- und Innovationskern zählen die Beschäftigten der **Komponenten- und Teilelieferanten** der Wertschöpfungsstufen Tier 1 und Tier 2, die in der Beschäftigtenstatistik größtenteils der WZ 29.3, d. h. der Automobilzulieferindustrie im engeren Sinne, zugeordnet sind. Nach der Beschäftigungsstatistik für Baden-Württemberg sind hier rund 95.500 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte gemeldet. Eine Abschätzung auf Basis der FuE-Anteile der OEM und der Anteile der Ingenieure unter den Beschäftigten in WZ 29.3 ergab, dass davon etwa 23.000 Beschäftigte in Forschung und Entwicklung arbeiten. Zu den regelmäßig von der IHK Baden-Württemberg ausgewiesenen größten Automobilzulieferunternehmen gehören (IHK Baden-Württemberg, 2017):

- die Robert Bosch GmbH, Gerlingen, mit über 66.000 Beschäftigten in Baden-Württemberg,
- die ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen, mit über 11.000 Beschäftigten,
- die Mahle GmbH, Stuttgart, mit über 10.000 Beschäftigten,
- die Schaeffler Gruppe LuK GmbH & Co. KG, Bühl,
- die Mann+Hummel Gruppe, Ludwigsburg,
- die TRW Automotive GmbH, Alfdorf,
- die Eberspächer Gruppe GmbH & Co. KG, Esslingen am Neckar,
- Unternehmen bzw. Betriebe im Continental-Konzern,
- die KS Kolbenschmidt GmbH, Neckarsulm,
- die ElringKlinger AG, Dettingen an der Erms,
- die IMS Gear SE & Co. KGaA, Donaueschingen,
- die A. Raymond GmbH & Co. KG, Lörrach,
- die Allgaier Werke GmbH, Uhingen.

Neben den Automobilzulieferern im „statistischen Sinne" gehören auch Beschäftigte anderer Wirtschaftszweige zum Wertschöpfungskern, die von den gefertigten Produkten her dem Wertschöpfungskern der Branche zuzuordnen sind, z. B. Reifenherstellung und Herstellung von Kunststofffiltergehäusen. Grundlage dieser Abschätzung waren die Input-Output-Tabellen des Bundesamtes für Statistik, die für Deutschland die Verflechtungen der einzelnen Wirtschaftszweige des produzierenden Gewerbes untereinander und damit auch mit dem WZ 29 (Fahrzeugbau) ausweisen. Aus dem Produktionsanteil, den der jeweilige Wirtschaftszweig dem WZ 29 als Input bereitstellt, kann auf den automobilabhängigen Beschäftigtenanteil der Branche geschlossen werden. Dabei wurde zur Abschätzung der Sekundäreffekte auf Berechnungen früherer Input-Output-Analysen zurückgegriffen.

Etwa **82.000 Beschäftigte** der anderen Wirtschaftszweige des produzierenden Gewerbes in Baden-Württemberg hängen von der Automobilproduktion ab. Aus der Analyse der Produktionswerte der einzelnen Produktgruppen des Wirtschaftszweiges (9-Steller der Produktionsstatistik) wurde dann der dem **Wertschöpfungskern** zuordenbare Produktionsanteil und damit der Beschäftigtenanteil der jeweiligen Branche abgeleitet. So konnten ca. **42.000 Beschäftigte** aus den weiteren Branchen (ohne Maschinenbau) des produzierenden Gewerbes dem **Wertschöpfungskern** (davon ca. 10.000 FuE) und ca. **26.000 Beschäftigte** dem erweiterten **Wertschöpfungscluster** zugeordnet werden.

Seit der Umstellung auf die WZ 2008 werden Herstellung von Kolben, Kolbenringen, Vergasern und dergleichen im Wirtschaftszweig Maschinenbau gelistet. Die Analyse der Input-Output-Tabellen in Verbindung mit der Analyse der Produktionswerte der Produktgruppen ergibt, dass ca. **14.000 Beschäftigte** (davon ca. 3.500 FuE) aus dem Wirtschaftszweig **Maschinenbau** zu den Komponenten- und Teilelieferanten des Wertschöpfungskerns der Automobilbranche gezählt werden müssen.

1 I Die amtliche Statistik verzeichnet aufgrund leicht abweichender Zuordnungen der Betriebsmeldungen ca. 117.000 Beschäftigte für den WZ 29.1.

Wirtschaftszweig (WZ 2008)	Benennung	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Baden-Württemberg 2017	Anteil Vorleistung für den Wirtschaftszweig 29	Automobilabhängige Beschäftigte in Baden-Württemberg (rechnerisch)
22	Gummi- und Kunststoffwaren	63.170	21,4 %	13.499
23	Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	23.026	1,7 %	385
24	Metallerzeugung und -bearbeitung	32.992	20,8 %	6.868
25	Metallerzeugnisse	177.742	17,2 %	30.491
26	DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse	100.121	4,1 %	4.101
27	Elektrische Ausrüstungen	84.894	8,0 %	6.794
28.11.0	Herstellung von Kolben, Kolbenringen (im Masch.-Bau)	282.608	5,0 %	14.000
33	Reparatur, Instandhaltung und Installation von Maschinen und Ausrüstungen	24.424	12,8 %	3.137
13–21, 31, 32	Sonstiges produzierendes Gewerbe	246.508	1,2 %	2.889
	Summe	**1.035.485**		**82.164**

Tabelle 8: Zuordnung Beschäftigung des produzierenden Gewerbes zum Automobilcluster in Baden-Württemberg

© Input-Output-Tabelle für Deutschland, Stand 2014, und Sonderauswertung der Beschäftigtendaten der Bundesagentur für Arbeit; eigene Berechnungen

Die Beschäftigten der **Entwicklungsdienstleister** sind nur schwer aus der Wirtschaftsstatistik abzulesen, da sie nicht eindeutig einem Wirtschaftszweig zugeordnet werden können. Damit wird es methodisch unsicher, deren Verflechtungen mit dem Fahrzeugbau allein aus den Input-Output-Tabellen abzuleiten. Die Abschätzung stützt sich deshalb auf mehrere methodische Zugänge. Neben der Input-Output-Analyse wurden die Beschäftigtenzahlen der Entwicklungsdienstleister aus deren Marktvolumen in Baden-Württemberg abgeleitet. Vorgängerstudien haben den Anteil der Entwicklungsdienstleister an der FuE-Wertschöpfung der OEM (ca. 43 %) und das Verhältnis der Unterstützung für OEM und Zulieferer (ca. ¾ zu ¼) ermittelt. Auf der Grundlage der von uns quantifizierten FuE-Beschäftigten der baden-württembergischen OEM-Standorte konnten Rückschlüsse auf die Beschäftigten der Entwicklungsdienstleister gezogen werden. Zusätzlich wurden die Beschäftigtenzahlen der großen Entwicklungsdienstleistungsunternehmen in Baden-Württemberg herangezogen. Die Untersuchungen ergaben Beschäftigtenzahlen zwischen 10.000 und 20.000. In den weiteren Untersuchungen wird von **15.000 Beschäftigten** ausgegangen, was einem Anteil von ca. 30 % der automobilabhängigen Beschäftigten der deutschen Entwicklungsdienstleister entsprechen würde (Meißner, 2013; Kleinhans et al., 2015; Blöcker, 2015).

Für die Abschätzung der im Fahrzeugbau eingesetzten **Leiharbeitnehmer** wurden neben der Analyse der Input-Output-Tabellen weitere methodische Analysewege eingeschlagen. Aus der Sonderauswertung der IMU-Betriebsräte-Befragung der Automobilzulieferindustrie konnte eine durchschnittliche Leiharbeiterquote der baden-württembergischen Zulieferunternehmen von 5 % abgeleitet werden. Bei den OEM-Unternehmen stützen wir unsere Schätzungen auf die betrieblich geregelten Leiharbeiterquoten. In Summe werden insgesamt **16.000 Leiharbeitnehmer** im Wertschöpfungskern der Automobilbranche in Baden-Württemberg eingesetzt.

Die Beschäftigten der dem Wertschöpfungskern zugehörigen **werksinternen Dienstleistungen** sind ebenfalls nicht direkt aus den amtlichen Statistiken abzuleiten. Hier gründet unsere Abschätzung auf den Verknüpfungen der Input-Output-Tabellen. Dabei wurde berücksichtigt, dass gerade in diesen Bereichen ein erheblicher Anteil durch Leiharbeitnehmer abgedeckt wird. In der Summe arbeiten ca. **8.000 Beschäftigte** als werksinterne Dienstleister im Wertschöpfungskern der Automobilbranche Baden-Württembergs.

Der Wertschöpfungskern des baden-württembergischen Automobilclusters umfasst also in Summe rund 311.500 Beschäftigte, davon über ein Drittel bei den OEM, knapp die Hälfte als Komponenten- und Teilezulieferer und knapp 10 % in Dienstleistungstätigkeiten (siehe Abbildung 40).

Das erweiterte Wertschöpfungscluster

Wie oben ausgeführt sind etwa **26.000 Beschäftigte** der Teile- und Materialzulieferer **dem erweiterten Wertschöpfungscluster** zuzuordnen. Dessen zweites großes Segment sind die Beschäftigten des Maschinen- und Anlagenbaus, die die Produktionsausrüstung für die Branche liefern. Sie sind natürlich sehr intensiv in die Innovationscluster der Branche integriert. Da ihre Produkte aber nicht direkt Teil des Automobils werden, sind diese Beschäftigten ebenfalls dem erweiterten Wertschöpfungscluster zuzuordnen. Die baden-württembergischen Beschäftigtenzahlen sind nicht eindeutig aus den Input-Output-Tabellen abzuleiten. Die Schätzungen orientieren sich deshalb an den in Vorgängerstudien ermittelten Beschäftigtenanteilen und an einer Abschätzung der Automobilanteile in den unterschiedlichen Produktgruppen des Maschinen- und Anlagenbaus. Insgesamt sind so ca. **30.000 Beschäftigte** des **Maschinen- und Anlagenbaus** Baden-Württembergs der Ausrüstung der Automobilbranche zuzuordnen.

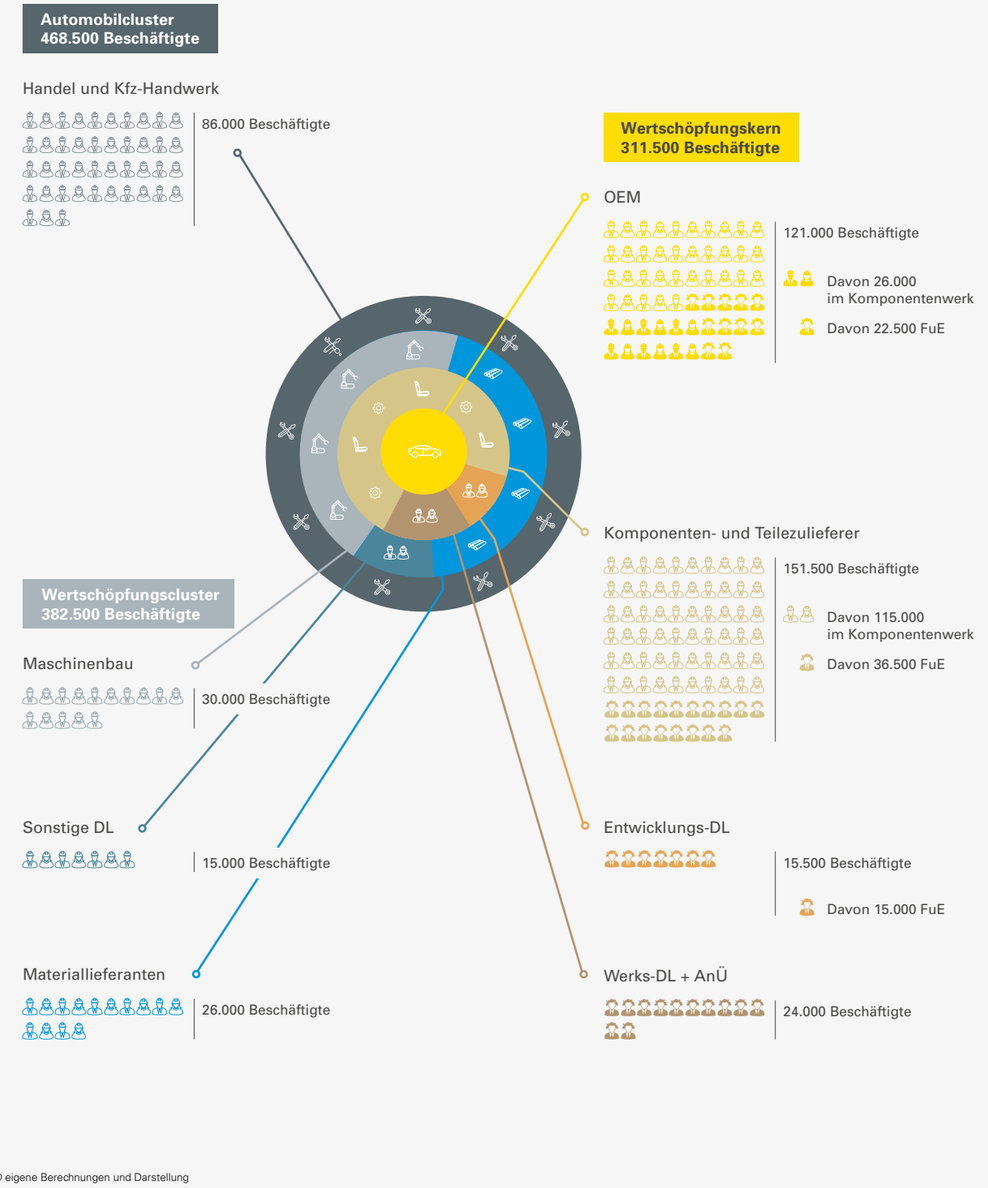
Schließlich gehören zum erweiterten Wertschöpfungscluster der baden-württembergischen Automobilbranche noch die sonstigen Dienstleistungen, wie z. B. Unternehmensberatung, Großhandel und Marketing. Aus den Input-Output-Tabellen lassen sich ca. 15.000 Beschäftigte diesem Dienstleistungsfeld zuordnen.

Es kommen also rund 71.000 Beschäftigte dazu, sodass insgesamt 382.500 Beschäftigte das erweiterte industrielle Wertschöpfungscluster in Baden-Württemberg bilden.

Das gesamte Automobilcluster

Vollständig wird das Automobilcluster mit dem baden-württembergischen Kfz-Gewerbe (Handel, Reparatur und Instandhaltung), hier sind insgesamt 85.722 Beschäftigte gemeldet (Beschäftigtenstatistik der Bundesagentur für Arbeit). Sie zählen alle zum Automobilcluster Baden-Württemberg, wenn sie auch nicht direkt zur Produktion der Kfz beitragen, sondern von ihrer Nutzung abhängen. Damit ist das Kraftfahrzeuggewerbe mit seinen rund 86.000 Beschäftigten in gut 8.000 Betrieben und einem Jahresumsatz von 31 Mrd. Euro im Jahr 2016 eine bedeutende Branche in Baden-Württemberg.

Mit der Erweiterung um das Kfz-Gewerbe geht die Strukturstudie 2018 für **das gesamte Automobilcluster Baden-Württemberg von insgesamt rund 470.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten** aus – das ist etwas mehr als ein Zehntel der gesamten sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im Land (siehe Abbildung 40).



© eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 40: Beschäftigtenstruktur des Automobilclusters in Baden-Württemberg

	Tätigkeiten und Zuordnung zum Cluster	Anzahl Beschäftigte
OEM	Komponenten	26.000
	FuE	22.500
	Montagewerke	57.000
	Hauptverwaltung	15.500
Automobilzulieferer WZ 29.3	Komponenten/Teile	72.500
	FuE	23.000
Automobilzulieferer aus anderen Wirtschaftszweigen	Komponenten	32.000
	FuE	10.000
	Erweitertes Wertsch.-Cluster	26.000
Maschinen- und Anlagenbau	Kolben, Teile	10.500
	FuE	3.500
	Ausrüster	30.000
Entwicklungsdienstleister	Wertschöpfungskern	15.000
Leiharbeitnehmer	Wertschöpfungskern	16.000
Werksinterne DL	Wertschöpfungskern	8.000
Sonstige Dienstleistungen	Erweitertes Wertsch.-Cluster	15.000
Kfz-Gewerbe	Ergänzung zum gesamten Automobilcluster	86.000
Summe Automobilcluster		468.500

Tabelle 9: Beschäftigte des baden-württembergischen Automobilclusters, differenziert nach Tätigkeiten

© Sonderauswertung der Bundesagentur für Arbeit und Input-Output-Analyse des Statistischen Bundesamts; eigene Berechnungen

3.2 Marktentwicklung und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich

In Kürze:

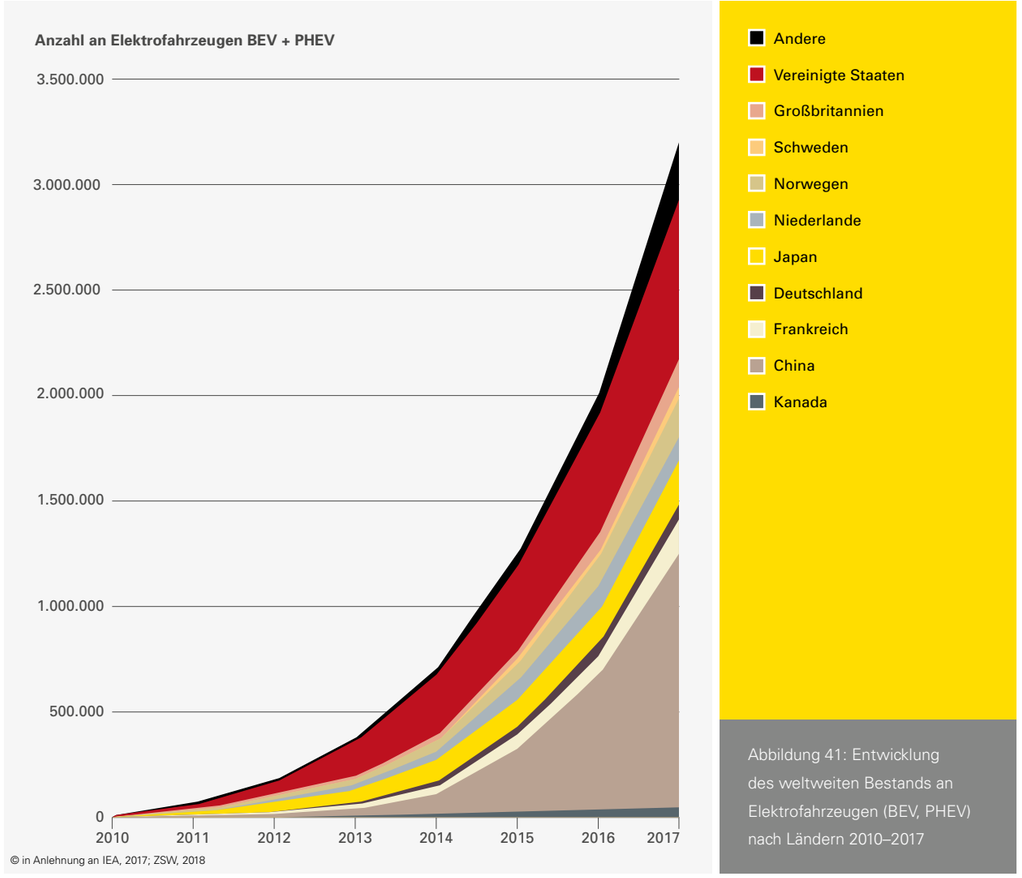
- 2017 wurden weltweit über 1 Mio. E-Fahrzeuge neu zugelassen, der Bestand erreichte damit erstmals mehr als 3 Mio. PKW.
- China ist Haupttreiber der Entwicklung und besitzt über ein Drittel aller E-Fahrzeuge, Deutschland und Baden-Württemberg liegen bei relativen Marktanteilen und absoluten Zahlen weit dahinter.
- Politische Ziele, Kaufanreize, Emissionsgrenzwerte und Infrastrukturverfügbarkeiten variieren im internationalen Vergleich erheblich.

Der globale Automobilmarkt wächst rasant. Weltweit existieren derzeit ca. 1 Mrd. PKW, wobei der Bestand stetig wächst. Im Jahr 2030 werden – auch durch den zunehmenden Wohlstand in den Schwellenländern – bis zu 1,5 Mrd. PKW auf den Straßen weltweit erwartet, zu großen Teilen dann auch in Ballungsgebieten und Megacities (IEA, 2017). Während in den USA, Mitteleuropa und Japan die Automobilmärkte mittlerweile zu einem großen Teil gesättigt sind (ca. 550 PKW je 1.000 Einwohner), bieten Märkte wie China und Indien den Automobilherstellern weiterhin beträchtliche zusätzliche Absatzpotenziale. Mit ca. 100 PKW je 1.000 Einwohner ist die Motorisierungsrate z. B. in China bei Weitem (noch) nicht auf westlichem Niveau (Ernst & Young, 2017).

Der Anteil elektrifizierter Fahrzeuge am globalen Bestand ist derzeit und im Vergleich zu den konventionell betriebenen noch sehr gering und rangierte 2017 mit 3,2 Mio. Fahrzeugen bei nur ca. 0,3 %. Allerdings wächst die Nachfrage stetig und mit immer größerer Geschwindigkeit: In den letzten drei Jahren wurde die Anzahl an E-Fahrzeugen mehr als vervierfacht, 2014 lag sie noch bei nur ca. 0,76 Mio. PKW weltweit. Vor allem dafür verantwortlich ist der chinesische Automobilmarkt, der alleine einen Anteil von ca. 1,2 Mio. PKW (also ein Drittel des weltweiten E-Fahrzeug-Bestands) ausmacht. Die USA folgen mit insgesamt ca. 750.000 Fahrzeugen. Deutschland hat bis jetzt ca. 130.000 BEV und PHEV auf den Straßen (ZSW, 2018). Abbildung 41 illustriert die Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) der Jahre 2010 bis 2017 für ausgewählte Länder im Vergleich.

Die Entwicklung der internationalen Automobilmärkte für elektrifizierte und alternativ betriebene Fahrzeuge erfolgt unterschiedlich schnell, oftmals auch als direkte Folge politischer Ziele und Maßnahmen. Kritische Stellhebel sind hier beispielsweise CO_2-Gesetzgebungen und Regularien für den Umwelt- und Gesundheitsschutz (die z. B. den maximalen Ausstoß von Abgasemissionen limitieren), politische Ziele und Vorgaben (z. B. eine Quote für E-Fahrzeuge), finanzielle Subventionen und Kaufanreize (z. B. direkte monetäre Kaufzuschüsse), die Unterstützung von FuE-Aktivitäten sowie der Ausbau von Ladeinfrastruktur.

Abbildung 42 fasst wesentliche Rahmenbedingungen für Deutschland im internationalen Vergleich zusammen. Die einzelnen Märkte werden nachfolgend im Detail beschrieben, jeweils mit Fokus auf die derzeitige Marktsituation und die herrschenden Rahmenbedingungen.



© in Anlehnung an IEA, 2017; ZSW, 2018

Abbildung 41: Entwicklung des weltweiten Bestands an Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV) nach Ländern 2010–2017

Neuzulassungen BEV 2017 (Anteil)	98.280 (0,73 %)	125.940 (1,41 %)	149.350 (1,46 %)	121.540 (6,39 %)	187.270 (28,76 %)	751.510 (0,91 %)	201.410 (0,59 %)	4.800 (0,02 %)	1.212.280 (1,37 %)
Zielgröße Elektrofahrzeuge	2020: 1 Mio. 2030: 6 Mio.	2020: 1,6 Mio.	2020: 2 Mio.	2020: 0,2 Mio. 2025: 1 Mio.	-	2025: 3,3 Mio.	2020: 1 Mio.	2020: 7 Mio.	2020: 4,6 Mio.
Förderung	BEV: 4.000 € PHEV: 3.000 €	BEV: 5.150 € PHEV: 2.860 €	BEV: bis 6.300 € PHEV: bis 1.000 €	-	-	Bis 5.400 €	BEV: bis 6.300 €	Regionale Zuschüsse	BEV: bis 7.200 € PHEV: bis 4.200 €
Emissions-grenzwerte	2021: 95 CO_2 g/km 2025: 81 CO_2 g/km (–15 % zum Wert von 2021) 2030: 59 CO_2 g/km (–37,5 % zum Wert von 2021)				-	2020: 121 CO_2 g/km	2020: 105 CO_2 g/km	-	2020: 117 CO_2 g/km
Ordnungsrechtlicher Rahmen	-	Verkaufsverbot ab 2040; Fahrverbot ab 2050	Verkaufsverbot ab 2040	Geplantes Verkaufsverbot ab 2030	-	Steigende Quote für E-Autos in neun Bundesstaaten	-	Elektrifizierte Flotte bis 2030	Steigende Quote für E-Autos (Verkaufsverbot)
Ladeinfrastruktur 2017	Slow: 22.213 Fast: 2.076	Slow: 11.479 Fast: 2.037	Slow: 14.407 Fast: 1.571	Slow: 32.976 Fast: 455	Slow: 8.292 Fast: 1.238	Slow: 39.601 Fast: 6.267	Slow: 21.507 Fast: 7.327	Slow: 222 Fast: 25 (2016)	Slow: 130.508 Fast: 83.395

© eigene Darstellung

Abbildung 42: Marktsituation und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich

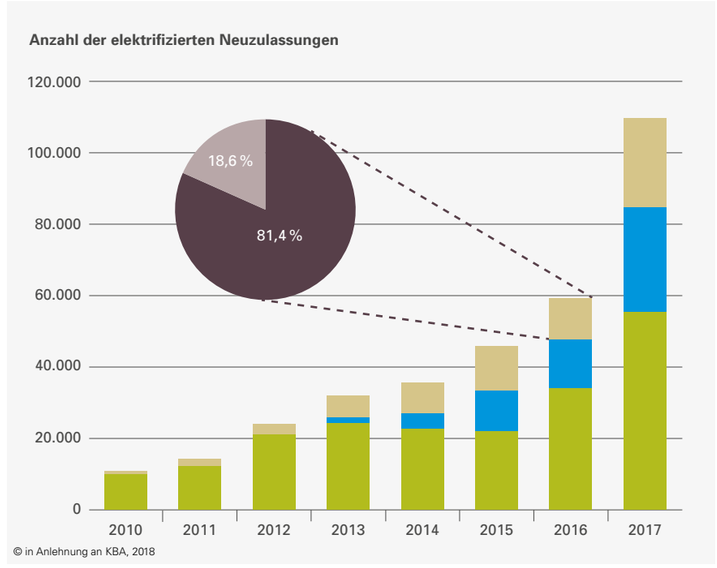


Abbildung 43: Anzahl der Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-PKW (inkl. Mild-HEV und Full-HEV) in Deutschland 2010–2017 und Anteil in Baden-Württemberg

3.2.1 Deutschland und Baden-Württemberg

Marktsituation

In der Bundesrepublik Deutschland wurden 2017 insgesamt ca. 3,44 Mio. PKW neu zugelassen, bei einem gesamten Fahrzeugbestand von ca. 45,8 Mio. Zwei Drittel der Neuzulassungen entfallen auf Fahrzeuge deutscher Hersteller (KBA, 2017). In Baden-Württemberg wurden 2017 rund 13,74 % der Neuzulassungen angemeldet, dies entspricht 472.700 PKW. Die Anzahl neu zugelassener BEV und PHEV stieg 2017 deutschlandweit um ca. 54.000 auf insgesamt ca. 130.000 Fahrzeuge, was einem Anteil von ca. 0,3 % am gesamten PKW-Bestand entspricht. Davon waren ca. 25.000 batterieelektrische Fahrzeuge (0,73 % Anteil an den Neuzulassungen) und ca. 29.000 Plug-in-Hybride (0,84 %) (ZSW, 2018).

Abbildung 43 illustriert die Entwicklung der Neuzulassungen für elektrifizierte Fahrzeuge seit 2010 in Deutschland sowie die jeweiligen Anteile der Antriebskonzepte HEV, PHEV und BEV. Mild-Hybride und Full-Hybride sind ab 2013 unter HEV zusammengefasst, PHEV ab diesem Jahr gesondert ausgewiesen. Generell ist ein relativ konstanter Anstieg zu erkennen, mit jedoch stärkerem Zuwachs im Jahr 2017. Baden-Württemberg hatte im Jahr 2016 bei den batteriebetriebenen Fahrzeugen einen Anteil von 18,62 % (KBA, 2018).

2018 waren in Deutschland über 16.100 öffentliche Normalladepunkte verfügbar. Davon befinden sich rund 2525 in Baden-Württemberg. Die Stadt Stuttgart lag im Dezember 2018 deutschlandweit auf dem vierten Platz mit über 380 Ladepunkten, nur Hamburg (834), Berlin (779) und München (696) konnten mehr Ladepunkte aufweisen (bdew, 2019). Stuttgart hat damit pro Kopf die beste Ausstattung.

Rahmenbedingungen

Politisches Ziel der Bundesrepublik ist es, im Jahr 2020 Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität zu sein (NPE, 2016). Zur Erreichung der COP21-Klimaziele sollen die jährlichen Treibhausgasemissionen auch aus dem Verkehrssektor signifikant reduziert werden, wobei CO_2 den größten Anteil ausmacht. Im Energiesektor sollen zukünftig erneuerbare Energien eine klimaneutrale und nachhaltige Energieversorgung in Deutschland sicherstellen, dabei auch CO_2-intensive Kohlekraftwerke ersetzen. 2017 hatten die erneuerbaren Energien bereits einen Anteil von über 36 % an der deutschlandweiten Stromversorgung (BDEW, 2017). Bis 2030 sollen mindestens 50 % erreicht werden (Die Bundesregierung, 2011).

Im Transportsektor erweist sich die Transformation zu umweltfreundlicheren Fahrzeugen als schrittweiser Prozess. Mit den strenger werdenden EU-Flottenzielgrenzwerten darf aber der durchschnittliche Ausstoß aller neu zugelassenen Fahrzeuge eines Herstellers den gesetzlich fixierten Grenzwert einer bestimmten jährlichen Menge CO_2 pro Kilometer nicht überschreiten. Für PKW galt dabei das Ziel von 130 g/km für das Jahr 2015, das bis 2021 weiter auf 95 g/km abgesenkt wird (VDA, 2017b). Zurzeit liegt der Durchschnitt bei ca. 128 g/km, mit stagnierender und sogar wieder leicht steigender Tendenz (CAM, 2018).

Zur Unterstützung der Entwicklung alternativer Antriebstechnologien und Mobilitätskonzepte hat die Bundesregierung in den letzten Jahren mehr als 2 Mrd. Euro investiert. In diesem Kontext begleitet die „Nationale Plattform Elektromobilität" (NPE) den Veränderungsprozess, die in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie gegründet wurde und zudem von Wissenschaft, Zivilgesellschaft und den Gewerkschaften unterstützt wird. Im Speziellen wurden hier u. a. Themen zu neuesten technischen Standards, Infrastrukturprojekten sowie wertschöpfungs- und beschäftigungsrelevanten Fragestellungen in der Elektromobilität diskutiert und Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Prozesses entwickelt. Neben dem qualitativen Ziel der Erreichung eines Leitmarkts wurde ein quantitatives Ziel für den Markthochlauf für Elektrofahrzeuge definiert: Insgesamt 1 Mio. E-Fahrzeuge (BEV und PHEV) sollen bis 2020 in Deutschland Teil des PKW-Bestands sein (NPE, 2016).

Zur Unterstützung dieser Ziele wurden verschiedene Instrumente und Maßnahmen entwickelt und umgesetzt: So existieren beispielsweise eine zehnjährige Kfz-Steuerbefreiung für batterieelektrische Fahrzeuge und (seit Juli 2016) direkte Kaufanreize in Form sogenannter Umweltprämien in Höhe von 4.000 Euro (BEV) bzw. 3.000 Euro (PHEV). Die Gesamtfördersumme beträgt 1,2 Mrd. Euro. Für Elektro- und Hybridfahrzeuge, die als Dienstwagen ab dem 01.01.2019 zugelassen werden, wird zudem die Versteuerung des geldwerten Vorteils bei privater Nutzung von 1 % auf 0,5 % halbiert. Neben der Schaffung monetärer Anreize wurden zudem diverse Maßnahmen zur Privilegierung umgesetzt, z. B. kostenfreies Parken in Innenstädten oder die Freigabe von Busspuren für Elektrofahrzeuge (NPE, 2016).

Auch in den Auf- und Ausbau der Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge wird weiter investiert. So stellt das BMVI beispielsweise in einem aktuellen Förderprogramm ca. 300 Mio. Euro zur Verfügung, zwei Drittel davon für den Aufbau von Schnellladepunkten an relevanten Verkehrsachsen, 100 Mio. Euro für Normalladepunkte (BMVI, 2017).

Aufgrund der Feinstaub- und Emissionsbelastung intensivierten sich zuletzt auch Diskussionen über Fahrverbote für Verbrennungsmotorfahrzeuge in Innenstädten, insbesondere für ältere Dieselfahrzeuge der Abgasnormen Euro 4 und Euro 5. Diese sind für knapp zwei Drittel der Stickoxidemissionen verantwortlich. Das mittlerweile feststehende Urteil des Bundesverwaltungsgerichts sieht Fahrverbote als zulässig an. Städtische Luftreinhaltepläne müssen demnach auch Fahrverbote enthalten, zumindest dort, wo die Einhaltung der Stickoxidgrenzwerte anders nicht möglich ist. Neben u. a. Hamburg, München, Dortmund, Düsseldorf, Köln und Kiel sind u. a. auch Stuttgart, Ludwigsburg und Reutlingen betroffen. Fahrverbote für ältere Dieselfahrzeuge (Abgasnorm Euro 4/IV) wurden inzwischen im gesamten Stadtgebiet Stuttgart ab Januar 2019 und für einzelne Straßen in Hamburg seit dem 01. Juni 2018 beschlossen.

Das Land Baden-Württemberg hat sich das Ziel gesetzt, in Deutschland zum Zentrum der Entwicklung und Produktion sowie Leitmarkt für die Elektromobilität zu werden. Dafür werden z. B. die Bundesförderprogramme um eigene Förderprojekte erweitert und ergänzt. Das Landeskabinett beschloss im Juni 2017 die „Landesinitiative Elektromobilität III – Marktwachstum Elektromobilität BW“. Hier werden die vorausgegangenen Aktivitäten („Landesinitiative Elektromobilität I und II“) mit einem Volumen von insgesamt 43,5 Mio. Euro fortgesetzt und weiter ausgedehnt. Im Rahmen des Förderprogramms werden rund 10 Mio. Euro für den Ausbau der Infrastruktur genutzt.

Eine weitere Stoßrichtung der Landesinitiative ist die Förderung von Elektrofahrzeugen. Hier stehen circa 12 Mio. Euro zu Verfügung, um die Förderung von Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellenbussen sowie die Elektrifizierung der Taxiflotten zu unterstützen. Für kommerziell genutzte PKW (bspw. Taxibetriebe, Carsharing-Unternehmen oder Lieferdienste) werden Zuschüsse in Höhe von 6.000 Euro für batterieelektrische Fahrzeuge und 1.500 Euro für Plug-in-Hybride gewährt (Land BW, 2017).

3.2.2 Vergleich mit Europa und ausgewählten europäischen Ländern

Zur Einordnung der deutschen und baden-württembergischen Marktsituation in einen internationalen Kontext sollen in einem zweiten Schritt der europäische Markt und ausgewählte europäische Länder betrachtet werden.

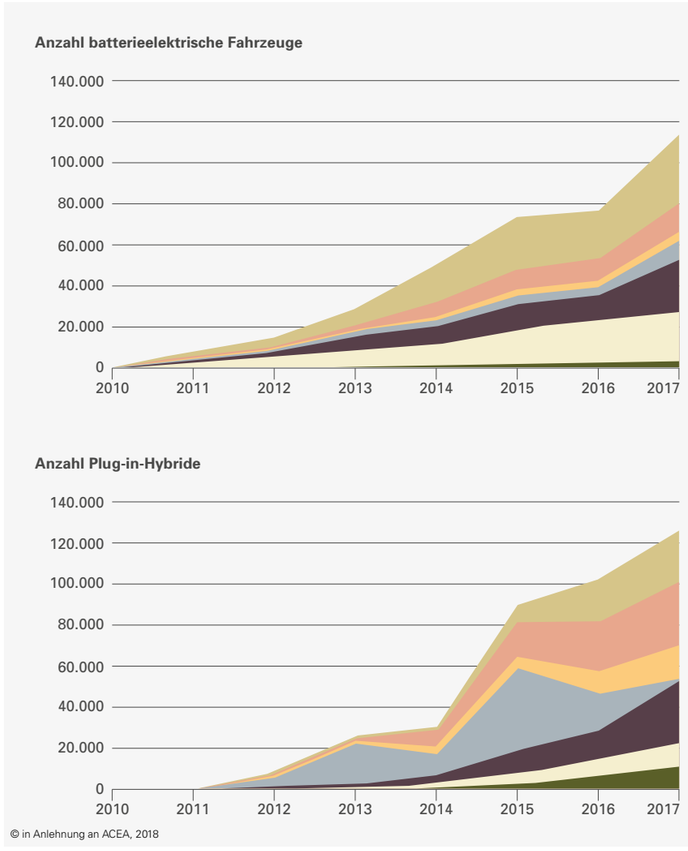
Marktsituation

Der gesamte PKW-Bestand in Europa lag 2015 bei 252 Mio. Fahrzeugen (ca. ein Viertel des Weltbestands), nur 0,1 % davon waren elektrifiziert (ACEA, 2017). 2017 wurden 15,13 Mio. PKW neu zugelassen, davon rund 4,6 Mio. Fahrzeuge deutscher Hersteller. Mit 1,43 % ist der Anteil an Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen (insgesamt ca. 217.000) niedrig, ca. 98.000 davon sind rein batterieelektrische Fahrzeuge (ACEA, 2018).

Abbildung 44 illustriert die Neuzulassungen elektrifizierter Fahrzeuge (BEV oben und PHEV unten) für ausgewählte europäische Länder von 2010 bis 2017. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl insgesamt kontinuierlich steigt und im Jahr 2017 mit ca. 115.000 BEV und 125.000 PHEV einen neuen Höchststand bei den Neuzulassungen erreicht hat.

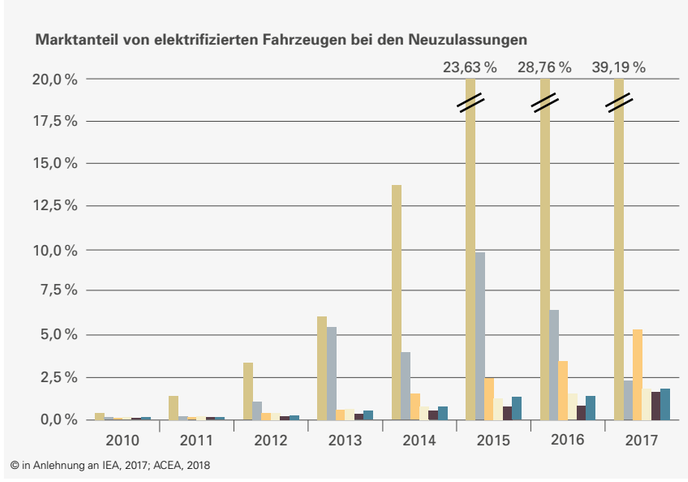
Besonders auffällig sind die Schwankungen der PHEV-Neuzulassungen in den Niederlanden (graublau) und der dortige Rückgang nach 2015. Dies ist direkte Folge einer im Jahr 2016 erfolgten Gesetzesänderung, mit der die CO_2-Steuer bei Plug-in-Hybriden signifikant angehoben wurde (IEA, 2017; ACEA, 2018). Des Weiteren sticht die Situation in Norwegen (beige) hervor: Sowohl bei den BEV als auch bei den PHEV wurden für diesen relativ kleinen Gesamtmarkt überproportional viele E-Fahrzeuge neu zugelassen, im Jahr 2017 absolut ca. 62.000.

Dies illustriert auch Abbildung 45, die die relativen Marktanteile bei Neuzulassungen in ausgewählten Ländern in Vergleich setzt. Hierbei wird deutlich, dass Deutschland relativ gesehen hinter anderen europäischen Ländern rangiert und auch unter dem EU-Durchschnitt liegt. Erst 2017 stieg der E-Fahrzeug-Anteil an den Neuzulassungen in Deutschland auf über 1 %. In Norwegen hingegen wurden 2017 nahezu 40 % Marktanteil an den Neuzulassungen erreicht. Auch Schweden zeigt einen wachsenden Anteil der E-Fahrzeuge am Gesamtmarkt und erreichte über 5 % im Jahr 2017.



© in Anlehnung an ACEA, 2018

Abbildung 44: Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in ausgewählten europäischen Ländern 2010–2017 – BEV (oben) und PHEV (unten)



© in Anlehnung an IEA, 2017; ACEA, 2018

Abbildung 45: Marktanteil elektrifizierter Fahrzeuge (BEV und PHEV) in ausgewählten europäischen Ländern 2010–2017

In Europa existierten 2017 rund 132.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte für Elektrofahrzeuge (Europäische Kommission, 2017), ca. 18.000 davon mit Schnellademöglichkeit. Führend sind die Niederlande mit insgesamt 26.088 Normalladestationen und 701 Schnellladepunkten. Die meisten Schnellladepunkte (1.523) existieren derzeit im Vereinigten Königreich (IEA, 2017).

Rahmenbedingungen

Die Europäische Kommission hat für ihre derzeitige Legislaturperiode (2015–2019) u. a. das Ziel gesetzt, den Klimaschutz in Europa weiter und stärker voranzutreiben. Europa soll u. a. Vorreiter für einen klimafreundlichen und ressourceneffizienten Transportsektor sein, insbesondere bei den bodengebundenen Fahrzeugen. Dementsprechend ist es Ziel, alternativ angetriebene Fahrzeuge im Markthochlauf zu unterstützen sowie die dazugehörige Infrastruktur auszubauen. Wichtige Stellgrößen sind die definierten Ziele für CO_2-Flottengrenzwerte, die bis 2021 auf 95 g/km festgelegt wurden. Eine weitere Reduzierung um 37,5 % bis zum Jahr 2030 ist nach aktueller Vorlage geplant. Die Ladeinfrastruktur soll bis zum Jahr 2020 auf ca. 440.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte ausgebaut werden (Europäische Kommission, 2017).

Es muss mit einer intensiven Diskussion in den Folgejahren gerechnet werden. Das aus dem Pariser Klimaschutzabkommen (COP21) abgeleitete Ziel von einer Reduktion von 40 % CO_2 im Verkehrssektor bis 2030 (gegenüber 1990) kann voraussichtlich mit den derzeit genannten Maßnahmen nicht erreicht werden.

Im Folgenden soll exemplarisch auf drei Länder (Vereinigtes Königreich, Frankreich und Niederlande) eingegangen werden: So hat sich das Vereinigte Königreich zum Ziel gesetzt, bis 2020 mindestens 1,6 Mio. Elektrofahrzeuge im Bestand zu haben. Dies wird derzeit mit monetären Zuschüssen in Höhe von rund 5.100 Euro für BEV und 2.800 Euro für PHEV subventioniert. Des Weiteren werden Installationen privater Ladesäulen in Eigenheimen mit ca. 625 Euro bezuschusst. Elektrofahrzeuge werden zudem von der Einfahrtsbeschränkung in die Londoner Innenstadt befreit. Für 2040 ist ein komplettes Verkaufsverbot für Diesel- und Benzinfahrzeuge geplant. Ab 2050 sollen konventionelle Fahrzeuge komplett verboten werden (IEA, 2017; EAFO, 2018).

In Frankreich sollen bis 2020 rund 2 Mio. E-Fahrzeuge registriert sein. Dafür wird ein Bonus-Malus-System genutzt: Fahrzeuge, die weniger als 21 g CO_2/km bzw. 21–60 g CO_2/km emittieren, erhalten einen Kaufzuschuss in Höhe von 6.000 Euro bzw. 1.000 Euro. Zudem werden Elektrofahrzeuge in Frankreich von der Maut befreit. Mittel- bis langfristig sind ebenfalls Verkaufsverbote für Diesel und Benziner angestrebt (ab 2040) sowie die Schaffung einer Einfahrverbotszone für Diesel (ab 2025) und Benziner (ab 2030) in Paris. Der Infrastrukturausbau soll bis 2030 mit insgesamt 7 Mio. Euro unterstützt werden (EAFO, 2018; IEA, 2017; MEEM, 2016).

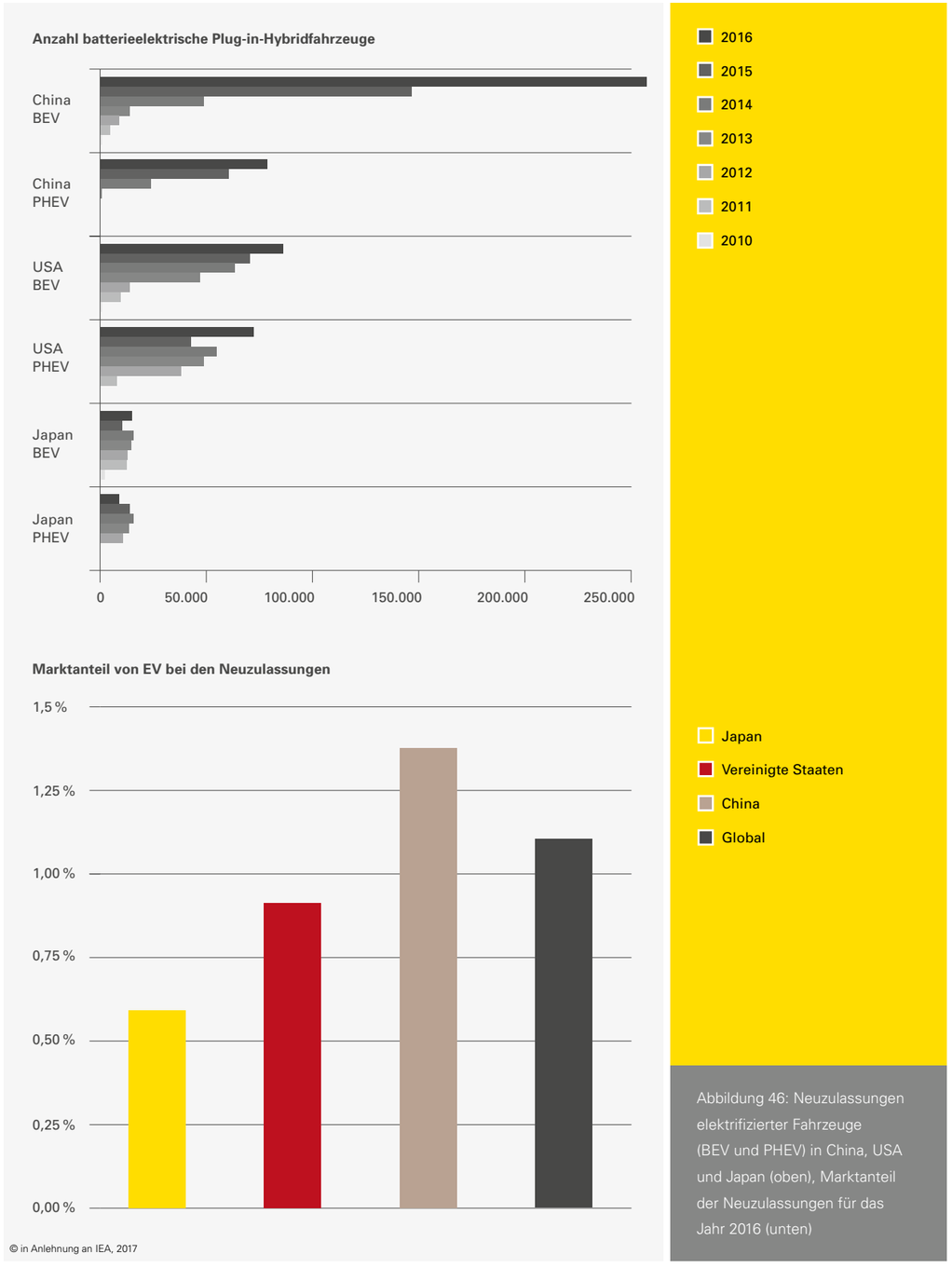
Die Niederlande wollen bis 2020 mindestens 200.000 Elektrofahrzeuge im Bestand haben und 2025 1 Mio. erreichen. Dies wird zum einen mit einer steigenden Besteuerung von CO_2 erreicht. Hierfür gibt es verschiedene Kostensätze in Abhängigkeit vom Emissionsvolumen. Für Fahrzeuge zwischen 1 und 79 g CO_2/km fallen nur 6 Euro/g CO_2 an, stößt das Fahrzeug über 174 g CO_2/km aus, liegt der Satz bei 476 Euro/g CO_2. Neben den Besteuerungssätzen werden batterieelektrische Fahrzeuge vollständig und PHEV zu 50 % von der Straßennutzungssteuer befreit. Zudem ist ein Verkaufsverbot für Diesel und Benziner ab 2030 geplant (Amsterdam Round Tables, 2014; EAFO, 2018).

3.2.3 Vergleich mit den USA, China und Japan

Marktsituation

Von den rund 1 Mrd. PKW weltweit entfallen auf China und die USA fast 30 %, wobei 2016 in China über 148 Mio. PKW gezählt wurden (FHWA, 2017; NBSC, 2017). Japan hatte 2016 ca. 61 Mio. Fahrzeuge im Bestand (JAMA, 2018). Insgesamt wurden im Jahr 2017 weltweit ca. 80 Mio. PKW neu zugelassen, wobei China mit ca. 24,3 Mio. Fahrzeugen daran den Hauptanteil hatte (31 %). In den USA und Japan waren es mit 6,8 Mio. bzw. 4,1 Mio. PKW bedeutend weniger (OICA, 2018).

Die Neuzulassungen von E-Fahrzeugen ab 2010 in den USA, China und Japan sowie den jeweiligen Marktanteil für das Jahr 2016 veranschaulicht Abbildung 46. Besonders der chinesische Markt für batterieelektrische Fahrzeuge ist in den vergangenen Jahren deutlich gewachsen. In den USA hat sich die Nachfrage nach BEV und PHEV ebenfalls insgesamt gesteigert, in Japan hingegen stagnieren die Neuzulassungen auf einem konstanten Niveau von ca. 25.000 bis 30.000 Fahrzeugen jährlich.



© in Anlehnung an IEA, 2017

Abbildung 46: Neuzulassungen elektrifizierter Fahrzeuge (BEV und PHEV) in China, USA und Japan (oben), Marktanteil der Neuzulassungen für das Jahr 2016 (unten)

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur wurde in China seit 2014 stark vorangetrieben. So waren damals noch 21.000 Normal- und 9.000 Schnellladepunkte vorhanden, 2016 aber bereits über 52.000 Normal- und mehr als 88.000 Schnellladepunkte. In den USA standen 2016 35.000 Normalladepunkte und rund 5.400 Schnellladepunkte zur Verfügung. Die japanische Ladeinfrastruktur verfügt über 23.000 Ladepunkte, darunter ca. 6.000 Schnellladepunkte (IEA, 2017).

Rahmenbedingungen

China plant, bis 2020 über 4,6 Mio. elektrifizierte Fahrzeuge im Bestand zu haben. Dabei gilt ab 2019 eine neue Quotenregel: Demnach muss jeder Automobilhersteller, der mehr als 30.000 Fahrzeuge jährlich produziert oder importiert, mindestens 10 % elektrifizierte Fahrzeuge verkaufen. Diese Quote wird ab 2020 auf 12 % angehoben und weiter verschärft (Schäfer, 2017). Zudem wird der Kauf von Elektrofahrzeugen mit monetären Anreizen bezuschusst. Für ein BEV beträgt der Zuschuss 7.200 Euro, für ein PHEV 4.200 Euro. In der Megacity Peking sind derzeit die Neuzulassungen für PKW begrenzt. Aus diesem Grund müssen neue Autobesitzer auf das Glück setzen und in einem lotterieähnlichen Verfahren auf eine Zulassung hoffen. Elektrofahrzeuge sind von diesem Verfahren ausgenommen und erhalten eine uneingeschränkte Zulassung (IEA, 2017).

In den USA wird weiterhin das Ziel verfolgt, bis 2025 circa 3,3 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen zu haben. In einigen Bundesstaaten wurde zudem eine feste Quote gesetzt, mit der ab 2018 mindestens 2,5 % und ab 2025 bereits 6 % rein elektrisch betriebene Fahrzeuge bei den Neuzulassungen erreicht werden sollen (IEA, 2017; ZEV, 2017). Zudem bekennen sich vereinzelte Städte zu einem Diesel- und Benziner-Verbot, z. B. Los Angeles und Seattle ab 2030 (Business Insider, 2017).

Die japanische Regierung hat sich das Ziel von 1 Mio. elektrifizierten Fahrzeugen bis 2020 gesetzt und fördert es mit einem Kaufzuschuss von bis zu 6.300 Euro. Entscheidend für die Höhe der Bezuschussung sind Batteriegröße und Reichweite (IEA, 2017).

3.3 Aktuelle Herausforderungen und Markthochlauf der Elektromobilität

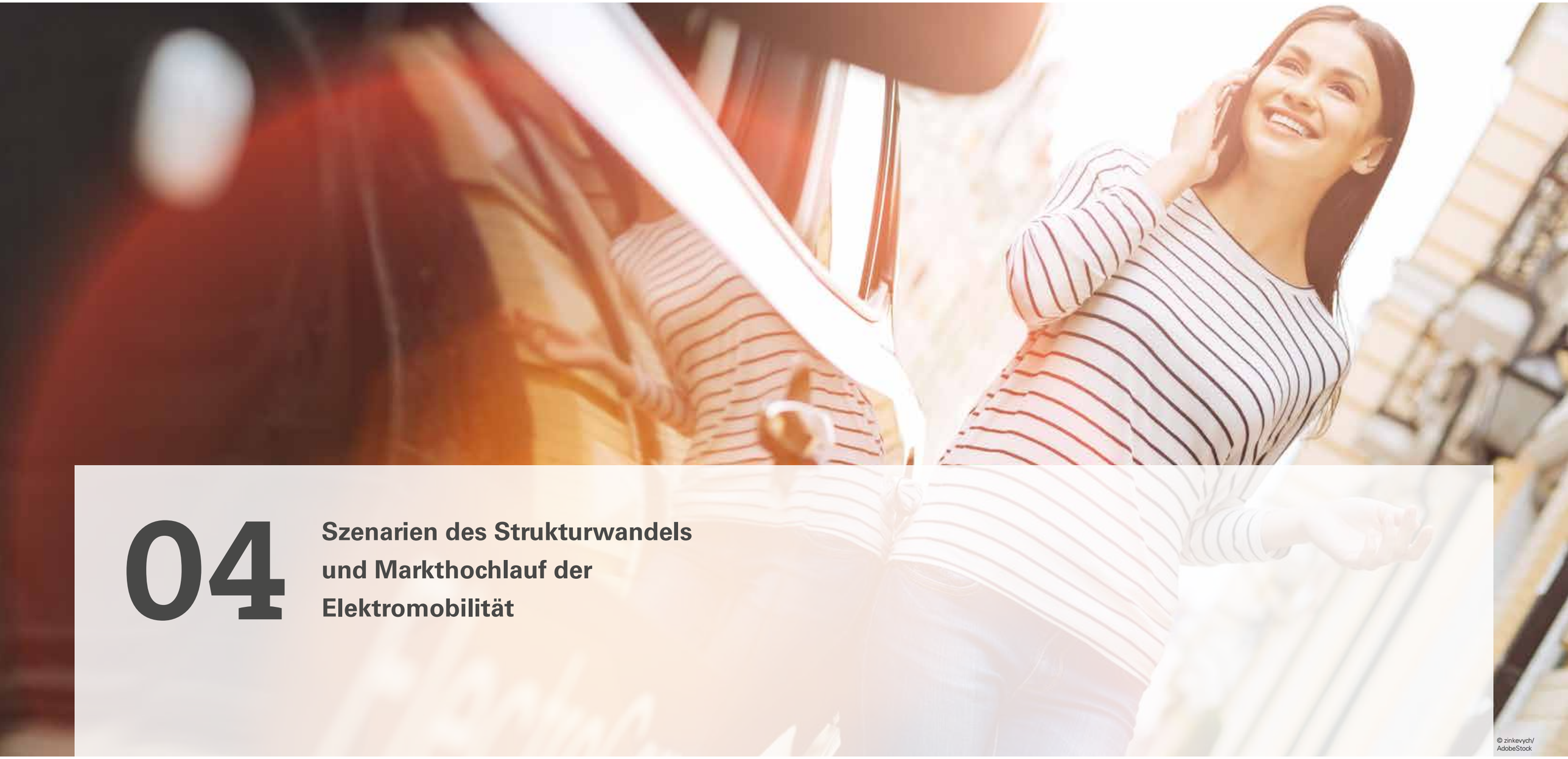
Die internationale Staatengemeinschaft, aber auch die Bundesrepublik Deutschland und das Land Baden-Württemberg haben sich zur Einhaltung von Klimaschutzzielen verpflichtet. Deutliche CO_2-Einsparungen werden gerade vom Verkehrssektor erwartet. Außerdem verschärft die EU ihre Grenzwerte bei der Feinstaubbelastung (derzeit PM10-Konzentration von 40 µg/m³ im Jahresmittel) und bei den NO_x-Emissionen (Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ NO_2). Diese sollen 2030 im Vergleich zu 2005 um 65 % beim Stickstoffoxid und 43 % beim Feinstaub reduziert werden.

Die Automobilhersteller und ihre Zulieferer stehen vor einer komplexen Herausforderung: Bei den klassischen Verbrennungstechnologien liegen Dieselmotoren gegenüber Benzin-/Ottomotoren beim CO_2-Austoß deutlich niedriger, benötigen aber zur Einhaltung der NO_x- und Feinstaub-Vorgaben sehr aufwendige und kostenintensive Abgasanlagen. Zudem stehen sie durch den Abgasskandal und die möglichen Fahrverbote für den Diesel in der Diskussion (DLR und WI, 2015; Baden-Württemberg-Stiftung, 2017).

Elektromobilität stellt – auch im Rahmen einer hybriden Übergangsphase – eine Möglichkeit zur Reduzierung der lokalen Emissionsbelastung dar und könnte zur Einhaltung sowohl von Grenzwerten für die Automobilhersteller als auch von Klimazielen auf Landes- und nationaler Ebene beitragen. Daneben könnten auch die Technologiepfade Wasserstoff und Einsatz synthetischer Kraftstoffe zur Emissionsreduktion im Verkehr beitragen, auch in Kombination mit der Elektromobilität und (bei SynFuels) in einer Übergangsphase mit hocheffizienten ICE- und Hybridantrieben. Gerade H_2 könnte so bei schweren Nutzfahrzeugen und weiteren Verkehrsarten, die auf hohe Fahrleistungen und Reichweiten angewiesen sind, eine geeignete Technologieoption darstellen. Zurzeit jedoch sind die Kosten der Brennstoffzellen aufgrund zu geringer Stückzahlen noch zu hoch. Auch synthetische Kraftstoffe sind derzeit noch mit hohen Kosten bei der Herstellung verbunden, zudem sind die Gesamtenergiebedarfe im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom als Energieträger um ein Vielfaches höher.

Die hier vorliegende Studie konzentriert sich im Weiteren nur auf den Technologiepfad der Elektrifizierung und analysiert dessen Effekte in ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Die Effekte für weitere Antriebs- und Kraftstoffkombinationen – insbesondere vor dem Hintergrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien – sollten in einer weiteren Studie untersucht werden.

Auf den internationalen Automobilmärkten sind die Marktanteile elektrifizierter Fahrzeuge z. T. schon größer als in Deutschland und wachsen – insbesondere in China – mit hoher Geschwindigkeit. Bedeutender Faktor sind entsprechende förderliche politische und gesetzliche Rahmenbedingungen, die je nach Ausprägung als kritische Stellhebel für den Markthochlauf der Elektromobilität dienen. Eine detaillierte Analyse dieser Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Verbreitung elektrifizierter Fahrzeuge bis 2030 werden im Folgenden in zwei Szenarien modelliert und simuliert. Diese bilden die Basis der späteren Analyse der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in der deutschen Automobilbranche.



04 Szenarien des Strukturwandels und Markthochlauf der Elektromobilität

© zinkevych/
AdobeStock

04

Szenarien des Strukturwandels
und Markthochlauf der Elektromobilität

© Porsche AG

In Kürze:

- Die Metaanalyse von 74 unterschiedlichen Szenarien aus der Literatur zeigt sowohl unter moderaten als auch unter progressiven Bedingungen einen Rückgang des Marktanteils bei reinen Verbrennern, mit z. T. jedoch erheblich variierenden Geschwindigkeiten.
- Dezidierte Analysen benennen die Batteriekosten, die Infrastrukturverfügbarkeit, die CO_2-Gesetzgebung sowie das jährliche Produktionsangebot als kritische Stellgrößen für den Markthochlauf.
- In den eigens simulierten Szenarien (DLR-VECTOR21) erreicht das BEV einen Marktanteil zwischen 15 % („Business as usual“) und 51 % („progressiv“) der PKW-Neuzulassungen im Jahr 2030.
- Das Brennstoffzellenfahrzeug erreicht bei alleiniger Betrachtung des europäischen PKW-Markts keinen Markteinstieg vor 2030, könnte aber von Spill-over-Effekten (Übertragungseffekten) aus anderen Bereichen (u. a. Nutzfahrzeuge) und damit verbundenem Infrastrukturausbau und Kostensenkungen profitieren.
- Beide Szenarien erreichen den im Klimaschutzplan genannten Meilenstein 2030 für den PKW-Anteil im Verkehrssektor. Dies allerdings unter der Prämisse nicht weiter steigender Verkehrsleistungen, die die Effekte durch effizientere Antriebsstränge und Technologien (über-)kompensieren könnten.

Die Entwicklung von Wertschöpfung und Beschäftigung in Baden-Württemberg hängt in starkem Maße von der Geschwindigkeit des Markthochlaufs alternativer und elektrifizierter Fahrzeuge ab. Die in Zukunft voraussichtlich steigende Nachfrage nach neuen Konzepten und Technologien steht einem möglichen Produktangebot baden-württembergischer Hersteller und Zulieferer gegenüber. Die auf Studien basierenden Prognosen eines Markthochlaufs alternativer PKW-Antriebskonzepte unterscheiden sich z. T. deutlich: Die Spannbreite reicht bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen im Jahr 2025 beispielsweise von 0 % bis 70 % Anteil an den Neuzulassungen.

Eine valide Definition von Szenarien der Elektromobilität fußt immer auf der Analyse der für den Markthochlauf bestimmenden Einflussgrößen und von deren Effekt auf die Marktdurchdringung. Dieses Kapitel analysiert Marktentwicklungsszenarien der PKW-Neuzulassungen und die ihnen zugrunde liegenden Rahmenbedingungen und Annahmen. Darauf aufbauend können Schlüsselstellgrößen und deren Ausprägungen identifiziert werden, die das Rahmengerüst für die Berechnung eigener PKW-Szenarien mit dem DLR-VECTOR21-Szenariomodell liefern. Zwei unterschiedliche Markthochlaufszenarien definieren die Entwicklung der Nachfrage nach alternativen und elektrifizierten Fahrzeugen für den europäischen Markt als Grundlage der weiteren Analysen zu Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei ausschließlich auf PKW. Für die Entwicklung zukünftiger Marktpotenziale im wirtschaftlichen Straßenverkehr und bei Nutzfahrzeugen wird an dieser Stelle auf die Studie „Nullemissionsnutzfahrzeuge“ der e-mobil BW verwiesen (e-mobil BW, 2017).

4.1 Metaanalyse bestehender Fahrzeugmarktszenarien für PKW und zugrunde liegender Einflussfaktoren

Zur Analyse und Einordnung des Markthochlaufs alternativer Antriebe wurden in einem ersten Schritt umfangreiche Metaanalysen existierender Fahrzeugmarktszenarien und der ihnen zugrunde liegenden Annahmen durchgeführt.

Exkurs:

Ein Szenario ist ein Entwurf einer zukünftig möglichen Situation oder einer Abfolge zukünftiger Ereignisse. Grundlage jeden Szenarios ist zum einen die Analyse der aktuellen Situation, zum anderen die Untersuchung der erwartbaren Entwicklungen, Trends und Veränderungen in der Zukunft. Ein Szenario stellt damit kein gesichertes Abbild der Zukunft dar, sondern liefert die Grundlage für die objektive Analyse eines Zukunftszustands und von dessen Effekten (zum Beispiel auf ökonomischer und ökologischer Ebene).

Allgemein dient eine Metaanalyse der Einordnung und Zusammenfassung wissenschaftlicher Primäruntersuchungen. Die hier vorliegende Metaanalyse reiht Forschungsarbeiten über quantitative und statistische Verfahren ein und stellt die Ergebnisse zusammenfassend und vergleichend dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sämtliche seit 2010 veröffentlichten Studien zur Marktentwicklung von PKW-Neuzulassungen identifiziert und aufbereitet. Davon sind anschließend diejenigen Veröffentlichungen herangezogen worden, deren Ergebnisse auf der Berechnung eines wissenschaftlichen Szenariomodells basieren und die mindestens die drei Antriebskonzepte ICE, PHEV und ZEV (Zero Emission Vehicles = BEV + FCEV) differenzieren. So konnten insgesamt 27 Studien ermittelt werden, die 74 unterschiedliche Fahrzeugmarktszenarien abbilden.

Der zweite Schritt umfasst die Analyse der Rahmenparameter und die Einordnung der „Storyline“ der jeweiligen Szenarien. In diesem Zuge konnten drei generelle Entwicklungspfade identifiziert werden – konservative, moderate und progressive. Für die weitere Untersuchung soll der konservative Entwicklungspfad nicht weiter berücksichtigt werden, da er auf Basis früherer Analysen (v. a. aus 2010) von einer sehr zurückhaltenden Entwicklung von Gesetzgebung, Nachfrage und Angebot alternativer Antriebskonzepte ausgeht. Dies spiegelt die derzeitigen Entwicklungen im Fahrzeugmarkt und -umfeld nach Ansicht der Autoren nicht ausreichend wider. Im Folgenden ist also die Analyse einer moderaten Entwicklung von Rahmenbedingungen („Business as usual“) einerseits und einer progressiven Entwicklung andererseits Ausgangspunkt für die Szenariomodellierung.

Die Metaanalyse ermöglicht eine auf statistischen Methoden basierende Einordnung der Auswirkungen unterschiedlicher

Schlüsselstellgrößen auf die Marktdurchdringung. Die Ergebnisse sind im Folgenden in die genannten zwei Entwicklungsstränge untergliedert: „Business as usual" und „progressiv".

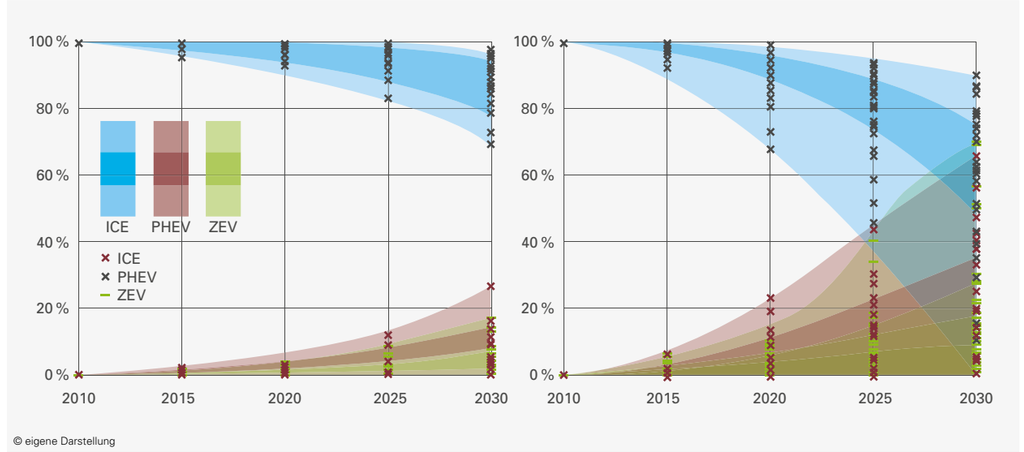
Rahmenbedingungen „Business as usual": Das grundlegende Rahmengerüst bestehender moderater Entwicklungen basiert auf der konservativen Fortschreibung aktueller regulativer Maßnahmen sowie der Annahme einer relativ langsamen technischen und kostenseitigen Weiterentwicklung alternativer Antriebstechnologien und -konzepte. Rahmenbedingungen für den europäischen Fahrzeugmarkt gehen dabei vom existierenden CO_2-Flottengrenzwert von 95 g/km im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) aus und projizieren diesen auch in die Zukunft. Vereinzelt wurde dieser bis auf 70 g/km für 2030 verschärft. Grenzwerte für den US-amerikanischen Fahrzeugmarkt gehen von einer Fortschreibung bis auf 121 g/km für 2020 aus, wobei eine weitere Verschärfung bis 2030 nicht berücksichtigt wurde. Des Weiteren wurden direkte monetäre Kaufanreize (Kaufprämien) nach derzeitigem Stand übernommen und teilweise weiter in die Zukunft verlängert. Allerdings reduziert sich die Bezuschussung im Vergleich zur Ausgangslage. Eine moderate technologische Weiterentwicklung führt zu leicht sinkenden Batteriekosten auf unter 250 Euro/kWh auf Systemebene. Zugleich werden Kraftstoffverbrauchsreduktionen bis zu rund 70 % bei den konventionellen Verbrennungsmotoren erzielt. Aufgrund geringer Nachfrage nach batteriebetriebenen Fahrzeugen werden bis 2030 auch das Fahrzeugangebot und die Produktionskapazitäten nur langsam gesteigert. Der Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge verläuft ebenfalls relativ langsam, sodass auch bis 2030 noch keine ausreichende Verfügbarkeit gegeben ist. Die Brennstoffzellentechnologie erlebt in keiner moderaten Studie nennenswerte technologische oder kostenseitige Fortschritte. So wird auch der Ausbau der H_2-Infrastruktur in den genannten Studien bis 2030 nicht vorangetrieben. Die Kraftstoffkosten werden bis 2030 unterschiedlich fortgeschrieben. Zum Teil steigen diese auf 145 USD pro Rohölbarrel, z. T. werden sie auf dem heutigen Niveau belassen. Die Strompreise bleiben in allen untersuchten Studien nahezu konstant bei rund 25 Cent/kWh.

Rahmenbedingungen „progressiv": Bei einer progressiven Entwicklung werden ebenfalls die derzeit bestehenden Regularien als Ausgangsbasis aufgegriffen, aber viel ambitionierter in die Zukunft fortgeschrieben. Demnach bilden sie relativ strenge CO_2-Flottengrenzwerte ab, die bis 2030 teilweise auf 50 g/km (NEFZ) für Europa verschärft werden. Die US-amerikanischen Zielwerte bleiben in den untersuchten Studien gegenüber den moderaten Szenarien hingegen unverändert. Zudem gehen einige Untersuchungen von einem kompletten Verkaufsverbot für verbrennungsmotorische Fahrzeuge aus, wenngleich dieses erst 2030 eintritt. Die monetären Kaufanreize werden in vereinzelten Studien über den derzeit festgelegten Zeitraum hinaus fortgeschrieben und teilweise leicht erhöht. Batteriekosten sinken hingegen signifikant durch hohe Forschungsaufwendungen und Investitionen in effizientere Produktionstechniken, sodass ab 2020 Kosten unter 200 Euro/kWh (Systemebene) erreicht werden. Durch Skalen- und Lernkurveneffekte fallen diese noch weiter und erreichen in vereinzelten Studien ca. 150 Euro/kWh im Jahr 2030. Um dem hohen Neuzulassungsanteil elektrifizierter PKW gerecht zu werden, wird die Ladeinfrastruktur signifikant ausgebaut und erreicht bis 2030 eine Flächenabdeckung von ca. 75 %. Zudem werden von den Herstellern und Zulieferern zusätzliche Produktionskapazitäten geschaffen, um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden. Die progressive Entwicklung geht zudem teilweise von einem Anstieg der Kraftstoffkosten auf bis zu 150 USD pro Rohölbarrel aus. Strompreise hingegen verbleiben – wie auch bei den moderaten Szenarien – auf dem heutigen Niveau (rund 25 Cent/kWh). In drei Studien wurde der Durchbruch der Brennstoffzellentechnologie simuliert. Dafür gehen diese u. a. von einem umfangreichen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur aus. Zudem sinken die Herstellungskosten für Brennstoffzellensysteme signifikant, da der Anteil kostenintensiver Komponenten verringert werden kann und zudem Spill-over-Effekte aus dem Nutzfahrzeugsegment wirksam werden.

Abbildung 47 veranschaulicht die unterschiedlichen Entwicklungspfade von ICE, PHEV und ZEV (= BEV + FCEV) als Anteil an den PKW-Neuzulassungen für die untersuchten moderaten (links) und progressiven Szenarien (rechts). Die hellblauen Bereiche illustrieren den Marktanteil der konventionellen PKW, wobei der dunkelblaue Pfad den Mittelwert[2] darstellt. Die PHEV-Marktentwicklung ist in Hellrot und in Rot abgebildet. Grün dargestellt sind die Bandbreiten der Zero Emission Vehicles (v. a. BEV).

Laut Metaanalyse ergeben sich aus o. g. Rahmenbedingungen („Business as usual") die **moderaten Neuzulassungsanteile:** Hier ist deutlich zu erkennen, dass fast alle Studien von einem weiterhin hohen Marktanteil von Verbrennungsmotorfahrzeugen auch in der Zukunft ausgehen. Ab 2025 steigt die Varianz zwar an, allerdings wird 2030 noch immer von einem Marktanteil der ICE-Fahrzeuge zwischen ca. 79 % und 88 % ausgegangen. Bei den PHEV und ZEV verändert

2 | 2-Sigma = Wertebereich, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden.



© eigene Darstellung

Abbildung 47: Entwicklungspfade der untersuchten Studien: moderat (links) und progressiv (rechts)

sich der Marktanteil bis 2020 nur sehr geringfügig und liegt bei unter 2 %. Ab 2025 wächst vor allem der Anteil der Plug-in-Hybridfahrzeuge, der dann bis 2030 einen Wert von ca. 13 % erreicht. Für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge liegt die Bandbreite 2030 zwischen 3 % und 8 %. Der bei moderaten Rahmenbedingungen dargestellte maximale Marktanteil von BEV und FCEV rangiert 2030 bei 17 %.

Die **progressiven Neuzulassungsanteile** der untersuchten Studien gehen von hohen Marktverlusten bei konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeugen aus. Bereits 2020 – und damit zehn Jahre früher als im moderaten Szenario – liegt der Median der ICE-Fahrzeuge bei nur noch 93 %. Die Bandbreite nimmt bis 2030 weiter zu und reicht vom kompletten Marktaustritt im Extremfall bis hin zu einem Marktanteil von weiterhin 90 %. Entsprechend stärker nehmen die Anteile von PHEV und ZEV ab 2020 zu. Auffällig ist zudem der verzögerte Entwicklungspfad bei Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zu Plug-in-Hybriden. Erst ab 2025 steigen die Marktanteile von BEV und FCEV auf Basis der progressiven Fortschreibung der Rahmenbedingungen signifikant.

Durch eine Verknüpfung der „Storylines" der analysierten Fahrzeugmarktszenarien mit den dort dargestellten Neuzulassungsanteilen lassen sich in einem weiteren Schritt die ausschlaggebenden kritischen Einflussfaktoren auf und Stellgrößen für die Marktdurchdringung identifizieren und deren Bandbreiten darstellen.

Die **Batteriekosten** haben in allen untersuchten Studien einen starken Einfluss auf die Marktentwicklung, da sie maßgeblich den Kaufpreis aller elektrifizierten Fahrzeuge bestimmen. Sie variieren im Vergleich der moderaten und progressiven Entwicklungen 2020 zwischen ca. 250 Euro/kWh und weniger als 200 Euro/kWh. Die Differenz von z. B. 50 Euro/kWh bei einer Batteriegröße von 40 kWh führt zu einem Unterschied von 2.000 Euro beim Anschaffungspreis. Bis 2030 steigt die Varianz weiter an, sodass in der progressiven Entwicklung Kosten von ca. 150 Euro/kWh erreicht werden.

Der Einfluss des **CO_2-Flottengrenzwertes** auf die Neuzulassungsanteile ist ebenfalls groß und wirkt stark positiv auf die Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge. Die Bandbreiten bewegen sich von 95 g/km bis unter 50 g/km im Jahr 2030. Durch die Verschärfung des Grenzwertes sind die Hersteller gezwungen, emissionsärmere sowie -freie Fahrzeuge zu verkaufen, um der Gesetzgebung gerecht zu werden. Bei Überschreitung der Flottengrenzwerte müsste der OEM Strafzahlungen leisten. Diese ermitteln sich aus der Differenz der durchschnittlichen CO_2-Emissionen der verkauften Fahrzeuge des OEM zum gesetzlichen Grenzwert. Die Differenz wird mit 95 Euro pro zusätzlichem Gramm CO_2 und der Anzahl der verkauften Fahrzeuge multipliziert. Bei 3 Mio. verkauften Fahrzeugen mit im Schnitt einem Gramm Überschreitung des Grenzwertes würde dies eine Strafzahlung in Höhe von 285 Mio. Euro bedeuten.

Die **Ladeinfrastruktur** ist für Kunden ein ausschlaggebendes Kriterium beim Kauf von Elektrofahrzeugen. Bei nicht ausreichender Verfügbarkeit wird eine signifikante Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge (insbesondere BEV) nicht erreicht. Im direkten Vergleich zu monetären Kaufzuschüssen wirkt diese Stellgröße mit langfristigem positivem Effekt. So kann in den betrachteten Szenarien eine ausreichende Infrastrukturverfügbarkeit auch das Fehlen monetärer Kaufzuschüsse (über-)kompensieren.

Die unterschiedlichen **Energiepreise** für sowohl Kraftstoffe als auch Strom variieren unabhängig von der Szenariokategorie („Business as usual"/„progressiv"). Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieser Parameter für die Marktentwicklung nicht von ausschlaggebender Bedeutung ist. Zudem ist beispielsweise in Deutschland eine hohe Preiselastizität bei den Kraftstoffpreisen zu erkennen.

Der Einfluss der maximal möglichen jährlichen **Produktionskapazität** ist ähnlich groß wie derjenige der Ladeinfrastrukturverfügbarkeit. Die steigende Nachfrage nach alternativen Antrieben kann nur bedient werden, sofern ein ausreichendes Produktangebot und ausreichende Produktionskapazitäten vorliegen.

4.2 Entwicklung der globalen PKW-Märkte

Der globale PKW-Absatz bis zum Jahr 2030 – und dabei insbesondere die Marktdurchdringung alternativer Antriebe – wird v. a. von den Marktregionen Europa, USA und China getrieben. Während erwartet wird, dass sich die jährlichen Neuzulassungen in den USA (2017 ca. 17 Mio. PKW) und Europa (ca. 15 Mio.) bis 2030 auf einem relativ gleichbleibenden Niveau bewegen, werden für China (ca. 24 Mio.) jährliche Steigerungsraten von bis zu 4 % prognostiziert (Mauerer, 2018). Die globalen PKW-Neuzulassungen könnten so von ca. 83 Mio. im Jahr 2017 auf über 110 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2030 zunehmen und der globale Fahrzeugbestand auf insgesamt 1,5 Mrd. PKW steigen (IEA, 2017). Die Märkte Europa, USA und China wären dabei für ca. 60 % des PKW-Absatzes (ca. 64 Mio. Fahrzeuge) verantwortlich (VDMA, 2018).

	Dez. 2017	+/– in %	Jan.–Dez. 2017	+/– in %
Europa (EU28 + EFTA)*	1.136.600	–4,8	15.631.700	3,3
Europäische Union (EU28)*	1.088.500	–4,9	15.137.700	3,4
Westeuropa (EU15 + EFTA)	1.028.100	–5,3	14.323.100	2,5
Neue EU-Länder (EU13)*	108.400	0,0	1.308.600	12,8
Russland**	166.000	14,0	1.595.700	11,9
USA**	1.595.800	–5,1	17.134.700	–1,9
Japan	330.300	–0,8	4.386.400	5,8
Brasilien**	205.300	3,1	2.176.000	9,4
Indien	239.700	5,2	3.229.100	8,8
China	2.601.300	–0,3	24.171.400	2,0

© VDA, 2018b

Abbildung 48: Neuzulassungen PKW für ausgewählte Weltregionen 2017 *Ohne Malta. **Light Vehicles.

Der Absatz rein batterieelektrischer Fahrzeuge unterscheidet sich Prognosen zufolge aber im Vergleich der Weltregionen z. T. signifikant: Während für Europa ein Absatz von ca. 3 Mio. BEV-PKW für das Jahr 2030 prognostiziert wird (ca. 20 %), beträgt er für die USA nur ca. 1,5 Mio. Fahrzeuge (ca. 10 %), für China hingegen ca. 9,4 Mio. (ca. 30 %). Im Vergleich sind die Absatzzahlen verbrennungsmotorisch betriebener PKW (inkl. aller Hybridvarianten) 2030 höher: In Europa werden ca. 12 Mio. Fahrzeuge verkauft, in den USA ca. 15 Mio. und in China ca. 22 Mio. (VDMA, 2018).

4.3 Szenariomodellierung für den europäischen PKW-Neuwagenmarkt bis 2030

Nach der Identifikation kritischer Stellgrößen, ihrer Ausprägungen und ihres Einflusses auf die Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge können die so gewonnenen Daten für die Simulation eigener konsistenter Markthochlaufszenarien verwendet werden. Diese Szenarien liefern die Basis für die Simulation der europaweiten PKW-Marktentwicklung und damit auch der Nachfrage nach neuen oder veränderten Komponenten sowie Umsatz- bzw. Kostenentwicklungen. Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 5 die Beschäftigungseffekte modelliert. Für die Simulation wird das am DLR entwickelte und verifizierte Fahrzeugszenariomodell VECTOR21 verwendet.

Exkurs: Methodik des VECTOR21-Neuwagen-Fahrzeugszenariomodells

Das Fahrzeugszenariomodell VECTOR21 ermöglicht die Simulation des Kaufverhaltens von Neuwagenkunden unter Berücksichtigung komplexer Rahmenbedingungen. Einerseits werden im Rahmen der Simulation Kundenprofile mit unterschiedlichen Eigenschaften (z. B. bei Jahresfahrleistung und Fahrzeuggröße) sowie jeweils konkreten Anforderungen an das Fahrzeug generiert. Dadurch können unterschiedliche Zahlungsbereitschaften, abhängig vom Kundentyp, simuliert und Käufe für umweltfreundliche Fahrzeuge mit höheren Kosten realisiert werden. Unter Kosten werden die Gesamtbesitzkosten verstanden, die sich aus den Anschaffungskosten sowie den Betriebskosten zusammensetzen (TCO – Total Cost of Ownership).

Andererseits werden in dem Modell Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten, -technologien und Treibstoffarten generiert und den Kunden angeboten. Dabei sind technologische und kostenseitige Entwicklungen der Fahrzeuge und einer Vielzahl von Komponenten berücksichtigt (z. B. Batteriesystem, Elektromotor, Leistungselektronik). Die Kaufentscheidung wird in einem modellierten Umfeld simuliert, das zum einen auf politischen Entscheidungen/Diskussionen (z. B. Kraftstoffbesteuerung oder CO_2-Flottengrenzwert) und zum anderen auf Angaben aus der Literatur (z. B. Entwicklung der Energiekosten, Ausbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur) basiert.

Dem Kunden wird unterstellt, dass er das Fahrzeug kauft, das seine Anforderungen an ein Fahrzeug sowie die notwendige Infrastruktur erfüllt und die für ihn hinsichtlich der Gesamtkosten günstigste Variante darstellt. Die Kunden sind zudem in Adoptergruppen eingeteilt, die Informationen über die Technologieoffenheit und finanzielle Zuzahlungsbereitschaft für umweltfreundliche Fahrzeuge bereitstellen.

Die im Modell hinterlegten Fahrzeuge unterscheiden sich nach Fahrzeugsegment sowie Antriebsstrangkonzept, folglich können jedem ein spezifischer Energieverbrauch sowie Kosten der verbauten Komponenten zugewiesen werden. Bei der zukünftigen Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs findet das Potenzial zur Verbesserung und Weiterentwicklung von Fahrzeugtechnologien Anwendung, wie z. B. Leichtbautechnologien oder auch Downsizing. Für die Ermittlung der Fahrzeug- und Komponentenkosten werden Kostenverläufe und eigene Kostenmodelle herangezogen.

© eigene Darstellung

Abbildung 49: Struktur des Fahrzeugszenariomodells VECTOR21

Zur Simulation jeweils eines moderaten (im Weiteren als „Business as usual" bezeichnet) und eines progressiven Szenarios wird in einem ersten Schritt das Rahmengerüst der Inputgrößen auf Basis der Metaanalyse definiert. Für beide Szenarien gelten dabei übereinstimmende Annahmen in Bezug auf die Entwicklung der Energiepreise (Öl, Benzin, Diesel, CNG [Compressed Natural Gas], Strom, Wasserstoff) sowie der Benzin-/Diesel- und CNG-Infrastrukturverfügbarkeit. Diese wurden als nicht kritische Stellgrößen bewertet und haben entsprechend weniger Einfluss auf die Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge als o. g. Einflussfaktoren.

Der Ölpreis für das Jahr 2030 basiert auf Analysen des Instituts für Wirtschaftsforschung (Berlemann et al., 2012) und wird für die Preisbestimmung von Benzin und Diesel verwendet. Hierfür wurde der Ölpreis von 2015 bis 2030 interpoliert und die Preise von Benzin und Diesel von 2005 bis 2016 wurden in Abhängigkeit von der tatsächlichen Ölpreisentwicklung ermittelt. Die so entstandenen Preisfunktionen ermöglichen die Berechnung der Kraftstoffpreise bis 2030. Für die Preisentwicklung von CNG, Wasserstoff und Strom werden die Kosten wie in Tabelle 10 aufgeführt verwendet. Die Tankstelleninfrastruktur für konventionelle Kraftstoffe ist flächendeckend zu 100 % verfügbar. Die Verfügbarkeit von CNG und Wasserstofftankstellen wird in den kommenden Jahren ausgebaut und erreicht die in Tabelle 10 beschriebenen Werte von 17 % und 20 % 2030. Die CO_2-Flottengrenzwerte sind bis 2020 für beide Szenarien entsprechend der bestehenden Gesetzgebung angesetzt, entwickeln sich dann bis 2030 aber unterschiedlich bis auf 67 g/km bzw. 50 g/km.

Das Fahrzeugangebot besteht bei beiden Szenarien aus insgesamt 24 Fahrzeugen und dazugehörigen Antriebssträngen, unterteilt in drei Fahrzeuggrößen (Kleinwagen, Mittelklasse und Oberklasse) sowie acht Antriebsstränge: konventionelle (Benzin und Diesel) und erdgasbetriebene Verbrennungsmotoren, Mild-Hybride, Full-Hybride, Plug-in-Hybride sowie rein batterieelektrisch betriebene und mit Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge. Die Fahrzeuge werden im Laufe der Jahre über technologische Weiterentwicklungen verbessert (z. B. Start-Stopp-Systeme, 48-Volt-Technik, variable Ventilsteuerung, Turboaufladung und Downsizing, optimierte Getriebe, verbesserte Aerodynamik und Leichtbaumaßnahmen, höhere Energiedichte der Batterien), wodurch der Energieverbrauch reduziert werden kann. Die Verteilung der Fahrzeuggrößen basiert auf dem Marktverhältnis von 2015 und wird für die folgenden Jahre konstant fortgeschrieben.

4.3.1 Rahmenbedingungen für DLR-VECTOR21-Szenarien

Annahmen DLR-VECTOR21-Szenario „Business as usual"
Das Business-as-usual-Szenario bildet die Fortschreibung derzeitiger Regularien und moderate technische Weiterentwicklungen nach. Demnach wird der CO_2-Flottengrenzwert nach den Plänen der Europäischen Kommission für 2030 auf ca. 67 g/km verschärft (Europäische Kommission, 2017). Der Ausbau der Infrastruktur verläuft in moderater Geschwindigkeit, sodass eine ca. 60 %ige Abdeckung erzielt werden kann. Aufgrund noch nicht ausgebauter Produktionskapazitäten ist die angebotsseitige Verfügbarkeit von BEV bis 2020 auf 475.000 begrenzt, wächst allerdings bis 2030 auf 2.200.000 pro Jahr an.

Annahmen DLR-VECTOR21-Szenario „progressiv"
Das progressive Szenario verschärft die Fortschreibung bestehender Regularien und geht von schnellerem technologischen Fortschritt aus. Ein Treiber für das erhöhte Wachstum der Elektromobilität ist die signifikante Verschärfung des CO_2-Grenzwerts auf 50 g/km bis 2030. Zeitgleich wird das bestehende Ladeinfrastrukturnetz stärker und schneller ausgebaut, sodass bis 2030 eine 75 %ige Flächenabdeckung erzielt werden kann. In diesem Zuge werden die Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeuge erhöht und für einen Massenmarkt vorbereitet. Dadurch sind 2020 bereits bis zu 500.000 Elektrofahrzeuge verfügbar, 2030 stehen theoretische Kapazitäten von über 8.500.000 zur Verfügung. Diese Summe entspricht in etwa der Kapazität von 14 Gigafactories. Bei der Berechnung wird von der derzeit in den USA aufgebauten Tesla-Gigafactory ausgegangen, die mit Fertigstellung eine jährliche Produktionskapazität von 35 GWh ermöglichen soll (Tesla, 2018).

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die definierten Inputgrößen für die Berechnung mit dem VECTOR21-Szenariomodell.

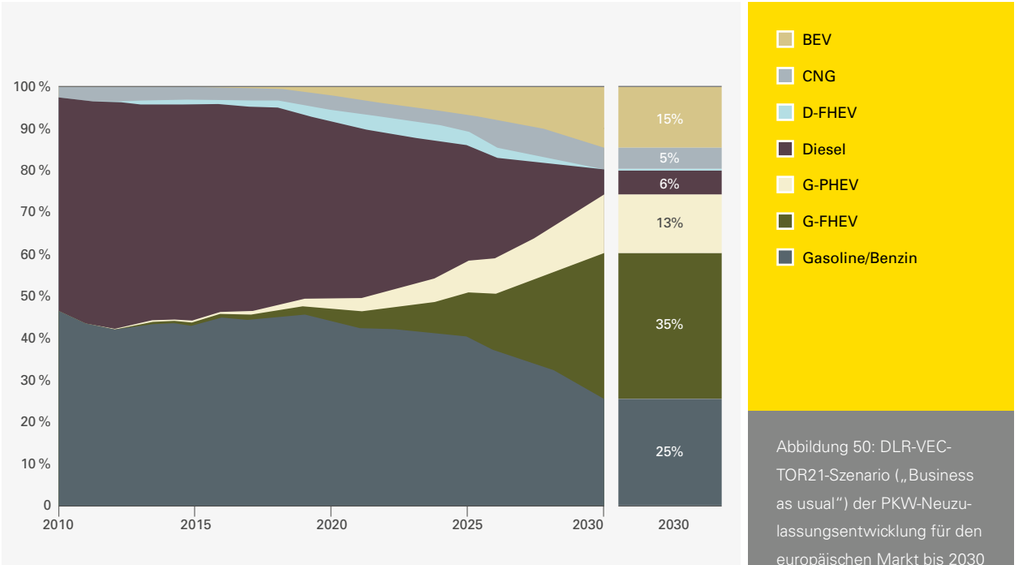
	Parameter	Einheit	2010	2015	2020	2030	Quelle
Energiepreise	Ölpreis	€/bl	59,5	67,2	74,9	90,3	(Berlemann et al., 2012)
	Benzinpreis	€/l	1,41	1,46	1,52	1,63	Eigene Berechnung
	Dieselpreis	€/l	1,24	1,30	1,37	1,50	Eigene Berechnung
	CNG-Preis	€/kg	0,94	1,11	2,06	2,17	(IEA, 2011)
	Strompreis	€/kWh	0,25	0,26	0,27	0,26	(BMUB, 2012)
	H_2-Preis	€/kg	19,8	11,8	7,9	6,0	(McKinsey & Company, 2010)
Infrastruktur-verfügbarkeit	Benzin-/Dieseltankstellen	%	100	100	100	100	Modellannahme
	CNG-Tankstellen	%	7	8	10	17	Modellannahme
	H_2-Tankstellen	%	0	0	3	20	Modellannahme
Business-as-usual-Szenario	Elektro-Ladestationen	%	0	5	31	58	Modellannahme
	Maximale BEV-Produktion	Stk./a	0	12.000	115.000	550.000	Modellannahme
	CO_2-Flottengrenzwert	g/km	–	130	95	67	(EU, 2009)
Progressives Szenario	Elektro-Ladestationen	%	0	5	35	75	Modellannahme
	Maximale BEV-Produktion	Stk./a	0	12.000	120.000	2.200.000	Modellannahme
	CO_2-Flottengrenzwert	g/km	–	130	95	50	Modellannahme

© eigene Darstellung

Tabelle 10: Übersicht der Rahmenparameter für die Erstellung der Szenarien (hier beispielhaft für Deutschland)

4.3.2 Entwicklung des Markthochlaufs – „Business as usual“

Abbildung 50 illustriert, wie sich die Marktanteile der einzelnen Antriebskonzepte von 2010 bis 2030 unter den definierten, moderat in die Zukunft fortgeschriebenen Rahmenbedingungen entwickeln.



© eigene Berechnung

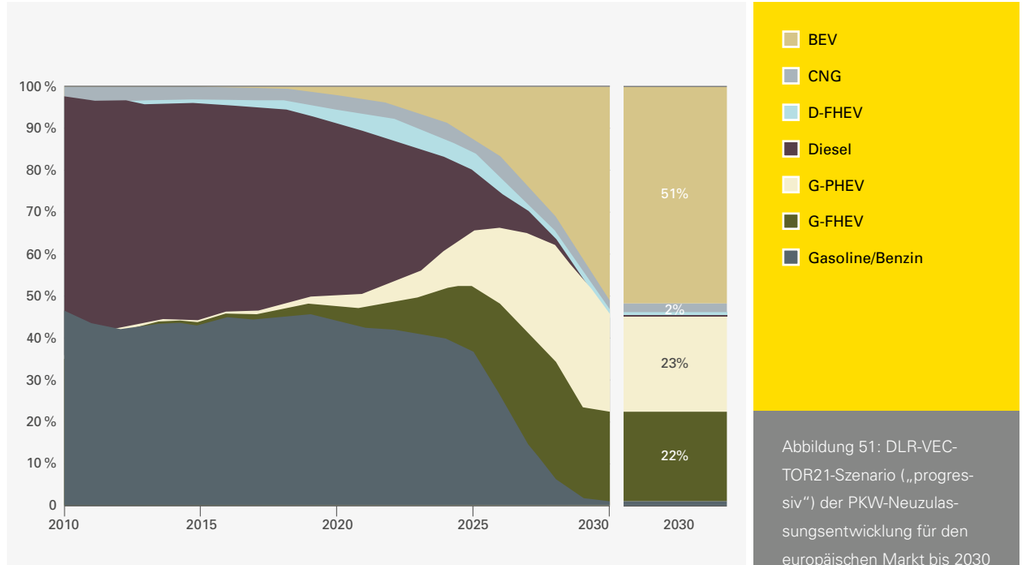
Abbildung 50: DLR-VEC-TOR21-Szenario („Business as usual“) der PKW-Neuzulassungsentwicklung für den europäischen Markt bis 2030

Zu erkennen ist, dass bis zum Jahr 2020 auf dem europäischen PKW-Markt die konventionellen Antriebsarten nach wie vor dominieren, wobei die Dieselanteile kontinuierlich abnehmen und Schritt für Schritt durch benzinbetriebene Fahrzeuge ersetzt werden. Bei den konventionellen Fahrzeugen entwickelt sich eine Verschiebung zur Mikrohybridisierung, sodass 2020 schon mehr als 75 % der PKW-Neufahrzeuge mit (z. T. aber noch geringfügig) elektrifizierten Komponenten ausgestattet sind. Dieser Anteil steigt bis 2025 weiter auf über 85 % und erreicht 2030 100 %. Der ICE efficient mit stärker elektrifizierten Nebenaggregaten und 48-Volt-System tritt 2020 in den Volumenmarkt ein und erreicht 2030 rund 7 % der Neuzulassungsanteile. Der Übergang zu noch intensiver elektrifizierten Antriebssträngen steht hier in direkter Konkurrenz und wird von den Kunden insbesondere ab 2025 bevorzugt. Dies bildet sich in den steigenden Anteilen der Full-Hybrid-Fahrzeuge ab (G-FHEV/D-FHEV). Der Anteil der rein batterieelektrischen Fahrzeuge steigt 2015–2020 von 0,2 % auf 2,5 % und bis 2025 dann bis auf 7 %. Der PHEV hat im Business-as-usual-Szenario einen ähnlichen Markthochlauf wie der BEV. Zusammen erreichen sie 2030 einen Marktanteil von rund 28 %. Erdgasfahrzeuge nehmen besonders in Südeuropa ab 2025 zu, um so der CO_2-Gesetzgebung gerecht zu werden. Dies führt zu einem Anstieg auch im gesamteuropäischen PKW-Neuwagenmarkt. Die konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeuge haben im Jahr 2030 noch einen Marktanteil von 67 %, davon sind 60 % mit Benzin betrieben (inkl. G-HEV). Die Brennstoffzelle setzt sich bei reiner Betrachtung des PKW-Markts gegen die anderen Antriebskonzepte bis 2030 nicht durch.

Mit Blick auf die Ergebnisse der vorhergehenden Metaanalyse lässt sich das Ergebnis der VECTOR21-Simulation im Business-as-usual-Szenario für den Markthochlauf von PHEV und BEV als optimistischer einordnen. Während 2030 der PHEV nur knapp über dem oberen Mittelwertpunkt der Metaanalyse rangiert, orientiert sich das batterieelektrische Fahrzeug an den dort dargestellten Extremwerten.

4.3.3 Entwicklung des Markthochlaufs – „progressiv“

Für das progressive Szenario stellt Abbildung 51 die Entwicklung der europäischen PKW-Marktanteile dar.



© eigene Berechnung

Abbildung 51: DLR-VEC-TOR21-Szenario („progressiv“) der PKW-Neuzulassungsentwicklung für den europäischen Markt bis 2030

Bis zum Jahr 2020 ist die Entwicklung hier identisch zum Business-as-usual-Szenario, erst dann greifen die verschärfte Entwicklung der CO_2-Flottengrenzwerte sowie eine angebotsseitige schnellere technologische Entwicklung der elektrifizierten Komponenten. Die Diesel-PKW-Marktanteile sinken ab 2020 kontinuierlich, sodass diese Fahrzeuge bis 2030 fast komplett (1 %) aus dem Neuwagenmarkt verdrängt werden. Beim ICE efficient kann bereits 2020 ein Anteil von über 8 % verzeichnet werden. Dieser steigt bis auf 12 % im Jahr 2025, wird dann aber bis 2030 relativ schnell von den höher elektrifizierten Fahrzeugen (Full-Hybrid, Plug-in-Hybrid) aus dem Markt verdrängt. Dieser Marktrückgang betrifft im progressiven Szenario ab 2025 sämtliche Benziner-Varianten, sogar den Full-Hybrid. Ab diesem Zeitpunkt baut der PHEV seinen Marktanteil in Europa aus und erreicht bis 2029 über 31 % Marktanteil. Innerhalb des Folgejahres aber sinkt dieser aufgrund eines höheren BEV-Anteils wieder auf 23 %. Das batterieelektrische Fahrzeug übernimmt ab 2020 kontinuierlich Marktanteile vom Diesel und erreicht 2025 ca. 11 %. Dieser Anteil wächst dann rasant weiter an, sodass 2030 insgesamt 51 % Neuzulassungsanteil erreicht ist. Im progressiven Szenario ist der Anteil damit um rund 37 % höher als im Business-as-usual-Szenario.

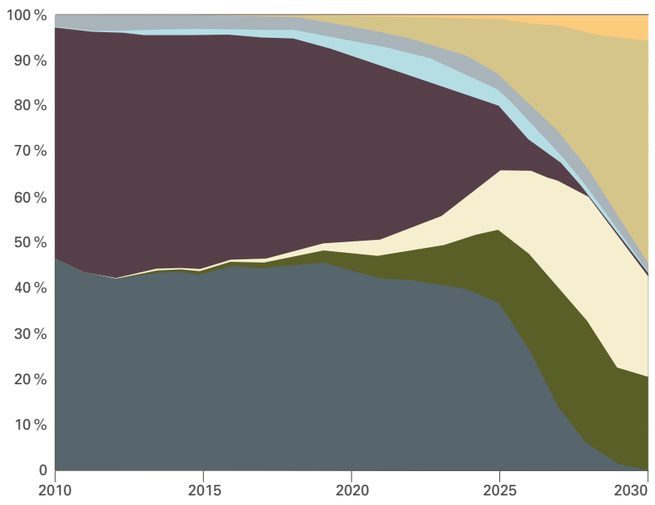
Im Hinblick auf die in der Metaanalyse untersuchten Daten zu progressiven Szenarien entwickelt sich das mit dem VECTOR21-Modell erstellte Szenario schneller hin zu hochelektrifizierten Antriebskonzepten. Die Entwicklung der PHEV ist ungefähr im Mittelwert der Metaanalyse einzuordnen. BEV entwickeln sich ab 2020 deutlich progressiver als das Peloton der Datenpunkte, wenngleich die berechneten Ergebnisse nicht an die obersten Extremwerte stoßen.

4.3.4 Exkurs: Sensitivitätsszenario mit progressiver Entwicklung der Brennstoffzelle

Aufbauend auf dem progressiven Szenario soll dieser Exkurs noch einen Schritt weitergehen und auch den Eintritt von FCEV in den europäischen PKW-Neuwagenmarkt simulieren. Als Rahmengerüst für das FCEV-Szenario wird auf die vorher genannten progressiven Stellgrößen zurückgegriffen, zusätzlich aber angenommen, dass sich aufgrund von Entwicklungen in anderen Sektoren (z. B. im Nutzfahrzeugbereich) die Rahmenbedingungen für eine technologische und kostenseitige Entwicklung des Brennstoffzellensystems selbst sowie auch der Wasserstoffinfrastruktur-Verfügbarkeit verbessern.

So wird die H_2-Infrastruktur in diesem Szenario stark ausgebaut: 2020 erreicht sie eine Flächenabdeckung von 5 %, 2030 werden 30 % erzielt. Der Ausbau hat direkte Auswirkungen auf das Nutzfahrzeugsegment, wobei v. a. leichte Nutzfahrzeuge davon profitieren und sich ab 2025 im Markt etablieren. Diese treiben wiederum den technologischen Fortschritt und führen über steigende Produktionsstückzahlen zu sinkenden Herstellkosten. Für die NFZ-Flottenbetreiber bietet die Brennstoffzellentechnologie sowohl eine hohe Reichweite mit geringen Betankungszeiten als auch vorteilhafte Betriebskosten, die eine relativ schnelle Amortisation der Investition ermöglichen. Mit diesem Spill-over-Effekt sinken die Brennstoffzellensystemkosten 2025 auf rund 60 Euro/kW.

Das Ergebnis der Simulation mit dem DLR-VECTOR21-Modell ist in Abbildung 52 dargestellt und ähnelt dem Ergebnis der progressiven Entwicklung. FCEV treten 2019 langsam auch in den PKW-Neuwagenmarkt ein. Dieser Anteil wächst bis 2025 auf rund 0,8 % an. Mit dem Markteintritt wird eine weitere Rückkopplung erzeugt, die sich positiv auf die Systemkosten auswirkt, die bis 2030 auf unter 50 Euro/kW sinken. Der Marktanteil brennstoffzellenbetriebener PKW steigt insbesondere durch diese Kostenentwicklung auf über 5,5 % der europäischen Neuzulassungen. Der FCEV-Marktanteil wird zu großen Teilen mit Verlusten beim BEV begleitet, zu kleinen Teilen auch bei anderen Antriebssträngen wie dem Diesel.

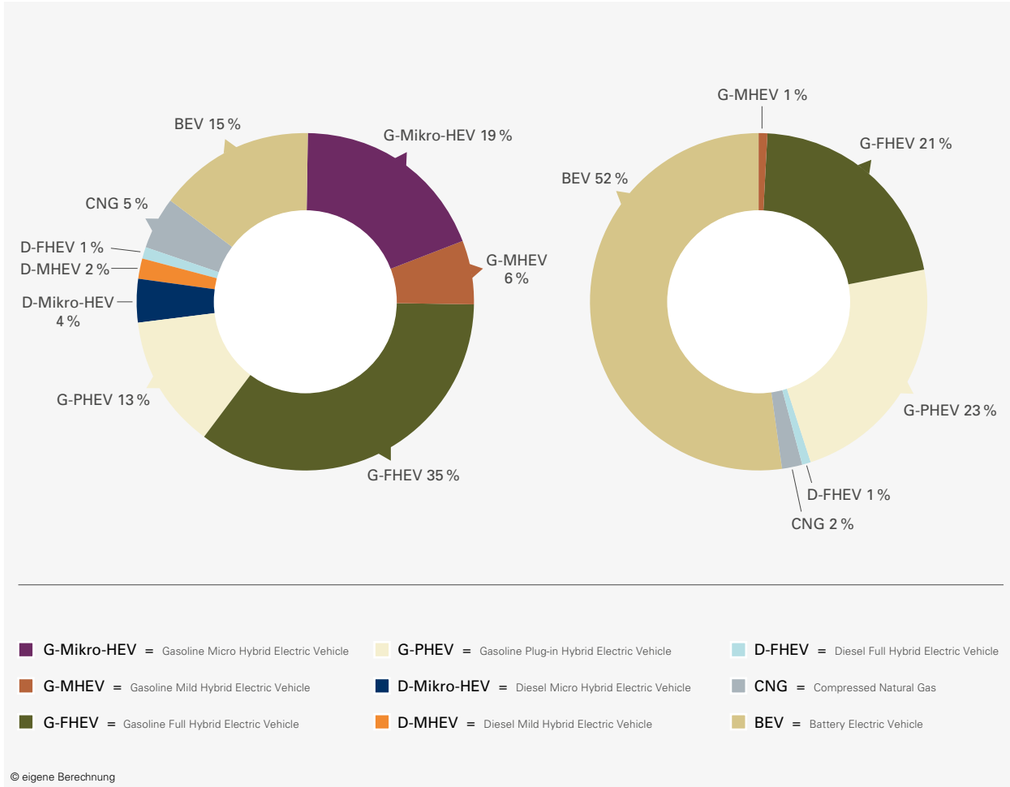


© eigene Berechnung

Abbildung 52: Brennstoffzellengetriebenes DLR-VECTOR21-Szenario der PKW-Neuzulassungsentwicklung für den europäischen Markt bis 2030

4.3.5 Ökonomische Auswirkungen des Markthochlaufs

Auf die Produktionsstückzahlen: Mit Blick auf das Business-as-usual- und das progressive Szenario wird deutlich, dass sich der Markteintritt elektrifizierter Antriebsstränge in das Volumensegment relativ zeitnah durchsetzen wird. 2025 sind nur noch rund 10 % („Business as usual") und 9 % („progressiv") der PKW-Neuzulassungen komplett ohne elektrische Komponenten ausgestattet. Alle anderen Antriebsvarianten besitzen zu diesem Zeitpunkt schon elektrifizierte Komponenten, z. B. Start-Stopp-Systeme, elektrifizierte Nebenaggregate oder 48-Volt-Systeme. 2030 sind dann in jedem neu verkauften PKW höher elektrifizierte Komponenten verbaut (siehe Abbildung 53). Auffällig ist vor allem der hohe Anteil an Mikro-Hybrid-Fahrzeugen im Business-as-usual-Szenario mit fast 25 %. Das 48-Volt-System, verbaut im Mild-Hybrid (MHEV), hat im Vergleich dazu nach einer Steigerung bis 2025 im Jahr 2030 deutlich weniger Anteil (9 %), da sich ein relativ schneller Übergang zur höher elektrifizierten Variante des Full-Hybrids (FHEV) vollziehen wird. Beim progressiven Szenario überwiegt, wie in Abbildung 53 deutlich erkennbar, das batterieelektrische Fahrzeug mit 52 % Anteil an den Neuzulassungen 2030. Der Voll- und v. a. der Plug-in-Hybrid (PHEV) setzen sich bis zu diesem Jahr fast vollständig gegen die weniger elektrifizierten Varianten durch. Im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario gewinnt der PHEV nochmals 10 % Verkaufsanteil, wobei diese unmittelbar negativ auf die Neuzulassungen des FHEV wirken.



© eigene Berechnung

Abbildung 53: PKW-Neuzulassungsanteile für den europäischen Markt im Jahr 2030 für das Business-as-usual- (links) und das progressive (rechts) Szenario

	Komponenten	2010	2015	2020	2025	2030
Business-as-usual-Szenario	Verbrennungsmotor	14,14	14,61	15,08	14,22	12,84
	Elektromotor, Leistungselektronik	–	0,34	1,66	4,41	10,12
	Hochenergiebatterie	–	0,05	0,73	2,24	4,47
	Hochleistungsbatterie	–	0,28	1,24	3,40	6,02
Progressives Szenario	Verbrennungsmotor	14,14	14,61	15,08	13,42	7,40
	Elektromotor, Leistungselektronik	–	0,35	2,14	7,80	15,47
	Hochenergiebatterie	–	0,05	0,73	4,04	11,92
	Hochleistungsbatterie	–	0,29	1,41	3,76	3,54

© eigene Berechnung

Tabelle 11: Stückzahlentwicklung relevanter Komponenten (in Mio. Stück)

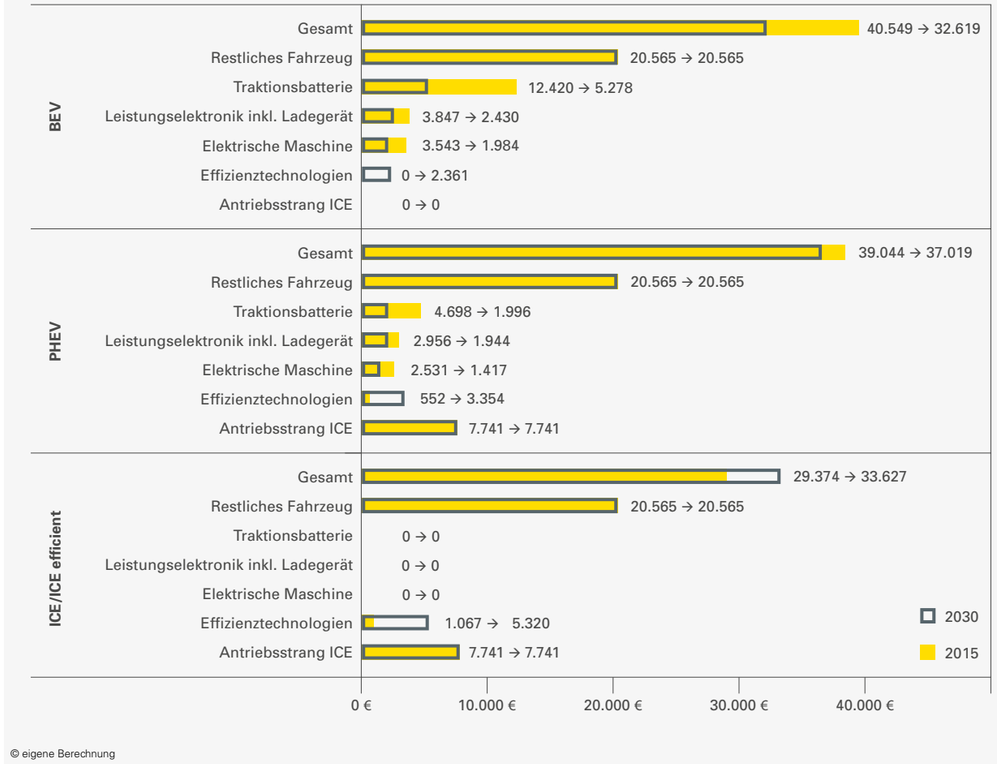
2030 sind also alle PKW-Neuzulassungen zumindest teilelektrifiziert. Auch im Business-as-usual-Szenario werden 2030 bereits ca. 15 % der PKW gänzlich ohne Verbrennungsmotor verkauft. Entsprechend ändern sich auch die Wertschöpfungsanteile am Fahrzeug über die Jahre immer stärker in Richtung der elektrifizierten Komponenten. Auch die Nachfrage nach Hochenergiebatterien steigt bis 2030 stark an, sodass 82 % der in diesem Jahr verkauften PKW mit dieser Komponente ausgestattet sind. Tabelle 11 gibt eine Übersicht über die Produktionsstückzahlentwicklung relevanter Komponenten in beiden Szenarien.

Abbildung 54 illustriert exemplarische Kostenentwicklungen (netto) für Mittelklassefahrzeuge mit den Antriebssträngen ICE, PHEV und BEV im progressiven Szenario im Vergleich der Jahre 2015 und 2030. Besonders auffällig ist die Entwicklung der Gesamtkosten zwischen ICE und BEV: Während 2015 das konventionelle ICE-Fahrzeug noch einen direkten Kostenvorteil von über 10.000 Euro aufweist, liegen die reinen Anschaffungskosten 2030 rund 1.000 Euro höher. Dies liegt unter anderem an den steigenden Kosten für Effizienztechnologien, die beim ICE zur Einhaltung gesetzlicher Emissionsgrenzwerte notwendig sind und gleichzeitig zu einer deutlichen Verbrauchsreduktion führen. Die Techniken reichen von Leichtbaupaketen über Downsizing und rollwiderstandsverbesserten Reifen bis hin zur Elektrifizierung von Neben- und Hilfsaggregaten (ICE efficient). Dadurch kann im Rahmen dieser Studie beim optimierten Verbrennungsmotorfahrzeug ein CO_2-Reduktionspotenzial zwischen 40 und 50 % bis 2030 errechnet werden.

Ausschlaggebend für die Kostenentwicklung beim BEV sind insbesondere die sinkenden Batteriekosten, die im untersuchten Zeitraum um mehr als 50 % abnehmen. Das liegt hauptsächlich an den bei progressiver Entwicklung wirkenden Skaleneffekten durch hohe Produktionsvolumina, aber auch an technologischen Verbesserungen und Weiterentwicklungen in der Zellchemie der Batterie selbst. Außer bei den Batteriesystemen kommt es bei der Leistungselektronik und dem Elektromotor zu weiteren Kostenreduktionen, allerdings mit weit geringeren absoluten Auswirkungen auf den Kaufpreis. Diese Kostenreduktionen werden zudem auch beim BEV durch den Einsatz weiterer Effizienztechnologien bis 2030 (über)kompensiert.

4.4 Szenariomodellierung für den europäischen PKW-Flottenbestand bis 2030

Nach der Modellierung des europäischen PKW-Neuwagenmarktes und der dazugehörigen Analyse der Nachfrage nach neuen oder veränderten Komponenten sowie Umsatz- bzw. Kostenentwicklungen soll im Folgenden die Entwicklung des PKW-Flottenbestandes betrachtet werden. Hierbei ist insbesondere die Dynamik der Flottenumwälzung ausschlaggebend – und damit die Frage, wie schnell neue und gegebenenfalls effizientere Antriebsstränge eine Reduktion des Energieverbrauches und der CO_2-Emissionen erzielen können. 2016 lag das durchschnittliche PKW-Alter in Europa bei rund elf Jahren (ACEA, 2018), sodass jährlich rund 9 % der europäischen PKW-Flotte durch neue Fahrzeuge ersetzt werden.



© eigene Berechnung

Abbildung 54: Exemplarische Kostenentwicklung (netto) verschiedener Mittelklasse-Fahrzeugkonzepte bis 2030

Exkurs: Methodik des VECTOR21-Bestand-Fahrzeugszenariomodells

Das Fahrzeugszenariomodell VECTOR21 ermöglicht ergänzend zu den Simulationen des Kaufverhaltens von Neuwagenkunden unter Berücksichtigung komplexer Rahmenbedingungen die Darstellung der resultierenden PKW-Flottenentwicklung. Basis des Modells sind statistische Bestandsdaten bis 2010 für den europäischen Gesamtmarkt sowie die einzelnen europäischen Länder. Ab 2010 wird die Bestandsentwicklung modelliert, indem die jährlich neu verkauften PKW in die Flotte eintreten und gleichzeitig alte Fahrzeuge ausscheiden. Hierfür werden fahrzeugklassenspezifische Überlebenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Fahrzeugalter und Fahrleistung genutzt. Der korrespondierende Energiebedarf der PKW-Flotte ermöglicht die Berechnung der CO_2-Emissionen sowohl Tank-to-Wheel (TtW) als auch Well-to-Wheel (WtW). Tank-to-Wheel (von der Tanksäule bis zum Rad) bezeichnet den Energiebedarf des Fahrzeugs, der die Wirkungskette von aufgenommener Energie an der Tanksäule bis zur Umwandlung in kinetische Energie am Rad umfasst. Well-to-Wheel (von der Quelle bis zum Rad) ergänzt diese Betrachtung um den Energiebedarf, der für die Gewinnung und Bereitstellung der Energie an die Tanksäule notwendig ist. Im Sinne einer Lebenszyklusbetrachtung ist diese Perspektive umfassender.

4.4.1 Rahmenbedingungen für DLR-VECTOR21-Bestandsentwicklungen

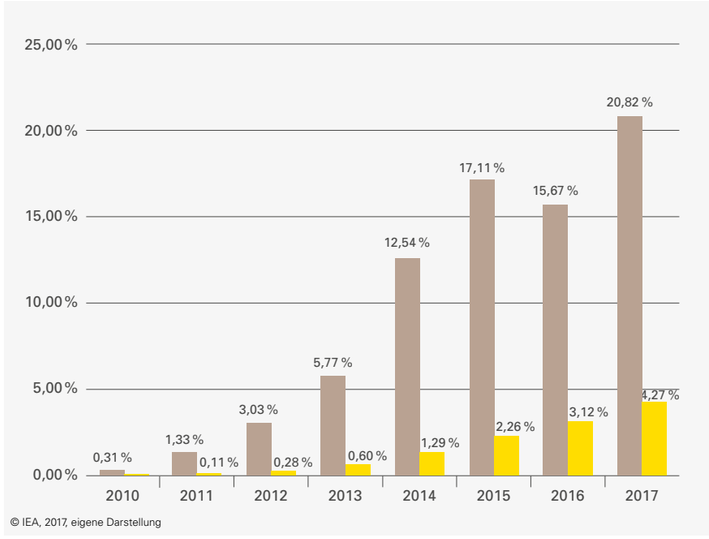
Für die Modellierung des europäischen PKW-Flottenbestandes bis 2030 werden die beiden oben beschriebenen Neuwagenmarktszenarien „Business as usual" und „progressiv" in das Bestandsmodell des DLR-VECTOR21-Fahrzeugszenariomodells überführt. Die Annahmen und Prämissen für die einzelnen europäischen PKW-Neuwagenmärkte führen wie beschrieben zu individuellen Entwicklungen der Verkaufszahlen, die dann in unterschiedlichen Marktanteilen je Antriebsstrangkonfiguration und Jahr münden. Bis 2030 tritt also jedes Jahr eine unterschiedliche Anzahl konventioneller, hybridisierter und elektrifizierter Fahrzeuge in die jeweiligen europäischen Neuwagenmärkte – und damit auch in die jeweils bestehenden PKW-Flotten – ein. Dieser Eintritt neuer Fahrzeuge wird im Modell ergänzt um den Austritt älterer Fahrzeuge aus dem Bestand, sodass nach und nach eine Umwälzung stattfindet. Die Modellierung der Flottenzusammensetzung und die korrespondierende Energiebedarfsberechnung unterliegen zusammengefasst folgenden grundlegenden Annahmen und Prämissen.

- **Fahrzeugalter:** 2016 betrug über alle europäischen Länder hinweg das Fahrzeugalter vor Austritt aus dem Markt im Schnitt 10,9 Jahre, wobei teilweise große Unterschiede zwischen den Ländern bestehen. In Polen waren beispielsweise mit Abstand die ältesten PKW im Bestand (17 Jahre), in Deutschland beträgt das durchschnittliche PKW-Alter 9,1 Jahre. Obwohl derzeitige Trends in Europa insgesamt auf eine in Zukunft möglicherweise längere Nutzungsdauer von PKW hinweisen, wird aus modelltechnischen Gründen für die nachfolgende Simulation von einer gegenüber 2016 gleichbleibenden Austrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ACEA, 2018).

- **Fahrleistung:** Die jährlichen Fahrleistungen in Deutschland und den weiteren europäischen Ländern unterliegen zum Teil starken Schwankungen und sind – ohne umfassende wissenschaftliche Untersuchungen – nicht fundiert in die Zukunft zu überführen. Sie sind abhängig von einer Vielzahl nutzerspezifischer Variablen (z. B. Alter, Mobilitätsverhalten), aber auch automobil- und gesamtwirtschaftlicher Einflüsse (z. B. Transportaufgaben, Bruttoinlandsprodukt oder Wirtschaftswachstum). In Deutschland stieg die jährliche Gesamtfahrleistung aller PKW in den letzten Jahren an und rangierte 2017 mit 630,5 Mrd. Kilometern 0,8 % höher als im Vorjahr. Die durchschnittliche Fahrleistung des Einzelfahrzeugs pro Jahr sank hingegen um 0,7 % auf 13.922 km (KBA, 2018). Im Rahmen der folgenden Berechnungen wird eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von 14.000 km übernommen und statisch in die Zukunft geschrieben.

- **Fahrzeuggröße/Fahrzeugklasse:** Der Trend zu immer größeren und damit oft auch schwereren Fahrzeugen ist sowohl in Deutschland als auch europaweit zu erkennen. Insbesondere SUV konnten in den letzten Jahren große Anteile am Neuwagenmarkt gewinnen, sodass eine Verschiebung innerhalb der Fahrzeugsegmente zu beobachten ist. Insgesamt nahm der prozentuale Anteil des mittleren Fahrzeugsegments („Mittelklasse") zugunsten des größeren Segments („Oberklasse") ab. Gleichzeitig konnten auch kleinere Fahrzeuge Marktanteile innerhalb der Segmentverteilung gewinnen. Die Fortschreibung dieses Trends ist jedoch ebenfalls nicht wissenschaftlich gesichert und von markt- und nutzerspezifischen Präferenzen abhängig, sodass eine dynamische Fortschreibung des Trends in die weitere Zukunft wissenschaftlich nicht gesichert ist. Im Rahmen der PKW-Flottenmodellierung wird deshalb die statistisch vorliegende Segmentverteilung zwischen 2010 und 2017 übernommen und für die folgenden Jahre auf dem Niveau von 2017 fortgeschrieben.

Ein Beispiel, das die Trägheit im Vergleich von PKW-Neuwagenmarkt und PKW-Flottenbestand verdeutlicht, ist Norwegen. Während hier die Anteile verkaufter elektrifizierter Fahrzeuge seit 2010 jedes Jahr wachsen und weit über dem europäischen Durchschnitt liegen, 2017 sogar einen Anteil über 20 % erreichen, wächst der Bestand der Fahrzeuge in der gesamten PKW-Flotte des Landes trotzdem nur langsam und mit zeitlicher Verzögerung an. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Trägheit.

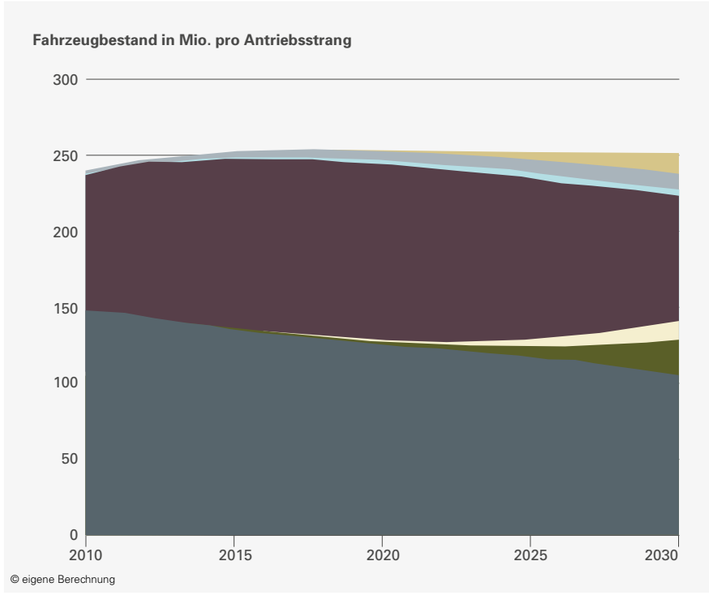


© IEA, 2017, eigene Darstellung

Abbildung 55: Entwicklung der Anteile von PKW-Neuzulassungen (braun) und des PKW-Flottenbestands in Norwegen für reine E-Fahrzeuge (BEV) 2010–2017

4.4.2 Entwicklung des PKW-Flottenbestands – „Business as usual"

Abbildung 56 illustriert, wie sich der gesamte Bestand der einzelnen Antriebskonzepte – also die absolute Anzahl der PKW auf der Straße – in Europa von 2010 bis 2030 unter den Annahmen des moderaten Business-as-usual-Szenarios (BAU-Szenario) entwickelt.



© eigene Berechnung

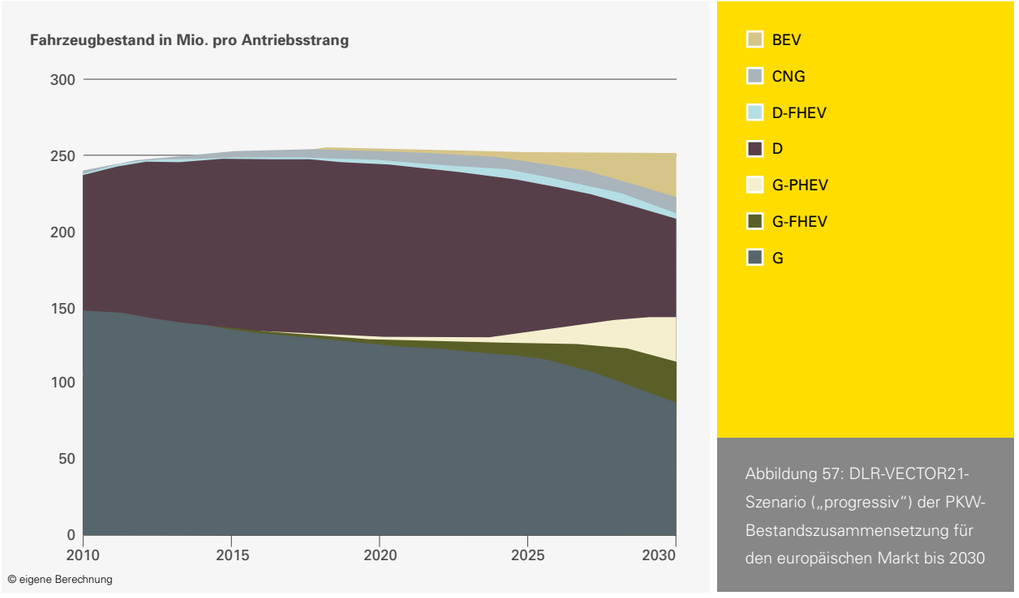
Abbildung 56: DLR-VECTOR21-Szenario („Business as usual") der PKW-Bestandszusammensetzung für den europäischen Markt bis 2030

Zu erkennen ist, dass der europäische Bestand bis zum Jahr 2030 nach wie vor durch konventionelle Antriebe dominiert wird. Anders als im Neuwagenmarkt benötigen alternative Antriebsarten im Flottenbestand signifikant mehr Zeit, um einen höheren Anteil zu erlangen. In absoluten Zahlen fahren in Europa im Jahr 2020 über 750.000 BEV, wobei der deutsche Bestand davon einen Anteil von rund 20 % einnimmt. Bereits fünf Jahre später hat sich der BEV-Bestand auf über 4,1 Mio. rein elektrische Fahrzeuge mehr als verfünffacht. 2030 wächst der Bestand weiter an auf rund 12,2 Mio. BEV, zudem sind zu diesem Zeitpunkt bereits 12,4 Mio. Plug-in-Hybridfahrzeuge und 24,2 Mio. weitere Benzin-Hybride (Mild- und Full-Hybrid) auf den europäischen Straßen. Auffällig ist zudem ein rückläufiger relativer Anteil deutscher BEV im europäischen Bestand auf nur noch 17 % im Jahr 2030. Eine mögliche Erläuterung dafür sind die gesunkenen Anschaffungspreise, die dazu führen, dass in mehr europäischen Ländern BEV gekauft werden und somit der deutsche Anteil am europäischen Bestand sinkt. Obwohl 2030 nur 9,8 % des Bestands aus BEV und G-PHEV bestehen, ist eine Tendenz erkennbar, bei der die konventionellen Antriebsarten fortlaufend ersetzt werden. Dies ist besonders bei den Dieselfahrzeugen erkennbar, die zwischen 2025 und 2030 insgesamt 9 % Anteil am europäischen Bestand verlieren. Über zwei Drittel dieses Anteils werden in BEV und PHEV überführt. 2030 sind in diesem Szenario aber nach wie vor noch über 105 Mio. konventionelle Benzin- und ca. 82 Mio. Dieselfahrzeuge im europäischen Flottenbestand.

4.4.3 Entwicklung des PKW-Flottenbestands – „progressiv“

Für das progressive Szenario stellt Abbildung 57 die Entwicklung der europäischen PKW-Flotte dar.

Wie in den Neuwagenszenarien sind im Vergleich von Business-as-usual- und progressivem Szenario bis 2020 kaum Unterschiede zu erkennen. Der ab dann im progressiven Szenario jedoch stärker rückläufige Diesel-Neuwagenmarkt führt in Europa bis 2025 und 2030 zu einem schnelleren Rückgang der Dieselfahrzeuge im Bestand. Er wird wie im Business-as-usual-Szenario vor allem von Elektrofahrzeugen ausgeglichen, sodass 2025 in Europa rund 5,8 Mio. BEV angemeldet sind, wovon 18,5 % auf den deutschen Bestand entfallen. Fünf Jahre später vervielfacht sich der europäische BEV-Bestand und umfasst über 29 Mio. rein elektrische Fahrzeuge. Die Plug-in-Hybridfahrzeuge liegen mit 28 Mio. knapp unter den rein batterieelektrisch betriebenen PKW. Zusammen nehmen die beiden hochelektrifizierten Antriebskonzepte knapp 23 % im Bestand ein. Im Vergleich dazu dominieren



© eigene Berechnung

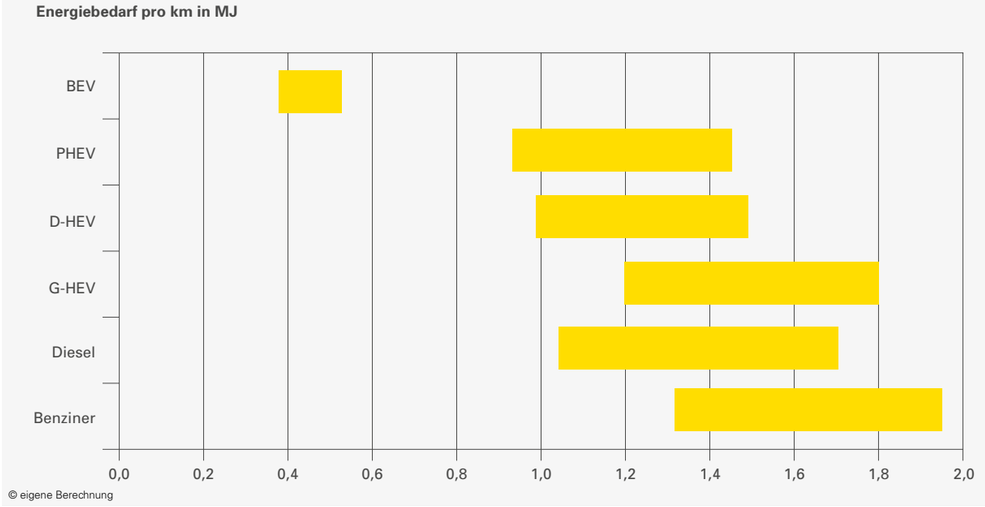
Abbildung 57: DLR-VECTOR21-Szenario („progressiv“) der PKW-Bestandszusammensetzung für den europäischen Markt bis 2030

auch im progressiven Szenario weiterhin die rein benzinbetriebenen PKW mit 88 Mio. (35 %), wobei ein stärkerer Abwärtstrend erkennbar ist. Dieselbetriebene Fahrzeuge kommen im progressiven Szenario 2030 auf noch ca. 65 Mio. Stück im Bestand.

4.4.4 Ökologische Auswirkungen der Flottenentwicklung

Durch den spezifischen Energiebedarf der Fahrzeuge: Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die im Szenariomodell angebotenen Fahrzeuge kontinuierliche technologische Verbesserungen zugrunde gelegt, die sie effizienter und sparsamer machen. Abbildung 58 gibt einen Überblick über die technologischen Entwicklungspfade und die resultierenden spezifischen Energieverbräuche je Antriebsstrang. Die rechte Seite des Balkens entspricht dem durchschnittlichen WLTP-Verbrauch eines Mittelklassefahrzeugs im Jahr 2015, die linke Seite stellt den potenziellen Energiebedarf pro km für 2030 dar. Durch technologische Verbesserungen (z. B. Leichtbautechnologien, effizientere Verbrennung, Elektrifizierung) kann der Verbrauch teilweise signifikant reduziert werden. Das gesamte Potenzial zur Verbrauchsreduktion unter für Automobilhersteller und Kunden wirtschaftlich und technologisch sinnvollen Gesichtspunkten wird somit durch die Breite der einzelnen Balken dargestellt. Ein konventionelles Benzinfahrzeug hat 2015 noch durchschnittlich knapp über 6 Liter je 100 km im WLTP verbraucht, 2030 braucht es nur noch rund 4 Liter je 100 km. Das batterieelektrische Fahrzeug benötigt im Vergleich zu den verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugen generell signifikant weniger Energie. Dies liegt vor allem an den hohen Wirkungsgraden des elektrischen Antriebsstrangs. Gleichzeitig sind so auch die Potenziale zur weiteren Effizienzsteigerung entsprechend geringer.

Auf den absoluten Energiebedarf der PKW-Flotte: In den folgenden beiden Abbildungen wird die Entwicklung des Energiebedarfs für die europäische PKW-Flotte im Business-as-usual- und im progressiven Szenario dargestellt. In der Modellrechnung befindet sich der Energiebedarf im PKW-Sektor bei beiden Szenarien anfänglich auf einem nahezu gleichen Niveau, das dann aufgrund des Einsatzes von Effizienztechnologien im Antriebsstrang sowie einer langsamen Umwälzung der Flotte durch energieeffizientere und (zuerst leicht) elektrifizierte Fahrzeuge beginnt abzusinken. Aufgrund einer im Modell statisch vorgegebenen jährlichen Fahrleistung wirken beide Faktoren vollumfänglich auf den Gesamtenergiebedarf der Fahrzeugflotte, sodass deren direkte theoretische



© eigene Berechnung

Abbildung 58: Energiebedarfsentwicklungspfade für unterschiedliche Antriebsarten von Mittelklassefahrzeugen zwischen 2015 (rechter Rand des Balkens) und 2030 (linker Rand des Balkens)[3]

3 | Beim PHEV wird ein elektrischer Fahranteil von 40 % veranschlagt.

Effekte sichtbar werden. In der Realität jedoch führt ein schwankender und zuletzt steigender Trend in Bezug auf die Fahrleistungen zu einer (Über-)Kompensation der genannten Faktoren. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse für das Business-as-usual- und das progressive Szenario wird dieser Faktor jedoch vernachlässigt. Der spezifische Energieverbrauch je Personenkilometer ist seit 2005 um rund 10 % gesunken, wenngleich die stark zunehmende Verkehrsleistung insgesamt zu einem Energiebedarfsanstieg geführt hat (BMUB, 2016).

Im direkten Vergleich zwischen Business-as-usual- und progressivem Szenario wird dieser Effekt nochmals verdeutlicht: So werden 2030 bei progressiver Entwicklung insgesamt nur noch 3.923 PJ (Petajoule, entspricht 10^{15} Joule) Energie benötigt, bei moderater Entwicklung aber über 75 PJ mehr. Diese Differenz lässt sich zur besseren Einordnung umrechnen in eine Energiemenge von ca. 21 Mrd. kWh[4] und – bei einem angenommenen EU-Strommix mit 400 g CO_2/kWh – einen geringeren Ausstoß von über 8,3 Mio. Tonnen CO_2 nur für das Jahr 2030. Im Jahr 2010 lag der Energiebedarf der europäischen PKW-Flotte noch bei insgesamt fast 7.500 PJ, also fast doppelt so hoch.

Es wird deutlich, dass durch die höhere Elektrifizierung der Energiebedarf in Europa bis zum Jahr 2030 insgesamt und bei beiden Szenarien reduziert werden kann, die elektrifizierten Fahrzeuge jedoch aufgrund der relativ langsamen Flottenumwälzung in Europa auch nur langsam Anteile am Flottenbestand gewinnen können. Der Vergleich des Energiebedarfs und der absoluten Bestandszahlen von BEV und CNG verdeutlicht die Reduktion: Demnach verbrauchen beide Antriebsarten 2030 nahezu gleich viel Energie (ca. 300 PJ), während aber mehr als dreimal so viele BEV im Bestand existieren. Aufgrund der langsamen Flottenumwälzung kommen weitere Reduktionspotenziale durch BEV voraussichtlich erst nach 2030 signifikant zur Geltung.

Auf die CO_2-Emissionen „Tank-to-Wheel“: In Abbildung 60 werden die während der Fahrt ausgestoßenen CO_2-Emissionen der europäischen PKW-Flotte dargestellt. Hierfür werden die ermittelten Energiebedarfe mit den spezifischen CO_2-Emissionsfaktoren je Energieträger multipliziert.

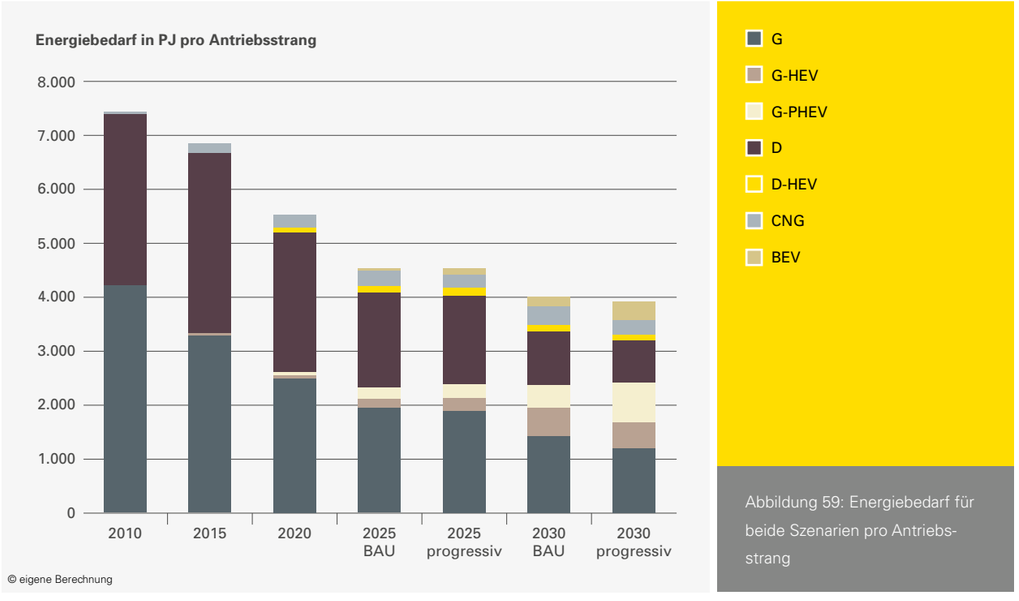


Abbildung 59: Energiebedarf für beide Szenarien pro Antriebsstrang

4 I 1 J = 2,78 × 10^{-7} kWh.

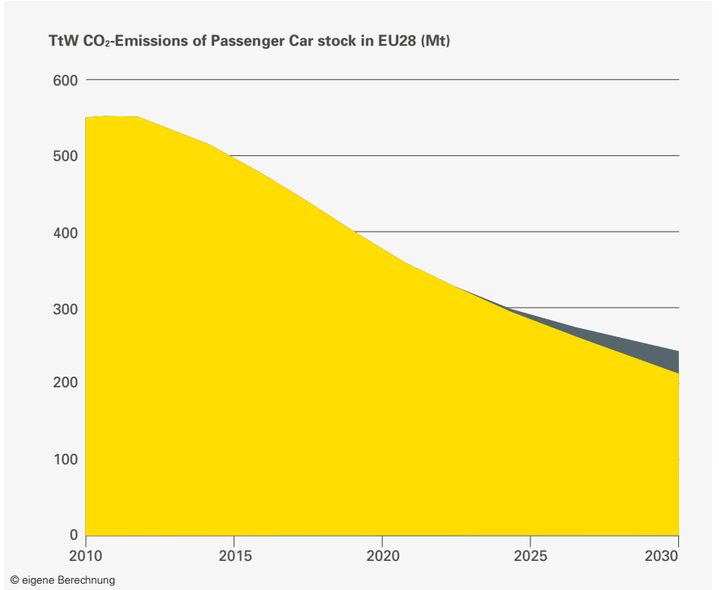


Abbildung 60: TtW CO_2-Emissionspfade für beide Szenarien für den europäischen PKW-Bestand

Wie bei den Bestandsentwicklungen unterscheiden sich die beiden Szenarien („Business as usual“ und „progressiv“) auch bei den CO_2-Emissionen bis 2025 nur marginal. Aufgrund der stetigen Abnahme des Energiebedarfs durch effizienzoptimierte Fahrzeuge sinken die CO_2-Emissionen von rund 550 Mt Ausgangswert 2010 aber kontinuierlich. Erst zwischen 2025 und 2030 sind signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien zu erkennen, sodass 2030 dann bei moderater Entwicklung gegenüber dem moderaten Szenario schon ein Mehrausstoß von über 23 Mio. Tonnen CO_2 resultiert. Dies entspricht einer Differenz von rund 10 % in Bezug auf die gesamten europäischen Verkehrsemissionen. In Summe werden über den gesamten Zeitraum 2010–2030 über 8.393 Mt im Business-as-usual- und 8.324 Mt im progressiven Szenario ausgestoßen – ein Unterschied von ca. 69 Mio. Tonnen CO_2. Die Differenz zwischen dem Business-as-usual- und dem progressiven Szenario nimmt dann vor allem aber bei weiterer Fortschreibung in die Zukunft zu. Die Betrachtung bis 2050 erfolgt im anschließenden Kapitel, darin wird u. a. auch eine Einordnung im Zusammenhang mit den ökologischen Zielen der Bundesregierung (Klimaschutzplan 2050) vorgenommen.

Auf die CO_2-Emissionen „Well-to-Wheel“: Nachdem die vorangegangene Analyse der CO_2-Emissionen nur den spezifischen Ausstoß der Fahrzeuge im Betrieb veranschaulicht, stellen Tabelle 12 und Abbildung 61 ergänzend die Emissionen des Fahrbetriebs inklusive der Emissionen dar, die bei der Energiebereitstellung anfallen. Hierfür werden die ermittelten Energiebedarfe mit den spezifischen CO_2-Emissionsfaktoren je Energieträger (Strom, Benzin, Diesel, CNG, …) multipliziert. Der Faktor für den Energieträger Strom basiert auf den Emissionen des jeweils landestypischen Strommixes, für Deutschland, Italien und Polen exemplarisch in Tabelle 12 dargestellt.

	2010	2015	2020	2025	2030
Deutschland	156	147	100	105	75
Italien	195	149	114	87	67
Polen	222	201	181	164	148

Tabelle 12: Entwicklung der CO_2-Emissionen für Deutschland, Italien und Polen 2010–2030 in g CO_2 pro MJ im Vergleich (eigene Annahme auf Basis des VEU-Projektes[5])

5 I Beim PHEV wird ein elektrischer Fahranteil von 40 % veranschlagt.

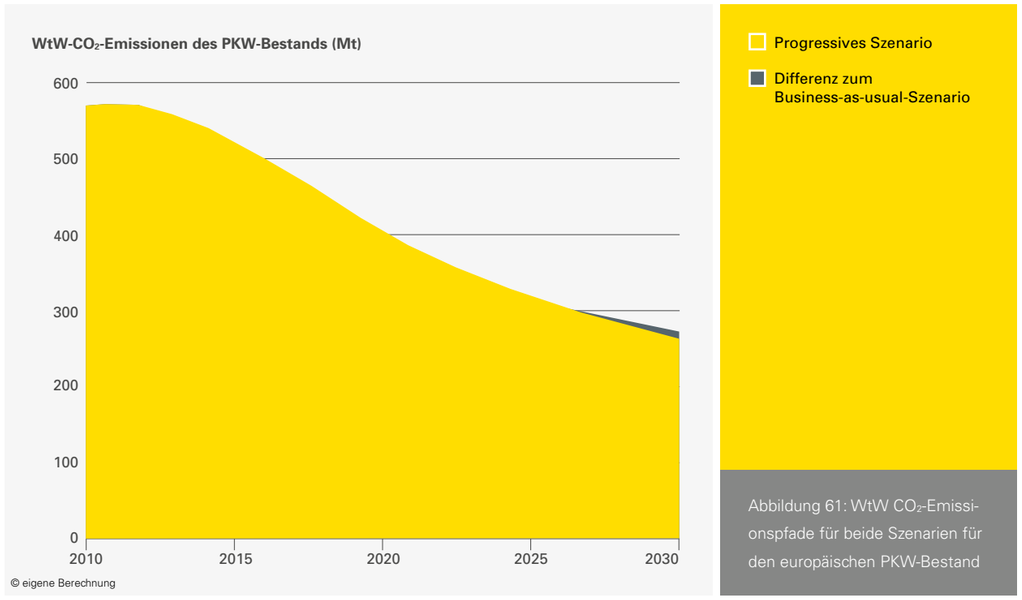


Abbildung 61: WtW CO_2-Emissionspfade für beide Szenarien für den europäischen PKW-Bestand

Analog zu den bisherigen Ergebnissen unterscheiden sich die beiden Szenarien auch bei der Well-to-Wheel-Betrachtung bis 2025 nicht signifikant. In den folgenden fünf Jahren bis 2030 können aber trotzdem insgesamt über 20 Mio. Tonnen CO_2 eingespart werden. Im direkten Vergleich liegen die CO_2-Emissionen der PKW im europäischen Verkehrssektor 2030 bei 318 Mio. Tonnen („Business as usual") und 309 Mio. Tonnen („progressiv"). Bei einer Fortschreibung in die Zukunft bis 2050 wächst diese Differenz weiter an.

4.5 Einordnung der Szenarien vor dem Hintergrund des Klimaschutzplans 2050 und der Sektorziele

Im Rahmen der Pariser Klimaschutzkonferenz 2015 hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, weitere Emissionsreduktionen mit dem Zielwert von 80 % bis 95 % für das Jahr 2050 im Vergleich zu 1990 festzuschreiben und mit konkreten Maßnahmen zur Zielerreichung zu hinterlegen. Als langfristiges Ziel soll die Treibhausgasneutralität für Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts angestrebt werden. Hierfür wurden Meilensteine und Ziele für alle Sektoren (z. B. Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr und Industrie) bis 2030 definiert. Im folgenden Abschnitt wird insbesondere auf die Sektorziele für den Verkehr eingegangen, um eine Einordnung der beiden VECTOR21-Szenarien vor dem Hintergrund der definierten Prämissen vorzunehmen.

1990 verursachte der Sektor Verkehr mit 163 Mio. Tonnen CO_2-Äq. rund 13 % der Gesamtemissionen in Deutschland. 2014 stieg der Anteil auf über 17,5 % bei nahezu gleichbleibenden absoluten Zahlen (160 Mio. t CO_2-Äq.). Als Meilenstein für 2030 wird eine Minderung von 40 % bis 42 % angestrebt, um einen Zielwert von 95 bis 98 Mio. Tonnen CO_2-Äq. zu erreichen. Zum Vergleich: Dieser Zielwert entspricht den gesamten Emissionen der deutschen PKW-Flotte eines Jahres, in diesem Fall des Jahres 2015 (UNFCCC, 2017). Über alle Sektoren hinweg soll bis 2030 eine Reduktion von mindestens 55 % erzielt werden. 2040 soll die Reduktion mindestens 70 % betragen, damit spätestens 2050 der Zielwert von 80 % bis 95 % Minderung erreicht wird (BMUB, 2016).

Mit Blick auf die Modellergebnisse für den deutschen Raum ist die PKW-Flotte 2014 für knapp 100 Mio. Tonnen CO_2-Äq. verantwortlich. Infolge der relativ langsamen Flottenumwälzung unterscheiden sich die beiden Szenarien erst ab 2025 signifikant und weisen 2030 dann für Deutschland eine Differenz von 5 Mio. Tonnen CO_2 auf. **Aufgrund des Einsatzes neuer Technologien in Fahrzeugen würden beide Szenarien den im Klimaschutzplan genannten Meilenstein 2030 für den PKW-Anteil im Verkehrssektor erreichen:** „Business as usual" mit 50 % Minderung gegenüber 1990 (50 Mio. Tonnen) und „progressiv" mit sogar 55 % Minderung (45,3 Mio. Tonnen) – dies allerdings unter der Voraussetzung, dass sich die grundlegenden Annahmen zur jährlichen Fahrleistung und zur Fahrzeuggrößenverteilung – wie anfangs des Kapitels beschrieben – nicht weiter negativ entwickeln und so die Reduktionen (über)kompensieren. Derzeitige Trends zeigen ein wieder steigendes Verkehrsaufkommen – was mit den Erwartungen des BMVI (BMVI, 2014) übereinstimmt, dass die Verkehrsleistung im PKW-Sektor zwischen 2010 und 2030 weiter zunehmen wird. Zudem müssen die restlichen Transportmodi (Luft- und Schifffahrt sowie Nutzfahrzeuge) ebenfalls eine Reduktion erzielen.

Zusammengefasst bieten elektrifizierte Antriebe und effizienzsteigernde Technologien die Chance zur Erreichung des Klimaschutz-Meilensteines 2030, externe Faktoren jedoch (wie z. B. eine steigende jährliche Fahrleistung im Verkehrssektor) stellen gleichzeitig auch erhebliche Risiken dar. Um diesen Risiken entgegenzuwirken, könnten zusätzlich Konzepte zur Veränderung des individuellen Mobilitätsverhalten wirken. Der Ausbau von öffentlichem Nah- und Fernverkehr kann dazu beitragen, dass steigende Mobilitätsansprüche nicht automatisch zur Steigerung der Fahrleistung pro PKW führen. Innovative Fahrzeugkonzepte können z. B. durch die Nutzung von Leichtbauelementen und aerodynamischen Modernisierungen dazu beitragen, dass sich die Weiterentwicklung von Fahrzeugkomfort und Sicherheit von einer weiteren Steigerung der Motorleistung abkoppelt.

Durch eine exemplarische Fortführung der europäischen CO_2-Emissionen bis 2050 wächst die Differenz zwischen den beiden Szenarien signifikant weiter an. Das progressive Szenario erzielt eine Reduktion von über 96 % im Jahr 2050, hingegen verfehlt das Business-as-usual-Szenario das Ziel knapp. Bis 2050 beträgt der kumulierte Unterschied für den europäischen Straßenverkehr über 1.000 Mt CO_2. Zur Einordnung: Die gesamte deutsche PKW-Flotte des Jahres 2014 könnte ungefähr zehn Jahre lang auf den Straßen fahren und würde erst dann diesen Wert erreicht haben. **Dies verdeutlicht, dass eine frühzeitige Umwälzung der Flotte einen großen Einfluss auf den langfristigen CO_2-Ausstoß und somit einen stark positiven Effekt in Richtung Treibhausgasneutralität hat.**

Zusätzlich zur Umwälzung und zu den Reduktionsmöglichkeiten im Verkehr darf das Sektorziel der Energiewirtschaft nicht aus den Augen verloren werden, besonders bei strombetriebenen Fahrzeugen, die im Verkehr keine (direkten) Emissionen haben. Mit einem wachsenden Anteil an BEV in der Flotte nimmt der Strombedarf aber weiter zu, der ebenfalls treibhausgasneutral produziert werden soll bzw. muss. Die Modellergebnisse der WtW-Emissionen zeigen, dass unter den angenommenen CO_2-Emissionen pro Kilowattstunde im progressiven Szenario knapp 20 Mt weniger CO_2 als im Business-as-usual-Szenario ausgestoßen werden. **Somit kann ein Beitrag zum Klimaschutz erzielt werden, besonders vor dem Hintergrund, dass BEV deutlich weniger Energie pro Kilometer benötigen.**

05 Beschäftigungseffekte der Elektromobilität

© AdobeStock

05

Beschäftigungseffekte der Elektromobilität

In Kürze:

- Analysiert wurde, inwiefern die Beschäftigten des baden-württembergischen Automobilclusters durch den Wandel zur Elektromobilität betroffen sind. Die tatsächlichen Auswirkungen des Wandels hängen von zahlreichen Prämissen ab, sodass keine Beschäftigungsprognose im Sinne einer „Vorausrechnung" dargestellt werden kann. Ausgangsbasis der Abschätzung ist die detaillierte Clusterdarstellung in Kapitel 3, die regionalisierte Aussagen für Baden-Württemberg ermöglicht.
- Im Szenario „Business as usual" gleichen sich bis 2030 im gesamten Cluster negative Beschäftigungseffekte (Wegfall des Verbrennungsmotors) und Beschäftigungsaufbau (internationales Wachstum und neue Komponenten) aus, ein leichtes Beschäftigungswachstum ist möglich.
- Im Szenario „progressiv" geht dagegen der mögliche Beschäftigungsabbau um etwa 30.800 Beschäftigte über den möglichen Beschäftigungsaufbau hinaus. Damit wären knapp 7 % der Beschäftigten im baden-württembergischen Automobilcluster vom Wandel zur Elektromobilität bedroht.
- Eine aktive Gestaltung dieses Strukturwandels kann die wirtschaftliche Stärke Baden-Württembergs erhalten oder sogar weiter ausbauen. Das setzt jedoch voraus, dass das Automobilcluster Baden-Württemberg auch bei den alternativen Antriebstechnologien seine Innovationsrolle behält. Der Blick auf Clustersegmente zeigt jedoch die besondere Betroffenheit der Produktionswerke im Antriebsstrang. Je nach Szenario könnte der Wandel zwischen 10 % und 46 % (mit Produktivitätseffekten 17 % bis 56 %) der 70.000 hier arbeitenden Beschäftigten treffen. Am zweitstärksten sind die FuE-Beschäftigten der Branche betroffen.
- Deutlich wird damit, dass Handlungsoptionen an den unterschiedlichen Betroffenheiten der Beschäftigtengruppen ansetzen müssen und insbesondere die nachhaltige Entwicklung der Produktionsstandorte unterstützt werden muss. Der Erhalt baden-württembergischer (Produktions-)Standorte und die Qualifizierung der Beschäftigten werden zu großen Herausforderungen für Politik, Unternehmen und Beschäftigte.

Die in Kapitel 4 entwickelten DLR-VECTOR21-Szenarien modellieren für unterschiedliche politische, gesetzliche und technologische Rahmenbedingungen zwei Pfade eines Markthochlaufs verschiedener PKW-Antriebstechniken im zeitlichen Verlauf bis 2030 in Europa. Deutlich wird der in beiden Szenarien mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zunehmende Anteil der Elektrifizierung auf dem europäischen Neuwagenmarkt, verbunden mit gleichzeitig abnehmenden Anteilen rein verbrennungsmotorisch betriebener PKW. Die beiden Szenarien stellen einen möglichen Ergebnisraum für die PKW-Marktentwicklung in Europa bis 2030 bei unterschiedlicher Entwicklung der Rahmenbedingungen und kritischen Stellgrößen dar. Das Eintreten und die Ausprägung ist vor allem von für Baden-Württemberg exogenen Faktoren bestimmt.

Die Auswirkungen dieses Technologiewandels auf Beschäftigung und Wertschöpfung in der baden-württembergischen Automobilwirtschaft werden nun in diesem Kapitel untersucht. Der bevorstehende Strukturwandel des Automobilclusters wird neben dem technologischen Wandel zur Elektromobilität durch weitere Einflussfaktoren bestimmt. Diese werden in Kapitel 6 beschrieben und bewertet.

Losgelöst vom zeitlichen Verlauf werden hier zunächst die Beschäftigungsrisiken und -chancen unter der Annahme eines vollständigen Wandels zur rein batterieelektrischen Elektromobilität abgeschätzt. Basis dafür sind die im dritten Kapitel dargestellten Segmente des Automobilclusters in Baden-Württemberg: das gesamte Automobilcluster einschließlich des Wertschöpfungsclusters und des Wertschöpfungs- und Innovationskerns. Für das Jahr 2030 wird anschließend berechnet, in welchem Umfang die unterschiedlichen Beschäftigtengruppen jeweils im Business-as-usual beziehungsweise im progressiven Szenario betroffen sein können. **Die in diesem Zusammenhang dargestellte Betroffenheit von Beschäftigten darf jedoch nicht als Prognose der tatsächlichen Beschäftigtenentwicklung verstanden werden.** Denn neben der Entwicklung der Absatzmärkte werden noch andere, insbesondere betriebswirtschaftliche Parameter darüber entscheiden, wie sich die Beschäftigtensituation in den baden-württembergischen Unternehmen – und stärker noch in den baden-württembergischen Standorten der Automobilindustrie – konkret entwickeln wird. Diese betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden sich während des Transformationsprozesses im Wettbewerb der Anbieter entscheiden und lassen sich deshalb nicht prognostizieren.

Im Folgenden seien einige wichtige, für die tatsächliche Beschäftigungsentwicklung in Baden-Württemberg möglicherweise entscheidende, Prämissen genannt.

- Ergibt z. B. die Betroffenheitsanalyse, dass aufgrund der Marktentwicklung ein Umsatzrückgang an einem baden-württembergischen Automobilzulieferwerk um 30 % zu erwarten ist, so kann daraus nicht geschlossen werden, dass sich dort auch die Beschäftigung linear um 30 % reduziert. Vielmehr ist davon auszugehen, dass viele Zuliefererstandorte einen Umsatzrückgang von 30 % betriebswirtschaftlich kaum überleben können.
  Die Krise 2009 hat gezeigt, dass ein Umsatzrückgang in dieser Größenordnung deutlich unter dem Break-even-Point (der Rentabilitätsschwelle) liegen wird und somit die Standortfixkosten nicht mehr voll gedeckt werden können. Dies wird an vielen Standorten zu einer dauerhaften Verlustsituation führen, die den Fortbestand des gesamten Standortes gefährden kann. Im Extremfall kann die Betroffenheit von 30 % des Standortumsatzes demnach zu einem Abbau von 100 % der Standortbeschäftigten führen.

- Infolge der sinkenden Nachfrage kann es aber auch zu Marktbereinigungen kommen, die nicht zwangsläufig die baden-württembergischen Standorte betreffen müssen. Vielmehr kann sich die Marktbereinigung auch positiv auswirken, wenn baden-württembergische Werke die Innovationsführerschaft im Markt besitzen. So kann beispielsweise die Reduktion des Marktvolumens eines bestimmten Produktes um 40 % dazu führen, dass einer oder mehrere Anbieter vom Markt verschwinden. Ist ein Branchenteil von einem Nachfragerückgang betroffen, entsteht in der Regel ein Preiswettbewerb, den die weniger konkurrenzfähigen Unternehmen durch Marktaustritt verlieren. Trifft dies gerade nicht die baden-württembergischen Standorte, so könnten möglicherweise die verbleibenden Standorte mittelfristig sogar mehr Umsatz als vor der Transformation verzeichnen und Beschäftigung sogar aufbauen.

- Nicht absehbar ist zurzeit auch noch, wie sich die Wertschöpfung insbesondere bei den neuen Produkten zwischen den Komponentenwerken der OEM und der Automobilzulieferindustrie aufteilen wird. Aktuell werden mit steigender Tendenz ca. 80 % der Wertschöpfung der Branche von Zulieferern gefertigt. Diese sind insbesondere aufgrund spezifischer Spezialisierung und ihrer stark nach Osteuropa ausgeweiteten Produktionsnetzwerke bei vielen Produktgruppen deutlich kostengünstiger als die Eigenfertigung der OEM (Schwarz-Kocher et al., 2019). Außerdem besitzen sie inzwischen für viele Komponenten auch das Produktinnovations-Know-how. Auf der anderen Seite könnten die OEM bestrebt sein, ihr Beschäftigungsproblem im Transformationsprozess durch eine stärkere Auslastung der eigenen Werke zu lösen. Beschäftigte und Betriebsräte der OEM versuchen dies mittels belastbarer Standortsicherungsvereinbarungen zu regeln, beispielsweise bei Daimler in Untertürkheim (STZ, 24.01.2018). Solche Insourcing-Strategien der OEM sichern zwar dort die Beschäftigung, könnten aber für die Automobilzulieferindustrie in Baden-Württemberg zusätzliche Umsatzrückgänge bringen.

- Viele Zulieferer beklagen, dass sich die Geschäftsbeziehungen zu den OEM von einem ehemals kooperativen Verhältnis zu einem stark machtstrukturierten, allein kostengetriebenen Verhältnis entwickelt haben. Unter diesen Voraussetzungen ist zu erwarten, dass die Reduzierung des Marktvolumens einzelner Komponenten den Wettbewerbsdruck verschärft und dies von den OEM für weitere Preisreduktionsrunden genutzt wird. Dies kann dazu führen, dass der Anteil der an deutschen Standorten gefertigten Komponenten zugunsten der osteuropäischen Produktionswerke weiter reduziert wird. Auch dies würde sich negativ auf die Beschäftigungsentwicklung in Baden-Württemberg auswirken.

- Auslastung und Beschäftigung in einem Zuliefererproduktionswerk hängen wesentlich an den Liefervereinbarungen (Projekten) mit den OEM zu bestimmten Modellreihen bzw. Motortypen. Die Reduktion von Stückzahlen der klassischen Verbrennungsmotorkomponenten kann zu einer Reduktion der vertraglich vereinbarten Abrufzahlen der Produkte führen. Erheblichere Auswirkungen sind aber erst am Ende einzelner Projekte zu erwarten, wenn aufgrund der stärkeren Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen ganze Modellreihen auslaufen beziehungsweise die reduzierte Stückzahlerwartung dazu führt, dass einzelne Anbieter keine Folgeaufträge bekommen. Die tatsächlichen Beschäftigungswirkungen in den einzelnen Produktionswerken können deshalb im Zeitverlauf deutlich von der Entwicklung der Absatzmärkte abweichen.

- Die hohen Investitionen der OEM zur Entwicklung von Elektrofahrzeugen (siehe auch „Strategien der Hersteller“ in Kapitel 2) können dazu führen, dass weniger in die Entwicklung neuer Verbrennungsmotoren investiert wird. Dies könnte bedeuten, dass bestehende Aufträge länger als vereinbart weitergeführt werden, was die Beschäftigung an einzelnen Standorten länger als erwartet absichern kann.

Trotz dieser Einschränkungen liefert eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Beschäftigtengruppen auf Basis einer wissenschaftlich fundierten Modellierung der Marktnachfrage unterschiedlicher Antriebsstrangkomponenten wichtige Impulse für die frühzeitige Entwicklung von Unternehmens- und Standortstrategien. Das ist unverzichtbare Grundlage für eine industriepolitische Absicherung des Transformationsprozesses zur Elektromobilität in Baden-Württemberg. Diese Ziele können aber nur erreicht werden, wenn die unterschiedliche Betroffenheit der einzelnen Beschäftigtengruppen berücksichtigt wird. Außerdem muss eine regionalisierte Analyse explizit die Beschäftigtenstruktur der baden-württembergischen Automobilhersteller- und Zuliefererstandorte und nicht nur die der baden-württembergischen Unternehmen in den Blick nehmen. Denn die Unternehmen können für sich als Ganzes Erfolg versprechende Elektrifizierungsstrategien verfolgen – beispielsweise durch Unternehmenszukäufe in anderen Ländern –, die jedoch baden-württembergischen Standorten keine Perspektive bieten.

5.1 Aktueller Forschungsstand

Mehrere Studien haben bereits untersucht, wie viele Beschäftigte von einer Umstellung auf Elektromobilität betroffen sind. Dabei hängen die ermittelten Beschäftigungseffekte beträchtlich davon ab, in welchen Anteilen und mit welchem zeitlichen Verlauf die Umstellung der Antriebe vom heute vorherrschenden Verbrennungsmotor zu Hybridantrieben/Plug-in-Hybriden und zu batterieelektrischen Fahrzeugen zugrunde gelegt werden.

Aktuellste Ergebnisse liegen aus der Studie „ELAB 2 – Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Auswirkungen auf die Beschäftigung in Deutschland“ (Fraunhofer IAO, 2018) vor. Ohne Berücksichtigung von Produktivitätssteigerungen geht die Studie bis 2030 von einem Beschäftigungsrückgang zwischen –11 % und –35 % der vom Antriebsstrang abhängigen Beschäftigten aus, je nachdem, wie hoch der erwartete BEV-Anteil ist. Unter Berücksichtigung der Produktivitätssteigerung fällt der Beschäftigungsrückgang noch deutlicher aus (–37 % bis –53 %) (Fraunhofer IAO, 2018, S. 7). Für Baden-Württemberg prognostiziert das Projekt „Mobiles Baden-Württemberg – Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität“ ebenfalls bis zum Jahr 2030 einen möglichen Beschäftigungsrückgang zwischen 50.000 und 160.000 Arbeitsplätzen – je nach Szenario mit unterschiedlicher Anzahl von Neuzulassungen bzw. abgesetzten Fahrzeugen und unterschiedlichen Anteilen elektrischer Antriebe (Baden-Württemberg Stiftung, 2017, S. 209). Berger et al. (2017, S. 154 f.) kommen für Baden-Württemberg zu folgendem Ergebnis: „23 % der Beschäftigten in der baden-württembergischen Automobilproduktion sind mit der Herstellung von Produkten befasst, die potenziell von einem Wandel zur Elektromobilität negativ betroffen sind. (…) Der Anteil der Beschäftigten, die potenziell positiv von der Elektromobilität betroffene Produkte herstellen, ist deutlich geringer und liegt in Baden-Württemberg bei 3,3 % der gesamten im Bereich Automobilproduktion Beschäftigten.“ Damit könnten in Baden-Württemberg bis zu 61.000 Beschäftigte negativ von Elektromobilität betroffen sein, potenziell positiv betroffen sind bis zu 8.700 Beschäftigte (ebd.).

Die von jüngsten Studien erwarteten Beschäftigungseffekte weichen deutlich von den Ergebnissen etwas älterer Studien, wie beispielsweise ELAB 1 (Fraunhofer IAO, DLR und IMU, 2012) oder Schade et al. (2014) ab, die mit dem Wandel zur (hybriden) Elektromobilität anfangs einen möglichen Beschäftigungsaufbau in Deutschland verbunden haben. Ganz wesentlich dafür sind neue Bewertungen für die Anteile von Hybrid- bzw. Plug-in-Hybridantrieben im Verhältnis zu batterieelektrischen Antrieben. Noch bis 2015 wurden deutlich höhere Anteile von Hybridfahrzeugen als mittelfristige Übergangstechnologie erwartet, die aufgrund ihrer Komplexität und des höheren Fertigungsaufwandes zunächst einen Beschäftigungsaufbau mit sich gebracht hätten. In neueren Szenarien steigt der Anteil batterieelektrischer Antriebe – zulasten der Hybridfahrzeuge –, die gegenüber Verbrennungsmotoren und Hybridmotoren mit einem geringeren Produktionsaufwand und damit weniger Beschäftigung verbunden sind.

Neben diesen unterschiedlichen Annahmen über die Anteile hybrid- und batterieelektrischer Fahrzeuge beeinflusst auch die statistische Abgrenzung der betrachteten Beschäftigtengruppe in den jeweiligen Studien die Ableitung von Beschäftigungseffekten. Das Fraunhofer IAO (2018) betrachtet vor allem die Beschäftigung bei der Herstellung und dem Einbau des Antriebsstranges. Die Studie „Mobiles Baden-Württemberg“ betrachtet die Beschäftigung in der gesamten Mobilitätswirtschaft und stützt sich dabei auf die Zuordnung von

Beschäftigtenzahlen über die Klassifikation der Wirtschaftszweige. Berger et al. (2017, S. 154 f.) ermitteln Produktionsmengen für positiv bzw. negativ von Elektromobilität betroffene Produkte und leiten über die Umsatzproduktivität die Beschäftigungseffekte ab, hierbei berücksichtigen sie Exporte, jedoch keine branchenübergreifenden Verflechtungen. Die vorliegende Studie berücksichtigt die betroffenen Beschäftigtengruppen umfassender, indem sie neben den Hauptwirtschaftszweigen der Automobilbranche über eine Input-Output-Analyse auch Beschäftigung von Zulieferern weiterer Branchen erfasst.

Zudem ist die Ableitung regionalisierter Betroffenheit, von Standortstrategien und von industriepolitischen Handlungsansätzen aus den bisher vorliegenden Forschungsansätzen und -ergebnissen schwierig. Beispielsweise liefert die aktuelle ELAB-2-Studie mit einer außerordentlich detaillierten Datenlage den notwendigen Beschäftigteneinsatz für die wesentlichen Komponenten der unterschiedlichen Antriebsstrangarten. Damit setzt das Projekt einen neuen Standard für die Abschätzung der Beschäftigungseffekte beim Wechsel der Antriebsart. Diese Daten sind von größter Bedeutung und fließen auch in die folgenden Schätzungen ein. Die theoretischen Beschäftigungseffekte in Deutschland wurden in dieser Studie dann aber nur überschlagen. Dazu wird methodisch unterstellt, dass über die unterschiedlichen Antriebstechnologien hinweg alle Antriebsstränge der 5,75 Mio. in Deutschland produzierten Fahrzeuge einschließlich aller Zulieferteile auch in Deutschland hergestellt werden. Aufgrund der ermittelten Beschäftigtenzahl pro 1 Mio. Antriebsstränge ergibt das für Deutschland insgesamt 210.000 antriebsstrangabhängige Beschäftigte. Je nach Antriebsstrangmix der ELAB-2-Szenarien kann für das Jahr 2030 auf die prozentuale Veränderung der Beschäftigtenbedarfe für 1 Mio. Antriebsstränge geschlossen werden. Auf die 210.000 Beschäftigten insgesamt angewandt, ergeben sich dann die jeweiligen negativen Beschäftigungssalden.

Für eine erste Abschätzung der Gesamteffekte ist das Verfahren geeignet. Für die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Standorte und Industriepolitik stößt es aber schnell an seine Grenzen, da wichtige Rahmenbedingungen mit dieser Methode unberücksichtigt bleiben:

- ELAB 2 bewertet die Beschäftigungswirkungen für die besonders betroffene Gruppe der vom Antriebsstrang abhängigen Produktionsbeschäftigten. Diese deckt nach unseren Abschätzungen allerdings nur etwa 16 % aller Beschäftigten des Automobilclusters ab.

- Der spezifische methodische Analyseansatz im Projekt ELAB 2 ergibt die für die jeweiligen Marktszenarien im Jahr 2030 betroffenen Beschäftigtenanteile. So wird zum Beispiel in Szenario 1 erwartet, dass 11 % der zurzeit vom Antriebsstrang abhängigen Beschäftigten negativ vom Transformationsprozess betroffen wären. Der Analyse liegen zu den verschiedenen Komponenten sehr unterschiedliche Wertschöpfungstiefen zugrunde, wie sie sich aus der Struktur der industriellen Partner ergeben. Deshalb gelten die berechneten prozentualen Anteile nur für die analysierten Unternehmensstrukturen. Eine Übertragung auf die Gesamtbranche ist methodisch kritisch, weil die analysierte Wertschöpfungstiefe bei den Verbrennungsmotor-Komponenten deutlich niedriger liegt als bei den E-Mobilitäts-Komponenten. Die berechneten negativen Beschäftigungseffekte lassen deshalb einen großen Teil der Wertschöpfung von Verbrennungsmotor-Komponenten unberücksichtigt, sodass sich bei einer Übertragung auf die Gesamtbranche eine systematische Unterbewertung der Beschäftigungsrisiken ergibt. Nach unseren Abschätzungen müssten die Branchenwerte je nach Marktszenario ca. 50 % bis 60 % über den in ELAB 2 dargestellten Beschäftigtenanteilen liegen.[6]

- Nicht alle Antriebsstränge der in Deutschland hergestellten PKW werden in Deutschland gefertigt und insbesondere die bei Zulieferern gefertigten Wertschöpfungsanteile werden zu einem großen Teil außerhalb Deutschlands gefertigt. So wurden 2014 bei sinkender Tendenz im Durchschnitt nur noch ca. 42 % der Zulieferteile für deutsche OEM-Werke aus deutschen Zuliefererwerken angeliefert (Schwarz-Kocher et al., 2017).

- Die deutschen Zulieferer beliefern nicht nur deutsche, sondern alle europäischen OEM-Standorte, sodass deutlich mehr Zuliefererarbeitsplätze vom Antriebsstrang abhängig sein können. Europaweit wurden 2016 19 Mio. PKW produziert, also knapp viermal so viele wie in Deutschland (VDA, 2018b).

- Es ist fraglich, ob die Wertschöpfung bei den neuen Komponenten in gleichem Umfang wie bei den Verbrennungsmotorkomponenten in Deutschland angesiedelt sein wird.

- Die deutschen Standorte der OEM und Zulieferer haben einen deutlich höheren Anteil an Forschung und Entwicklung und sonstigen indirekten Funktionen als die osteuropäischen Standorte. Da die Haupteffekte der Beschäftigungsreduzierung im Produktionsbereich stattfinden werden, müssen diese Unterschiede mitberücksichtigt werden.

- Das Marktwachstum bis 2030 wird in der Studie nicht berücksichtigt, da die deutsche Automobilbranche erheblich vom weitgehend stagnierenden europäischen PKW-Markt abhängt. Dennoch werden heute noch ca. 29 % der von deutschen Herstellen in Europa gefertigten PKW auf die intensiv wachsenden Märkte außerhalb Europas exportiert (VDA, 2018b). Diese Effekte dürfen nicht vollständig vernachlässigt werden.

- Als Basis für die Berechnung der negativen Beschäftigungseffekte dürfen nicht nur allein die Wirtschaftszweige „29.1 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren“ und „29.3 Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen“ der Statistik herangezogen werden. Da alle Zulieferer in die Berechnung der negativen Beschäftigungseffekte einbezogen wurden, muss der Basiswert der prozentualen Effekte um die Beschäftigten solcher Wirtschaftszweige ergänzt werden, die für die Automobilbranche arbeiten. Nach unseren Input-Output-Abschätzungen erhöht sich der angesetzte Basiswert dadurch um etwa ein Drittel.

Die hier genannten Effekte haben positive und negative Auswirkungen auf die betroffene Beschäftigtenzahl, sodass sich die methodischen Ungenauigkeiten zum Teil ausgleichen. Für die Regionalisierung der Beschäftigungseffekte auf die baden-württembergische Automobilbranche und für die Ableitung von Strategie- und Handlungsempfehlungen für hiesige Branchenstandorte ist dieses Vorgehen jedoch wenig geeignet.

Die bisher vorliegenden Studien differenzieren in ihren Szenarien und Beschäftigungsprognosen nicht ausreichend präzise zwischen den unterschiedlich betroffenen Beschäftigtengruppen und deren struktureller Verteilung an den Branchenstandorten. Deshalb hat die vorliegende Studie das bisherige Vorgehen bei der Ermittlung von Beschäftigungseffekten erweitert.

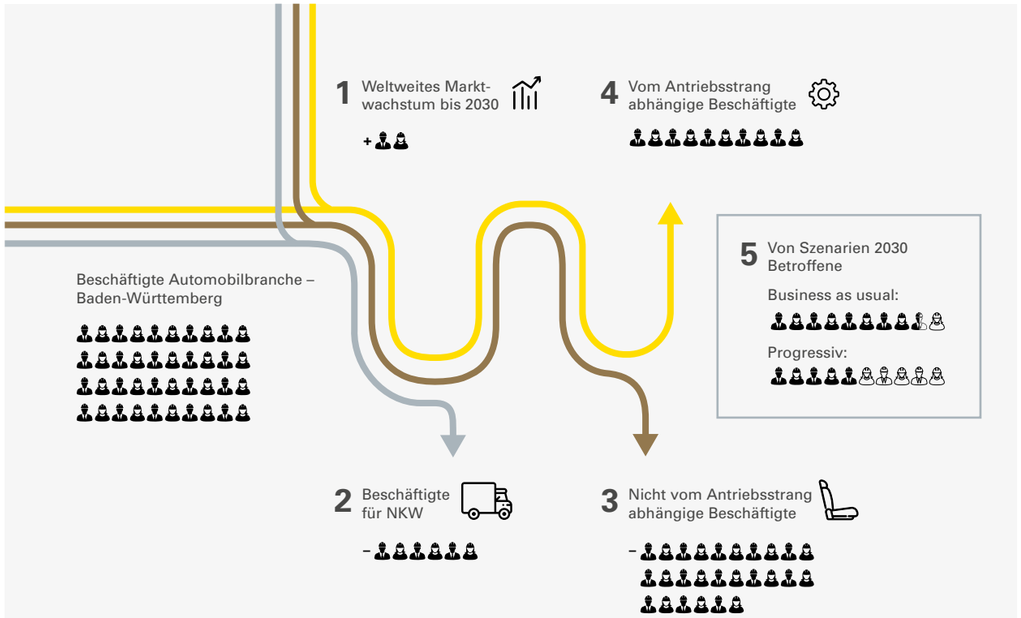
5.2 Beschreibung des methodischen Vorgehens und der Ergebnisse

Grundlage unserer Einschätzung der Beschäftigungseffekte ist die detaillierte Darstellung der Beschäftigten der baden-württembergischen Automobilwirtschaft mit ihren Clustersegmenten (vgl. Kapitel 3). Damit kann berücksichtigt werden, dass die einzelnen Beschäftigtengruppen vom Wandel der Antriebstechnik in unterschiedlichem Maße betroffen sind. Die negativen Beschäftigungseffekte des Rückgangs der konventionellen, verbrennungsmotorbasierten Komponenten (Fade-out) und die positiven Beschäftigungseffekte durch die neuen Komponenten der Elektromobilität (Fade-in) werden in zwei getrennten Berechnungsansätzen bewertet. In den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 werden die Effekte im Wertschöpfungscluster der baden-württembergischen Automobilindustrie erläutert. In Abschnitt 5.2.3 werden die Effekte im Kfz-Gewerbe beschrieben.

5.2.1 Beschäftigungseffekte bei den verbrennungsmotorbasierten Komponenten (Fade-out)

Das Modell basiert auf der theoretischen Annahme, dass bei einer Umstellung der Neuwagenproduktion auf 100 % BEV alle Beschäftigten, die heute in der Entwicklung und Produktion verbrennungsmotorbasierter Komponenten eingesetzt sind, ihre Arbeit verlieren werden. Deshalb muss in einem mehrstufigen Schätzprozess ermittelt werden, wie viele Beschäftigte in Baden-Württemberg davon betroffen wären. Im letzten Arbeitsschritt wird dann auf Basis der in Kapitel 3 dargestellten Szenarien ermittelt, in welchem Umfang die für 2030 angenommenen BEV-Anteile zu Beschäftigungseffekten führen könnten.

6 | Nach Redaktionsschluss der Strukturstudie erschien im Dezember 2018 der Abschlussbericht zu ELAB 2, in dem die hier dargestellten Zusammenhänge berücksichtigt wurden.



© eigene Darstellung

Abbildung 62: Vorgehen zur Ermittlung der Zahlen der im Jahr 2030 durch Elektromobilität betroffenen Beschäftigten

Schritt alt_I: Ausgangswert der Branchenbeschäftigten

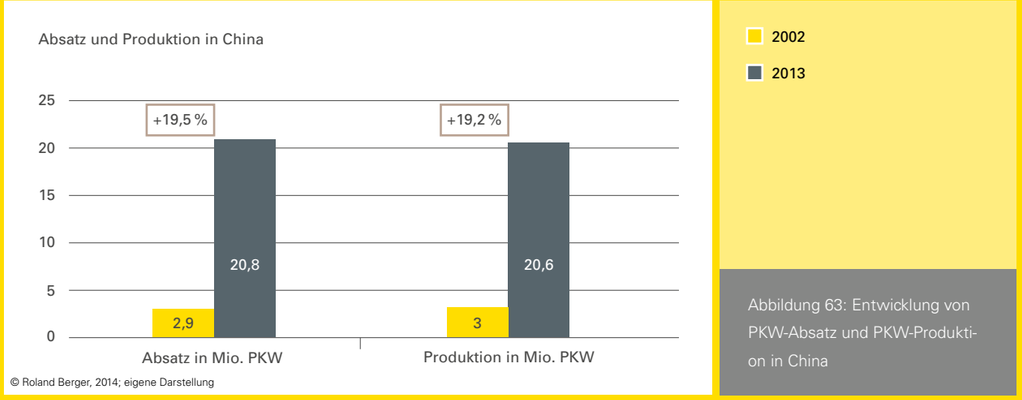
Ausgangspunkt sind die in Kapitel 3 ermittelten Beschäftigtenzahlen für die jeweiligen Wertschöpfungssegmente, in Summe 382.500 Beschäftigte im automobilen Wertschöpfungscluster (ohne das Kfz-Gewerbe). Im ersten Schritt werden die **Beschäftigungswirkungen des weltweiten Marktwachstums bis 2030** einbezogen. Der Abschätzung liegen ein eher stagnierendes Marktvolumen in Europa (siehe detaillierte Ergebnisse der Europaszenarien) sowie Steigerungen in Asien und Amerika zugrunde, insgesamt ergibt sich ein Wachstum der Automobilproduktion um fast 30 % bis 2030 (VDA, 2018c, und Oliver Wyman, 2018). Das entspricht einem jährlichen Wachstum von 2 % bis 3 %. Die Absatzmärkte in Asien und Amerika werden 2030 weitgehend von regional lokalisierten Produktionsnetzwerken versorgt (siehe Kasten „Auslandsmärkte der Automobilbranche" und Schwarz-Kocher et al., 2019, ähnlich VDA, 2018 c, und Oliver Wyman, 2018). Damit wirkt sich das weltweite Wachstum sehr unterschiedlich auf die einzelnen Beschäftigtengruppen aus. Während die Produktionsbeschäftigten in der baden-württembergischen Zulieferindustrie nur in geringem Umfang vom weltweiten Marktwachstum profitieren, kommt das Wachstum in Asien und Amerika zum Beispiel den Beschäftigten des automobilabhängigen Maschinen- und Anlagenbaus stärker zugute, weil sie in noch deutlich größerem Umfang die Produktionsanlagen in Baden-Württemberg fertigen und weltweit exportieren. Somit müssen die Wachstumseffekte bis 2030 für alle relevanten Wertschöpfungsgruppen differenziert beurteilt werden.

Für die **Produktionsbeschäftigten bei OEM und Zulieferern** wurde berücksichtigt, dass einzelne Komponenten aus den baden-württembergischen Werken an Werke außerhalb Europas und ca. 29 % (Auskunft VDA, Stand 2017) der in Europa gefertigten PKW auf außereuropäische Märkte geliefert werden. Die Entwicklung der letzten fünf Jahre hat gezeigt, dass das außereuropäische Wachstum zu einem großen Teil durch den Ausbau der außereuropäischen Standorte bedient wurde (siehe Kasten). Etwa ein Drittel des Marktwachstums hat aber auch zu entsprechenden Exportsteigerungen beigetragen. Die baden-württembergischen Komponentenwerke bei OEM und Zulieferern exportieren 16 % bis 18 % der gefertigten Teile an außereuropäische Montagewerke (Schwarz-Kocher et al., 2019, und eigene Standortanalysen 2018). Dieser Anteil wird ebenfalls am weltweiten Marktwachstum partizipieren, auch wenn die fortgeführten weltweiten Ansiedlungsbemühungen den Effekt bis 2030 deutlich reduzieren werden. Beide Wachstumseffekte wurden in der Abschätzung berücksichtigt. Bei den Material- und Teilezulieferern außerhalb des Brancheninnovationskerns ist von einer vollständig lokalen Versorgung der außereuropäischen Werke auszugehen. Bei den Beschäftigten in Forschung und Entwicklung wurde berücksichtigt, dass ein Teil der Grundlagenforschung und Zentralentwicklungsbereiche auch mit Aufgaben für die Entwicklungszentren in Amerika und Asien beschäftigt ist. Bei den Ausrüstern aus dem Maschinen- und Anlagenbau werden deren hohe außereuropäische Exportanteile berücksichtigt.

Insgesamt wurde so bis 2030 ein Wachstumspotenzial von ca. 19.000 Beschäftigten für die baden-württembergische Automobilindustrie identifiziert, sodass sich die Gesamtbeschäftigungszahl im automobilen Wertschöpfungscluster Baden-Württemberg (ohne Kfz-Gewerbe) bis 2030 auf 401.400 Beschäftigte entwickeln würde.

Auslandsmärkte der Automobilbranche

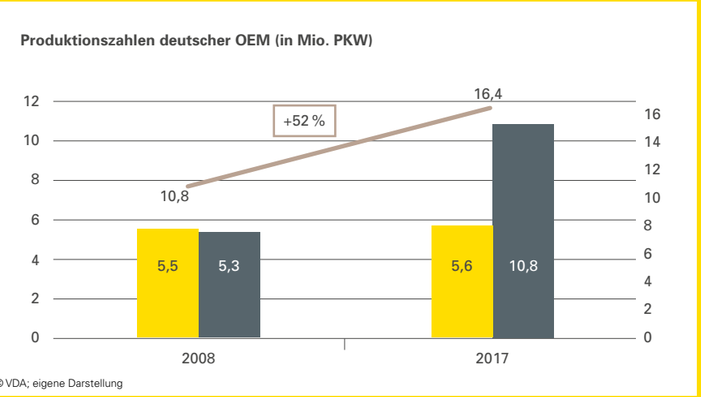
Die Automobilbranche verzeichnet seit Jahren weltweit ein sehr hohes Marktwachstum. Insbesondere in Weltregionen, in denen eine breite, prosperierende Mittelschicht entsteht, entwickelt sich ein großer neuer Markt für PKW. China gilt hier als Paradebeispiel eines Emerging Market. Allein in den elf Jahren 2002 bis 2013 stieg der jährliche PKW-Absatz in China von 2,9 Mio. Fahrzeugen auf 20,8 Mio. Das entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 20 % (Roland Berger, 2014). Im gleichen Zeitraum stieg aber auch die lokale Produktion in China von 3,0 Mio. auf 20,6 Mio. PKW, sodass rechnerisch das Marktwachstum vollständig aus eigener Produktion bedient werden konnte.



© Roland Berger, 2014; eigene Darstellung

Abbildung 63: Entwicklung von PKW-Absatz und PKW-Produktion in China

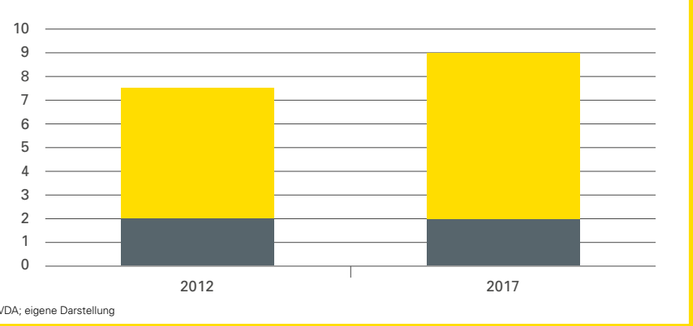
Diese Entwicklung in den Boomjahren in China deutet auf einen Wechsel der Marktversorgungsstrategien in der Branche hin. Während noch vor 20 Jahren die europäischen OEM ihre Auslandsumsätze und insbesondere außereuropäische Umsätze größtenteils aus den europäischen Produktionswerken generierten, führen die vermehrten Auslandsinvestitionen dazu, dass die Märkte der Weltregionen mehr und mehr aus diesen Regionen versorgt werden. Dies zeigt eindrücklich auch die Entwicklung der Produktionszahlen der deutschen OEM. Zwischen 2008 und 2017 ist die Inlandsproduktion der deutschen OEM fast konstant geblieben, während sich die Auslandsproduktion mehr als verdoppelt hat.



© VDA; eigene Darstellung

Abbildung 64: Entwicklung von In- und Auslandsproduktion deutscher OEM

Dies bedeutet, dass die Wachstumsregionen der außereuropäischen Märkte zu einem immer kleiner werdenden Teil durch Exporte aus Europa bedient werden, während die Umsätze im europäischen Heimatmarkt stagnieren.



© VDA; eigene Darstellung

Abbildung 65: Versorgung der außereuropäischen Märkte durch deutsche OEM

Die innereuropäischen Absatzzahlen stagnieren aber seit Jahren. Während der weltweite Absatz der deutschen OEM zwischen 2008 und 2017 insgesamt um 52 % gestiegen ist, wuchs z. B. der deutsche Inlandsabsatz gerade einmal um 9,5 %. In der Summe bedeutet dies, dass die Branche zwar auch in Zukunft von bedeutenden Absatzsteigerungen ausgehen kann, dies aber nur zu einem geringen Teil zu zusätzlicher Wertschöpfung bei den deutschen OEM und Automobilzuliefererwerken führen wird.

Die Beschäftigungseffekte aus der zunehmenden Globalisierung und aus den Produktivitätssteigerungen sowie die spezifischen Beschäftigungseffekte aus dem technologischen Wandel hin zur Elektromobilität überlagern sich in der Realität, sodass Beschäftigungsauf- und -abbau nicht jeweils einzelnen Ursachen zugeordnet werden können. Im Modell zur Abschätzung der Beschäftigungseffekte durch Elektromobilität wurden die Wirkungen des globalen Absatzwachstums auf die jeweiligen Wertschöpfungssegmente in Baden-Württemberg differenziert bewertet und eingerechnet.

Schritt alt_II: Beschäftigte im Bereich PKW-Produktion

Die Beurteilung der Beschäftigungswirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität beschränkt sich auf den Bereich der Herstellung von PKW. Die Anwendung elektrischer Antriebskonzepte bei den Nutzfahrzeugen (mit Ausnahme der Stadtbusse) wird bis ins Jahr 2030 voraussichtlich noch gering ausfallen (siehe auch e-mobil BW, 2017, S. 9, dort liegt eine detaillierte Analyse des Nutzfahrzeugmarktes vor).

Auch hier sind differenzierte Analysen der einzelnen Wertschöpfungssegmente notwendig, um den **Anteil der im PKW-Markt Beschäftigten** zu ermitteln. Für die OEM-Werke konnte die PKW-Abhängigkeit der Beschäftigten aus den Standortanalysen direkt zugeordnet werden. In den Beschäftigtenstatistiken der Bundesagentur für Arbeit werden die Beschäftigten der baden-württembergischen Automobilproduktion zu etwa 88 % der PKW-Produktion und zu 12 % der LKW- bzw. Nutzfahrzeugproduktion zugeordnet. Diese Richtgröße wurde bei der Abschätzung der PKW-Anteile der sonstigen Wertschöpfungssegmente berücksichtigt. Bei den Teilezulieferern wurde im Modell davon ausgegangen, dass der Nutzfahrzeuganteil der Produktion in Deutschland und damit auch in Baden-Württemberg aufgrund der besseren Margen der Nutzfahrzeugteile über dem europäischen Durchschnittswert liegt. Hier wird deshalb ein LKW- bzw. Nutzfahrzeuganteil von 20 % angesetzt.

Etwa 58.100 Beschäftigte des baden-württembergischen Automobilclusters wurden so dem Bereich der LKW- bzw. Nutzfahrzeugproduktion zugeordnet, die anderen ca. **343.300 Beschäftigten zählen zum PKW-Wertschöpfungscluster in Baden-Württemberg.**

Schritt alt_III: Vom Antriebsstrang abhängige Beschäftigte

Nicht alle Beschäftigten der Automobilbranche fertigen Teile und Komponenten für den Antriebsstrang im PKW. Das verwendete Modell differenziert danach, dass die Wertschöpfung der sonstigen PKW-Komponenten (z. B. Karosserie, Interieur) nicht unmittelbar vom Wandel zur Elektromobilität betroffen ist. Deshalb bleiben die in diesem Bereich tätigen Beschäftigten bei der weiteren Betrachtung unberücksichtigt, ihre Anzahl wird vom Ausgangswert abgezogen.

Unstrittig ist, dass sich die Anforderungen der Elektromobilität qualitativ auch auf andere Komponenten auswirken. Beispielsweise werden Anforderungen durch eine Massereduktion oder einen sparsamen Energieverbrauch auch die Konstruktion der Karosserie und des Interieurs erheblich verändern, wenngleich dieser Trend außer mit der Elektromobilität auch mit der anhaltenden Effizienzsteigerung bei Verbrennungsmotoren zusammenhängt. Dadurch sind diese Beschäftigungseffekte nur schwer einzuschätzen, vermutlich werden sich positive und negative Beschäftigungseffekte teilweise kompensieren. Diese Effekte werden in den weiteren quantitativen Schätzungen vernachlässigt.

Im Schritt alt_III müssen deshalb für jedes Wertschöpfungssegment diejenigen Beschäftigten identifiziert werden, die nicht am Antriebsstrang arbeiten. Für die Produktion der OEM konnte die Standortanalyse der Beschäftigung genutzt werden. Die Abschätzungen der weiteren Produktionssegmente stützen sich auf unterschiedliche Datenquellen. Die antriebsstrangabhängigen Beschäftigtenanteile der baden-württembergischen Zulieferer ergeben sich aus der Sonderauswertung einer Betriebsrätebefragung aus einem Vorläuferprojekt des IMU Instituts (Krzywdzinski et al., 2016) sowie der Sonderauswertung einer Betriebsrätebefragung der IG Metall Bezirksleitung Baden-Württemberg im Sommer 2017. Deren Plausibilität wurde durch eine Auswertung der Produktionsstatistik nach antriebsstrangabhängigen Produktgruppen abgesichert. Speziell auf die Entwicklungsdienstleister geht eine Untersuchung des VDA ein (VDA, 2015).

Für die Beschäftigten im Montagewerk der OEM ergeben sich durch die Umstellung auf BEV nur geringfügige negative Beschäftigungseffekte in der Montage der Antriebsstränge, während Presswerk, Rohbau und Lackierstraße unverändert bleiben. Eine Zuordnung der betroffenen Beschäftigten in den einzelnen Produktionsbereichen ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Aus den ELAB-2-Ergebnissen lassen sich die Beschäftigungseffekte in der Montage pro 1 Mio. gefertigter PKW ablesen. Damit kann anhand der jeweils gefertigten PKW-Stückzahlen und Gesamtbeschäftigten der baden-württembergischen Montagewerke auf deren Gesamtbetroffenheit geschlossen werden.

Damit ergibt sich theoretisch bei einer vollständigen Umstellung aller produzierten PKW auf rein batterieelektrische Antriebe (BEV) ein Fade-out-Effekt von –132.800 Beschäftigten in Baden-Württemberg, also ca. 34,7 % der 382.500 Beschäftigten im automobilen Wertschöpfungscluster (im Jahr 2016) ohne Berücksichtigung des Kfz-Gewerbes.

Schritt alt_IV: Ableitung der im Jahr 2030 betroffenen Beschäftigten aus den Szenarien

Die DLR-Szenarien aus Kapitel 4 beschreiben den erwarteten Anteil der einzelnen Antriebsstrangarten in der gesamten europäischen Neuproduktion im Jahr 2030. Für die beiden Szenarien aus Kapitel 4, „Business as usual" (BAU) und „progressiv", werden folgende Faktoren für die Beschäftigungsentwicklung angesetzt. Alle BEV in der Neuproduktion 2030 benötigen keinen Verbrennungsmotor. Damit entspricht der BEV-Anteil der Szenarien dem Abbauanteil der in Schritt III berechneten Beschäftigten. Dieselfahrzeuge benötigen ca. 27 % mehr Wertschöpfung und damit Beschäftigung als Benzinfahrzeuge (ELAB 2). Deshalb wird die Veränderung der Dieselanteile in den Szenarien bezogen auf den Ausgangswert 2016 als zusätzlicher Beschäftigungsfaktor berücksichtigt. Gleiches gilt für den Anteil der Hybridfahrzeuge. Auch sie beinhalten ca. 21 % mehr Wertschöpfung und damit Beschäftigung (ELAB 2). Auch dies wird in der Abschätzung durch einen Faktor berücksichtigt. Dass große Teile der ICE im Jahr 2030 mit elektrischen Nebenaggregaten (48-Volt-Technologie) ausgerüstet sind, ist eine der zugrunde liegenden Annahmen. Die zusätzlichen elektrischen Funktionen sowie das zweite Bordnetz werden zu positiven Beschäftigungseffekten, der Ersatz von bisher mechanischen durch elektrische Nebenaggregate wird zu negativen Beschäftigungseffekten führen. Im Modell kompensieren sich diese beiden Effekte fast vollständig.

	Clustersegment	Beschäftigte 2016	Betroffenheit Fade-out-Szenario BAU 2030		Betroffenheit Fade-out-Szenario progressiv 2030	
OEM	Komponenten	26.000	–1.000	–3,8 %	–7.000	–26,9 %
	FuE	22.500	1.800	8,0 %	–1.300	–5,8 %
	Montagewerk	57.000	1.900	3,3 %	1.800	3,2 %
	Hauptverwaltung	15.500	0	0,0 %	0	0,0 %
Automobilzulieferer WZ 29.3	Komponenten/Teile Wertschöpfungskern	72.500	–500	–0,7 %	–10.000	–13,8 %
	FuE	23.000	400	1,7 %	–2.700	–11,7 %
Automobilzulieferer aus anderen Wirtschaftszweigen	Komponenten	32.000	–1.200	–3,8 %	–4.800	–15,0 %
	FuE Wertschöpfungskern	10.000	200	2,0 %	–1.000	–10,0 %
	Komponenten	26.000	–1.100	–4.2 %	–4.000	–15,4 %
Maschinen- und Anlagenbau WZ 28	Kolben und Motorteile	10.500	–700	–6,7 %	–3.800	–36,2 %
	FuE	3.500	–200	–5,7 %	–1.200	–34,3 %
	Ausrüster	30.000	500	1,7 %	–5.500	–18,3 %
Entwicklungsdienstleister	Für OEM und AZI	15.000	1.300	8,7 %	–300	–2,0 %
Leiharbeitnehmer	Für OEM und AZI	16.000	–100	–0,6 %	–2.100	–13,8 %
Werksinterne Dienstleistungen	Für OEM und AZI	8.000	0	0,0 %	–1.100	–13,8 %
Sonstige Dienstleistungen	Für OEM und AZI	15.000	–100	–0,7 %	–2.000	–13,3 %
Summe Wertschöpfungscluster		382.500	1.200	0,3 %	–45.000	–11,8 %

© eigene Darstellung

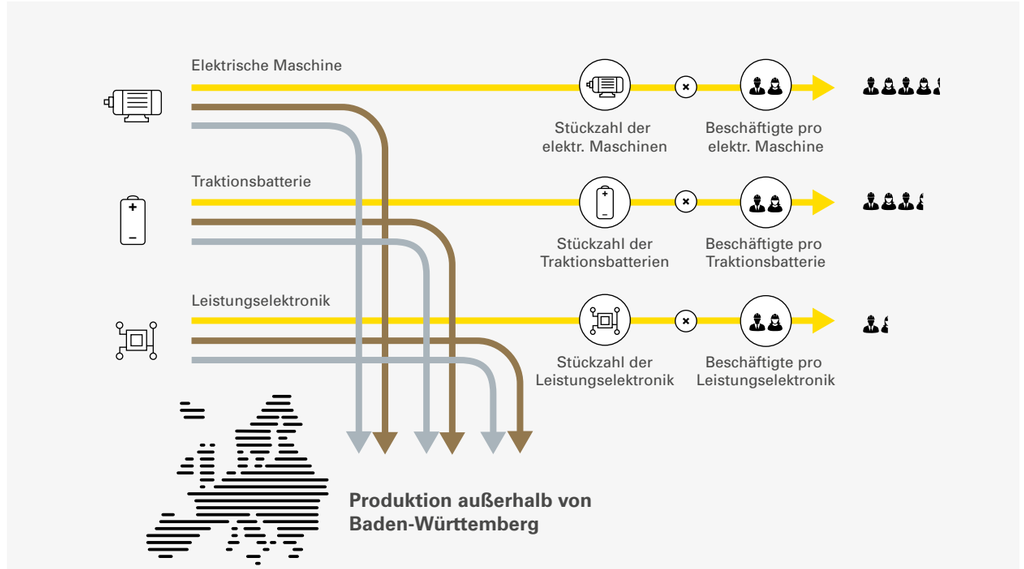
Tabelle 13: Fade-out-Effekte im automobilen Wertschöpfungscluster

Im **Business-as-usual-Szenario** gleichen sich für das automobile Wertschöpfungscluster in Baden-Württemberg bis 2030 die Fade-out-Effekte und kompensatorische Effekte vollständig aus. Rechnerisch ergibt sich sogar ein leichtes Plus von ca. **1.200 Beschäftigten,** das wären ca. 0,3 % der zurzeit hier tätigen Beschäftigten. Dabei wird der Wertschöpfungsabbau mitunter durch die teilweise Partizipation am weltweiten Marktwachstum (+18.900) und durch die erhöhten Wertschöpfungsanteile in den PKW mit Hybridantrieben kompensiert.

Im **progressiven Szenario** wären ca. **45.000 Beschäftigte** negativ vom Fade-out des Transformationsprozesses zur Elektromobilität im automobilen Wertschöpfungscluster betroffen. Das entspricht ca. 11,8 % der zurzeit in diesem Cluster in Baden-Württemberg Beschäftigten. Tabelle 13 verdeutlicht, dass die einzelnen Wertschöpfungssegmente sehr unterschiedlich betroffen sind. Auf die Folgen wird in Abschnitt 5.2.3 genauer eingegangen.

5.2.2 Beschäftigungseffekte bei den neuen Komponenten (Fade-in)

Für die Beschäftigungseffekte durch die „neuen Komponenten" (Elektromotoren, Batteriesysteme und Leistungselektronik) muss ein anderes Vorgehen gewählt werden, da in Baden-Württemberg praktisch noch keine industrielle Produktion besteht, der Veränderungen aus den Szenarien gegenübergestellt werden könnten. Deshalb wird hier wie folgt vorgegangen: Aus Expertengesprächen und insbesondere aus den ELAB-2-Daten kann abgeleitet werden, wie viel Beschäftigung für die Herstellung von 1 Mio. Stück der neuen Komponenten benötigt wird. Aus den DLR-Szenarien ergeben sich für das Jahr 2030 mögliche Stückzahlen der auf dem europäischen Markt benötigten Komponenten. Anhand einer Schätzung der Umsatzanteile der baden-württembergischen Wirtschaft an der gesamten europäischen Produktion kann dann die Beschäftigungswirkung für das Jahr 2030 ermittelt werden. Auch bei diesem Schätzverfahren wird also schrittweise vorgegangen, wie in Abbildung 66 dargestellt.



© IMU Institut

Abbildung 66: Vorgehen zur Ermittlung der Zahl der im Jahr 2030 durch neue Komponenten möglicherweise betroffenen Beschäftigten

Schritt neu_I: Beschäftigungsbedarf in den beiden Szenarien

Aus der Berechnung der Szenarien in Kapitel 4 kann die Anzahl der erwarteten neuen Komponenten abgeleitet werden. Die Multiplikation aus Stückzahlen und Beschäftigten pro 1 Mio. Stück ergibt dann die Beschäftigtenzahl, die zur Produktion der neuen Komponenten gebraucht wird, um die in den Szenarien erwarteten Elektro- und Hybrid-PKW zu produzieren. Die Szenarien beziehen sich auf die PKW-Neuzulassungen in Europa, daher ergibt sich aus diesem Schritt der Beschäftigungsbedarf für die gesamte europäische Produktion.

Komponenten	Stückzahl Szenario „Business as usual“	Stückzahl Szenario „progressiv“
Elektromotor/elektrische Maschine	10.120.323	15.471.538
Batteriesysteme		
Leistungselektronik		

Tabelle 14: Stückzahlen neuer Komponenten im Jahr 2030

© eigene Darstellung

Schritt neu_II: Abschätzung des Anteils der baden-württembergischen Produktion

Die in Schritt neu_I ermittelten Beschäftigtenzahlen sind notwendig, um den europäischen Markt mit neuen Komponenten zu versorgen. Es wird jedoch nur ein Teil der neuen Komponenten in Baden-Württemberg produziert, daher müssen die Marktchancen der baden-württembergischen Produktionsstätten realistisch beurteilt werden. Dazu wurden aus einer Sonderauswertung der Produktionsstatistik die Produktionsanteile der baden-württembergischen Industrie bei vergleichbaren Produktgruppen ausgewertet. Es zeigte sich, dass der Anteil Baden-Württembergs an der europäischen Produktion von Elektromotoren zurzeit bei 5 %, von Batterien bei 3 % und von Elektronik bei 4 % liegt. Diese Produktgruppen-Anteile sind nicht eins zu eins auf die neuen Komponenten übertragbar, weil die technischen Rahmenbedingungen der benötigten PKW-Komponenten zum Teil erheblich von den aktuell gefertigten Produktgruppen abweichen. Auf der anderen Seite veranschaulicht die Produktionsstatistik, dass bei klassischen Automobilzulieferteilen Baden-Württemberg einen Anteil von 9 % des europäischen Produktionswertes herstellt. Bei Getrieben und Getriebeteilen liegt der Wert bei 12 %, bei Teilen für Kolbenverbrennungsmotoren sogar bei 14 %. Wenn es gelingt, die baden-württembergische Industrie optimal auf die Herausforderungen der Elektromobilität auszurichten, sollten ähnlich hohe Produktionsanteile wie bei den klassischen Komponenten erreichbar sein. Unterstellt wurde in dieser Studie der Zielwert eines baden-württembergischen Anteils von 8 % des europäischen Produktionswertes. Dieser Wert richtet sich daran aus, dass die derzeitige starke Stellung der baden-württembergischen Automobilindustrie eben auch mit den Komponenten elektrischer Antriebe erhalten bleiben soll.

Schritt neu_III: Schätzung der Beschäftigungseffekte in Baden-Württemberg

Damit lassen sich nun die Beschäftigungseffekte der Produktion neuer Komponenten für Baden-Württemberg ableiten. Bei den Produktionsbeschäftigten wurden die in Schritt neu_II ermittelten Beschäftigungseffekte proportional zu der aktuellen Arbeitsteilung auf die einzelnen Wertschöpfungssegmente (OEM, AZI, Leiharbeit, Werksdienstleistungen) aufgeteilt.

Für die Abschätzung der Beschäftigungseffekte im Forschungs- und Entwicklungsbereich werden zwei methodische Rechenmodelle eingesetzt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu sichern. Das erste Modell geht von den FuE-Beschäftigten aus, die aufgrund des Wegfalls verbrennungsmotorabhängiger Antriebsstränge betroffen sind. Rechnerisch wird dann ermittelt, wie viel FuE-Wertschöpfung und damit Beschäftigung durch den Ersatz entsprechender E-Mobilitäts-Antriebsstränge entstehen wird. Die ELAB-2-Daten zeigen, dass ein BEV-Antriebsstrang nur etwa 27 % der Wertschöpfung eines ICE-Antriebsstranges benötigt. Diese geringere Antriebsstrangkomplexität wirkt sich auch auf den FuE-Bedarf aus. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass elektrische Komponenten deutlich weniger konstruktiven Entwicklungsaufwand als mechanische Komponenten benötigen. Gegenläufig wurde berücksichtigt, dass bei der Neuentwicklung ganz neuer Produkte und insbesondere bei geringen Stückzahlen ein deutlich höherer Entwicklungsaufwand je gefertigtes Stück entsteht, als dies während der Kammlinienproduktion elaborierter Komponenten notwendig wird. Dies wurde je nach Szenario mit einem zusätzlichen Faktor zwischen 1,5 und 2 berücksichtigt. Das zweite Schätzmodell geht bei den in Schritt neu_III berechneten Produktionszahlen davon aus, dass ca. 15 % der Beschäftigten in Forschungs- und Entwicklungsbereichen arbeiten. Beide Modelle liefern Beschäftigungseffekte in vergleichbaren Größenordnungen.

Beschäftigtengruppen bei den Industrieausrüstern aus dem Maschinen- und Anlagenbau sind ebenfalls negativ betroffen. Hier wird die Reduktion der Teilekomplexität zu einem Rückgang des Maschinenaufwandes führen.

Dies trifft insbesondere auf den automobilabhängigen Werkzeugmaschinenbau zu, während der Anlagenbau weniger betroffen ist. Dies wurde mit einem Komplexitätsaufschlag von 30 % berücksichtigt. Für eventuellen Doppelaufwand ganz neuer Anlagentechniken wird hier ein Aufschlag von 1,2 angerechnet.

In der Summe ergeben sich im Business-as-usual-Szenario daher positive Effekte von ca. 7.500 Beschäftigten für die Produktion der neuen Elektromobilitätskomponenten. Das entspricht ca. 2 % der zurzeit im automobilen Wertschöpfungscluster in Baden-Württemberg tätigen Beschäftigten. Im progressiven Szenario steigert sich der positive Effekt auf ca. 14.800 Beschäftigte (+3,9 %). Dabei wurden die positiven Beschäftigungseffekte rechnerisch entsprechend der heutigen Arbeitsteilung zwischen den Wertschöpfungssegmenten verteilt.

	Clustersegment	Beschäftigte 2016	Neue Komponenten Fade-in-Szenario BAU 2030		Neue Komponenten Fade-in-Szenario progressiv 2030	
OEM	Komponenten	26.000	1.200	4,6 %	1.900	7,3 %
	FuE	22.500	300	1,3 %	800	3,6 %
	Montagewerk	57.000	0	0,0 %	0	0,9 %
	Hauptverwaltung	15.500	0	0,0 %	0	0,0 %
Automobilzulieferer WZ 29.3	Komponenten/Teile Wertschöpfungskern	72.500	1.900	2,6 %	3.000	4,1 %
	FuE	23.000	300	1,3 %	800	3,5 %
Automobilzulieferer aus anderen Wirtschaftszweigen	Komponenten	32.000	700	2,2 %	1.100	3,4 %
	FuE Wertschöpfungskern	10.000	100	1,0 %	300	3,0 %
Maschinen- und Anlagenbau WZ 28	Komponenten	26.000	600	2,3 %	900	3,5 %
	Kolben und Motorteile	10.500	600	5,7 %	1.000	9,5 %
	FuE	3.500	100	2,9 %	300	8,6 %
	Ausrüster	30.000	900	3,0 %	3.400	11,3 %
Entwicklungsdienstleister	Für OEM und AZI	15.000	200	1,3 %	400	2,7 %
Leiharbeitnehmer	Für OEM und AZI	16.000	400	2,5 %	600	3,8 %
Werksinterne Dienstleistungen	Für OEM und AZI	8.000	200	2,5 %	300	3,8 %
Sonstige Dienstleistungen	Für OEM und AZI	15.000	0	0,0 %	0	0,0 %
Summe Wertschöpfungscluster		382.500	7.500	2,0 %	14.800	3,9 %

Tabelle 15: Fade-in-Effekte im automobilen Wertschöpfungscluster durch neue E-Mobilitäts-Komponenten

© eigene Darstellung

5.2.3 Beschäftigungseffekte im Kfz-Gewerbe

Zum Automobilcluster Baden-Württemberg gehört neben der Produktion von Fahrzeugen auch das Kfz-Gewerbe mit den Teilbereichen Handel und Werkstätten, die mit rund 86.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten immerhin knapp ein Fünftel der Beschäftigung tragen. Auch das Kfz-Gewerbe ist vom Wandel zur Elektromobilität betroffen, der sich zudem intensiv mit der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung der Fahrzeuge sowie mit dem autonomen Fahren (Dispan, 2017) überlagert. Betroffen sind alle Geschäftsfelder: der Neu- und Gebrauchtwagenverkauf, der Teile- und Zubehörverkauf sowie das Servicegeschäft – und damit auch Beschäftigung und Wertschöpfung in allen Bereichen.

Zu Auswirkungen der Elektromobilität auf den Aftersales-Bereich liegt eine Studie der Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg vor (e-mobil BW, 2014). Die Studie basiert auf technischen Analysen zum Arbeitsumfang von Wartungs- und Reparaturarbeiten bei unterschiedlich elektrifizierten Antriebskonzepten. Frühere Untersuchungen, wie die ELAB-Studie (Fraunhofer IAO, DLR und IMU, 2012), zeigen, dass die Elektrifizierung des Antriebsstranges langfristig weitreichende Auswirkungen auf die Struktur und den Umfang der Wertschöpfung in der Automobilindustrie, aber auch auf die Kompetenzanforderungen und Qualifikationsbedarfe in Richtung Elektronik, Hochvoltsysteme und Kommunikationstechnik und damit auf Ausbildung und Weiterbildung, hat (Dispan, 2013). Wie in der Automobilindustrie führen Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenautos auch im Kfz-Gewerbe zu Veränderungen bei der Mitarbeiterqualifikation, bei den Serviceprozessen und der technischen Ausstattung der Werkstätten.

Vor allem bei batterieelektrischen Fahrzeugen ergeben sich deutlich niedrigere Wartungs- und Reparaturumfänge sowie ein signifikant niedrigerer Teilebedarf. Bei BEV entfallen sämtliche verbrennungsmotorischen Bauteile sowie der mechanische Antriebsstrang. Dafür sind im Wesentlichen ein Elektromotor, eine Traktionsbatterie und die Leistungselektronik im BEV verbaut. Gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen ergeben sich große Unterschiede hinsichtlich der Wartungs- und Reparaturarbeiten: „Im Hinblick auf die Wartung entfallen sämtliche Arbeiten, die mit dem Verbrennungsmotor sowie dem mechanischen Antrieb zusammenhängen. Demgegenüber müssen die folgenden Arbeiten durchgeführt werden: Kontrolle der Leistungselektronik, Austauschen der Trocknerpatrone sowie je nach Hersteller der Austausch von Kühlmitteln in Batterie- und Leistungselektronik-Kühlkreisläufen. Bei den Verschleißreparaturen entfällt nicht nur die Kupplung, sondern auch die komplette Abgasanlage. Darüber hinaus kann aufgrund der Energie-Rekuperation von einem um ein Drittel reduzierten Verschleiß bei den Bremsbelägen und -scheiben ausgegangen werden“ (e-mobil BW, 2014, S. 16).

Mit dem Wartungs- und Reparaturvolumen sinkt auch das Arbeitsvolumen beim elektrischen Antriebsstrang. Insbesondere bei BEV zeigen sich im Bereich der Verschleißreparaturen deutlich niedrigere Werte, was auf den Wegfall aller verbrennungsmotorischen Reparaturumfänge, aber auch darauf zurückzuführen ist, dass beim Elektroauto statt der eigentlichen Reparatur meist nur ein komplettes Modul (aus dem Baukastensystem) ausgetauscht wird. Während die Arbeitswerte im Reparaturbereich beim Elektroantrieb auf rund ein Drittel gegenüber dem Verbrennungsmotor zurückgehen, verändert sich der Arbeitsaufwand im Wartungsbereich deutlich weniger.

Je nach Marktdurchdringung der Elektroautos könnte es demnach zu signifikanten Rückgängen bei der Beschäftigung im Kfz-Gewerbe kommen. Und auch beim Aftersales-Umsatz zeichnet sich – bedingt durch den Rückgang der Arbeitswerte und den reduzierten Ersatzteilbedarf – eine klar negative Entwicklung ab. Vor allem der Wegfall des Ölbereiches trifft die Ertragslage der Kfz-Betriebe massiv, weil ein hoher Anteil der Rendite aus dem Ölgeschäft stammt. Die wirtschaftliche Lage von Kfz-Betrieben wird sich also voraussichtlich mit der Elektrifizierung des Antriebsstranges deutlich verschlechtern: „Berücksichtigt man, dass auf den Aftersales-Markt rund zwei Drittel des Deckungsbeitrags III in Autohäusern entfällt, so könnte eine stärkere Ausbreitung von Elektromobilen die Ertragskraft der Branche schwächen. Dies gilt vor allem für den Wegfall der Ölumsätze. Insofern stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise die Kfz-Werkstätten neue Geschäftsfelder zur Kompensation dieser Rückgänge erschließen können“ (e-mobil BW, 2014, S. 30).

Neben den Auswirkungen auf Wartungs- und Reparaturumfänge, die für die Kfz-Betriebe direkt umsatz- und beschäftigungsrelevant sind, müssen auch investive und personalpolitische Auswirkungen betrachtet werden. Dazu gehören die Auswirkungen auf die technische Ausstattung der Werkstätten und auf Arbeitssicherheit (Hochvolttechnologie) sowie auf die Qualifikation der Mitarbeiter. Zudem könnte sich durch Elektromobilität der Konsolidierungsdruck im Kfz-Gewerbe erhöhen. Der Konsolidierungsprozess könnte sich durch die zu erwartenden Einbußen im Service und durch zusätzliche Kosten für Werkstattausrüstung und Mitarbeiterqualifizierung beschleunigen (e-mobil BW, 2014).

Zusätzlich zu den Veränderungen im Servicegeschäft wirkt sich der Wandel bei den Antriebskonzepten möglicherweise auch auf den Neuwagenverkauf aus. Der Verkauf von Elektroautos könnte von den Herstellern als Einfallstor für neue Geschäftsmodelle genutzt werden – für den Verkauf von Autos „neuer Marken“ wie EQ oder BMW-i könnte künftig der Online-Direktvertrieb eine größere, wenn nicht die dominante Rolle spielen.

Einer, der im Rahmen der „Branchenanalyse Kfz-Gewerbe“ befragten Experten, bringt die Verbindung der beiden großen Techniktrends beim Automobil – des elektrischen Antriebs und des autonomen Fahrens – und ihre möglichen Konsequenzen für Kfz-Betriebe auf den Punkt: „Die Werkstattarbeiten gehen bereits seit Jahren zurück, weil die Wartungsintervalle länger werden und die Qualität der Fahrzeuge steigt. Mit der Elektromobilität und dem autonomen Fahren wird sich die Lage der Kfz-Betriebe weiter verschlechtern. Wenn Ertragsbringer wie das Ölgeschäft, das Karosseriegeschäft und das Teilegeschäft geschmälert werden, dann entsteht ein immer gewaltigerer Druck auf die Rendite. Elektroautos und autonomes Fahren sind kritische Faktoren für die Beschäftigung im Kfz-Gewerbe“ (Dispan, 2017, S. 62).

Eine Beurteilung der quantitativen Beschäftigungseffekte ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Anders als bei der vorherigen Ableitung, bezieht sich die Abschätzung auf den PKW-Bestand, der die Geschäftsgrundlage für das Kfz-Gewerbe ist und für den in Deutschland bzw. in Baden-Württemberg bis 2030 kein Wachstum erwartet wird. Daher fallen hier die Beschäftigungseffekte mit –0,5 % bis –1,0 % im Betrachtungszeitraum bis 2030 noch sehr gering aus.

5.3 Zusammenfassung der Beschäftigungseffekte des Transformationsprozesses zur Elektromobilität in Baden-Württemberg

Der Transformationsprozess zur Elektromobilität löst einen tiefgreifenden Strukturwandel der Automobilbranche in Baden-Württemberg aus. Im Folgenden werden die zu erwartenden strukturellen Veränderungen in zwei Schritten dargestellt. Im ersten Schritt werden die Beschäftigungseffekte der Gesamtbranche dargestellt. Daraus wird ersichtlich, wie sich die wirtschaftliche Bedeutung der Automobilbranche in Baden-Württemberg im Transformationsprozess zur Elektromobilität entwickeln wird.

Der alleinige Blick auf die Gesamtbranche kann die strukturellen Veränderungen innerhalb der Branche nur unzureichend beschreiben, weil zum Teil große negative Beschäftigungseffekte in einzelnen Produktionsbereichen durch positive Beschäftigungseffekte in anderen Bereichen ausgeglichen werden. So kann es zu gravierenden Beschäftigungseinbrüchen und Standortgefährdungen kommen, auch wenn im Branchendurchschnitt eine ausgeglichene Entwicklung zu beobachten ist. Um diese zweite Dimension der strukturellen Entwicklung zu verdeutlichen, wird im zweiten Schritt eine Einzelanalyse der Auswirkungen für das besonders betroffene Branchensegment der vom Antriebsstrang abhängigen Produktionsstandorte sowie für die zweite besonders betroffene Gruppe der FuE-Beschäftigten vorgelegt.

		Beschäftigte 2016	Betroffenheit Fade-out, Szenario BAU 2030		Betroffenheit Fade-in, Szenario progressiv 2030	
Kfz-Gewerbe	Automobilcluster	86.000	–400	–0,5 %	–900	–1,0 %

Tabelle 16: Beschäftigungseffekte Elektromobilität im Kfz-Gewerbe

© eigene Darstellung

5.3.1 Struktureller Wandel des gesamten Automobilclusters Baden-Württemberg

Grundlage für die Abschätzungen der Beschäftigungseffekte in der Gesamtbranche sind in unserem Modell die bis 2030 zu erwartenden Veränderungen der Absatzmärkte der baden-württembergischen Branchenunternehmen und Standorte. Dabei wurden die internationalen Marktentwicklungen und die in Kapitel 4 dargestellten Marktdurchdringungsszenarien der Elektromobilität berücksichtigt. Folgende drei Punkte müssen bei der Interpretation der Zahlen berücksichtigt werden.

1. Die Modellrechnung abstrahiert von allen betriebswirtschaftlichen Folgen des Transformationsprozesses, der insbesondere im progressiven Szenario zu großen Verschiebungen führen kann. Die vorgelegte Analyse darf deshalb nicht als eine Prognose der realen Beschäftigungsentwicklung in Baden-Württemberg verstanden werden, vielmehr stellt sie dar, in welchem Umfang die heute in der Branche arbeitenden Beschäftigten betroffen sein könnten.
2. Im realen Verlauf des strukturellen Wandels der Automobilbranche überlagern sich die dargestellten Effekte aus Marktentwicklung und technologischem Wandel zur Elektromobilität mit weiteren Branchenentwicklungen (siehe Kapitel 6), die sich insbesondere auf die Produktionsarbeit auswirken werden.
3. Die summarische Entwicklung der Gesamtbranche sagt wenig über die Wirkungen auf einzelne Unternehmen, Standorte und damit auch auf einzelne Wirtschaftsregionen aus, da dies entscheidend von den spezifischen Rahmenbedingungen der einzelnen Standorte abhängt (siehe Abschnitt 5.3.2).

Insgesamt ergibt sich für das Business-as-usual-Szenario, dass die positiven Beschäftigungseffekte in der Branche die negativen Effekte übersteigen. In diesem Modell wäre rechnerisch in der Summe im gesamten Automobilcluster inkl. Kfz-Gewerbe sogar ein Beschäftigungszuwachs von ca. 9.000 Beschäftigten (+1,9 %) zu erwarten.

Im progressiven Szenario ergibt die Modellrechnung insgesamt einen negativen Beschäftigungseffekt von ca. 31.000 Beschäftigten, was etwa 6,6 % der zurzeit im gesamten Automobilcluster in Baden-Württemberg Beschäftigten entspricht.

Der Blick auf die Entwicklung der Gesamtbranche zeigt, dass ein gelungener Transformationsprozess zur Elektromobilität die weltweit besondere Bedeutung des baden-württembergischen Automobilclusters nicht gefährden wird. Selbst das progressive Szenario mit einem möglichen Beschäftigtenabbau von unter 7 % über den Zeitraum von zwölf Jahren kann bei aktiver industrie- und arbeitsmarktpolitischer Begleitung so gestaltet werden, dass die wirtschaftliche Stärke Baden-Württembergs erhalten bleibt oder gar ausgebaut werden kann.

Konkrete Gefahren für die Entwicklung der Gesamtbranche ergeben sich nur dann, wenn die baden-württembergischen Unternehmen und Standorte der Branche ihre Kompetenz und Innovationsführerschaft im technologischen Transformationsprozess verlieren würden. Unsere Modellrechnungen gehen davon aus, dass das Automobilcluster Baden-Württemberg auch bei der Elektromobilität und anderen alternativen Antriebsstrangtechnologien seine weltweit bedeutende Innovationsrolle behält. Diese Voraussetzung wird sich nicht von allein einstellen. Vielmehr sind konzertierte Anstrengungen aller Branchenakteure und eine aktive industriepolitische Unterstützung notwendig, um die besondere Bedeutung des Automobilclusters Baden-Württemberg zu erhalten.

Die Modellrechnung zeigt aber auch, dass die einzelnen Wertschöpfungssegmente sehr unterschiedlich vom Transformationsprozess betroffen sein werden (siehe Tabelle 17). Diese Unterschiede müssen berücksichtigt werden, wenn Unternehmens- und Standortstrategien sowie regional- und industriepolitische Ansätze einen gelingenden Transformationsprozess abstützen sollen.

Die Beschäftigtenentwicklung in den Montagewerken und Hauptverwaltungen der OEM scheint im Transformationsprozess erstaunlich stabil zu bleiben. Dies gilt, obwohl auch hier erhebliche technische und organisatorische Veränderungen notwendig werden, die sich dann sehr wohl auf die interne Beschäftigten- und Qualifikationsstruktur auswirken können.

Quantitativ am stärksten betroffen sind die OEM-Komponentenwerke und die Automobilzulieferer. Fast drei Viertel des abgeschätzten Gesamtpersonalabbaus gehen zulasten der Komponenten- und Teileproduzenten. Hier wirkt sich auch negativ aus, dass dieses Wertschöpfungssegment nur wenig am weltweiten Marktwachstum partizipiert.

	Clustersegment	Beschäftigte 2016	Gesamteffekte Szenario BAU 2030		Gesamteffekte Szenario progressiv 2030	
OEM	Komponenten	26.000	300	1,2 %	–5.100	–19,6 %
	FuE	22.500	2.100	9,3 %	–500	–2,2 %
	Montagewerk	57.000	1.900	3,3 %	1.800	3,2 %
	Hauptverwaltung	15.500	0	0,0	0	0,0
Automobilzulieferer WZ 29.3	Komponenten/Teile Wertschöpfungskern	72.500	1.500	2.1 %	–7.000	–9,7 %
	FuE	23.000	700	3,0 %	–1.800	–7,8 %
Automobilzulieferer aus anderen Wirtschaftszweigen	Komponenten	32.000	–400	–1,3 %	–3.600	–11,3 %
	FuE Wertschöpfungskern	10.000	400	4,0 %	–600	–6,0 %
Maschinen- und Anlagenbau WZ 28	Komponenten	26.000	–500	–1,9 %	–3.100	–11,9 %
	Kolben und Motorteile	10.500	–100	–1,0 %	–2.800	–26,7 %
	FuE	3.500	0	0,0 %	–900	–25,7 %
	Ausrüster	30.000	1.500	5,0 %	–2.100	–7,0 %
Entwicklungsdienstleister	Für OEM und AZI	15.000	1.500	10,0 %	100	0,7 %
Leiharbeitnehmer	Für OEM und AZI	16.000	300	1,9 %	–1.500	–9,4 %
Werksinterne Dienstleistungen	Für OEM und AZI	8.000	200	2,5 %	–800	–10,0 %
Sonstige Dienstleistungen	Für OEM und AZI	15.000	–100	–0,7 %	–2.000	–13,3 %
Kfz-Gewerbe	Automobilcluster	86.000	–400	–0,5 %	–900	–1,0 %
Summe Wertschöpfungscluster (ohne Kfz-Gewerbe)		382.500	9.300	2,4 %	–29.900	–7,8 %
Summe gesamtes Automobilcluster (einschl. Kfz-Gewerbe)		468.500	8.900	1,9 %	–30.800	–6,6 %

Tabelle 17: Beschäftigungseffekte Elektromobilität im gesamten Automobilcluster Baden-Württemberg

© eigene Darstellung

5.3.2 Betroffenheit der vom Antriebsstrang betroffenen Produktionswerke und der FuE-Beschäftigten

Um die umfassenden Wirkungen des Strukturwandels in der Branche beurteilen zu können, muss die Bewertung der Gesamtbranchenentwicklung durch eine Analyse der Wirkungen auf einzelne Standorte und insbesondere auf die Produktionswerke in Baden-Württemberg ergänzt werden. Denn nicht immer kann garantiert werden, dass sich branchenweit ausgleichende positive und negative Beschäftigungseffekte im gleichen Unternehmen bzw. am gleichen Standort realisieren. Der Blick auf die Standortentwicklung ist für die Abschätzung der Entwicklung der Wirtschaftsregion Baden-Württemberg und insbesondere einzelner Landkreise von besonderer Bedeutung.

Die Wirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität für die besonders betroffene Gruppe der Produktionswerke, die sich auf Teile und Komponenten des Antriebsstranges spezialisiert haben, werden deshalb im Folgenden getrennt berechnet. Dazu wurden im Modell die diesen Produktionswerken zuordenbaren Fade-out-Effekte ermittelt. Prinzipiell schlägt der BEV-Anteil in den Produktionsszenarien 2030 direkt auf die Beschäftigten dieser Produktionswerke durch, da der wegfallende Verbrennungsmotoranteil proportional zu negativen Beschäftigungseffekten führt. Im Business-as-usual-Szenario wird von einem BEV-Anteil von 15 %, im progressiven Szenario von 51 % ausgegangen. In beiden Szenarien wird mit einer Abnahme des Diesel- und einer Zunahme des Hybridantriebs gerechnet. Saldiert erhöhen diese beiden gegenläufigen Effekte die notwendige Wertschöpfung und damit auch die Beschäftigung um ca. 2 % bis 3 % der Gesamtbeschäftigten. Die Partizipation an den außereuropäischen Wachstumseffekten führt durchschnittlich zu einem positiven Beschäftigungseffekt von ca. 5 % bis 6 % der Gesamtbeschäftigten.

Bei der Betrachtung des erwarteten Strukturwandels der Produktionswerke können zwei in Kapitel 6 erläuterte zusätzliche Entwicklungstendenzen nicht unberücksichtigt bleiben. Eine jährliche Produktivitätssteigerung von 1,5 % bis 2 % führt im Produktionsbereich zu weiteren negativen Beschäftigungseffekten. Außerdem ist seit Jahren zu beobachten, dass immer größere Produktionsanteile in den europäischen Produktionsnetzwerken – insbesondere der Automobilzulieferindustrie – kontinuierlich in die „Low-Cost Countries“ nach Osteuropa verschoben werden. Im Modell wird davon ausgegangen, dass bis 2030 ca. 5 % der Produktionsarbeitsplätze davon betroffen wären. (Herleitung der Abschätzung siehe Kapitel 6.) Dabei muss berücksichtigt werden, dass zusätzlich zu den Beschäftigten des Produktionswerkes auch ein kleiner Teil an Vertriebs- und Verwaltungsbeschäftigten in den Daten enthalten sind, auf die die angenommenen Produktivitätseffekte nicht vollständig übertragen werden können.

Im zweiten Schritt wurden nun alle produktionsspezifischen Fade-in-Effekte diesen Produktionsbereichen zugeordnet, um damit das Gesamtsaldo der rechnerischen Beschäftigungseffekte der vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerke zu erhalten (siehe Tabelle 18).

		Beschäftigte im Antriebsstrang 2016	Antriebsstrang BAU 2030		Antriebsstrang Progressiv 2030	
Endhersteller (OEM)	Komponenten	16.500	–1.459	–8,8 %	–7.513	–45,5 %
Automobilzulieferer (AZI) WZ 29.3	Komponenten/Teile Wertschöpfungskern	26.100	–2.471	–9,5 %	–11.981	–45,9 %
Zulieferer andere WZ	Komponenten Wertschöpfungskern	10.240	–1.298	–12,7 %	–4.897	–47,8 %
	Komponenten	8.320	–1.098	–13,2 %	–4.004	–48,1 %
Maschinenbau WZ 28	Kolben und Motorenteile	8.400	–795	–9,5 %	–3.856	–45,9 %
Fade-out antriebsstrangabhängige Produktion		**69.600**	**–7.100**	**–10,2%**	**–32.300**	**–46,4 %**
Produktivität und Low-Cost-Country-Strategie			–11.600		–6.800	
Entwicklung ohne Fade-in			**–18.700**	**–26,9%**	**–39.100**	**–56,2%**
Fade-in Potenziale Produktion			5.000		7.900	
Gesamtbilanz der Effekte		**69.600**	**–13.700**	**–19,7%**	**–31.200**	**–44,8%**

Tabelle 18: Beschäftigungseffekte Elektromobilität in den vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerken

© eigene Darstellung

Im Business-as-usual-Szenario werden durch den Wegfall der Verbrennungsmotorkomponenten (Fade-out) ca. 7.100 Beschäftigte (–10 %) negativ betroffen sein. Wenn auch die für Produktionswerke zu erwartenden Produktivitätssteigerungen und Standortverschiebungen in Low-Cost Countries (LCC) berücksichtigt werden, können insgesamt 18.700 Beschäftigte negativ betroffen sein. Das sind fast –27 % der 2016 in antriebsstrangabhängigen Produktionswerken beschäftigten Mitarbeiter. Selbst wenn es gelingen würde, alle in Baden-Württemberg gefertigten neuen Elektromobilitätskomponenten (Fade-in-Effekte) in den bisher vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerken zu fertigen, sind doch ca. 20 % der Beschäftigten negativ betroffen. Damit wird klar, dass selbst im Business-as-usual-Szenario große Anstrengungen aller Branchenakteure notwendig werden, um den Transformationsprozess für möglichst viele Standorte und Beschäftigte zu meistern.

Der Transformationsprozess zur Elektromobilität kann insbesondere gelingen, wenn die Unternehmensstrategien um Konzepte zur nachhaltigen Entwicklung der betroffenen Standorte ergänzt werden, damit möglichst viele neue Komponenten in den hauptbetroffenen Produktionswerken angesiedelt werden. Damit dieser Prozess durch industriepolitische Maßnahmen unterstützt werden kann, sollten diese auf die spezifischen Anforderungen der baden-württembergischen Standorte (statt der Unternehmen) ausgerichtet werden. Insgesamt wären über 18.000 Beschäftigte auf neue Aufgaben im oder außerhalb des Unternehmens zu qualifizieren. Hierzu sind überbetriebliche Qualifizierungskonzepte und zusätzlich arbeitsmarktpolitische Instrumente notwendig, die über Kurzarbeitskonzepte und geregelte Rentenübergänge verhindern, dass ein erheblicher Anteil der Betroffenen in die Arbeitslosigkeit entlassen wird.

Im progressiven Szenario ist im Durchschnitt fast jeder zweite Beschäftigte der antriebsstrangabhängigen Produktionswerke betroffen (46 %, inkl. Produktivitätseffekten 56 %). Insgesamt wären 39.100 Beschäftigte in Baden-Württemberg vom Fade-out der Verbrennungsmotortechnologie negativ betroffen, während ca. 7.900 neue Arbeitsplätze durch die neuen Elektrokomponenten entstehen könnten. Der Strukturwandel stellt diese Produktionswerke vor große Herausforderungen. Hier sind außerordentliche Anstrengungen aller Branchenakteure notwendig, um für möglichst viele Produktionswerke im Antriebsstrang eine nachhaltige Entwicklungsperspektive zu sichern.

Die einzelnen Regionen und Landkreise Baden-Württembergs werden von dieser Entwicklung sehr unterschiedlich betroffen sein. Eine Abschätzung dieser unterschiedlichen Betroffenheit erfordert eine detailliertere Analyse der Branchenstandorte in der Region, denn die Entwicklungsperspektive jedes einzelnen Werkes hängt wesentlich von der spezifischen Ausprägung der in der Modellrechnung berücksichtigten Faktoren ab.

Die Betroffenheitsanalyse zeigt darüber hinaus, dass die **FuE-Beschäftigten** der Branche die zweitgrößte Betroffenengruppe darstellen. Im progressiven Szenario könnten bis zu 3.700 bisherige Arbeitsplätze durch den Transformationsprozess zur Elektromobilität wegfallen. Die Detailanalyse zeigt, dass in diesem Bereich zusätzlich ca. 2.600 Beschäftigte für neue Aufgaben qualifiziert werden müssen, damit der Beschäftigungsabbau nicht höher ausfällt. In dieser quantitativen Schätzung wurde nicht berücksichtigt, dass sich mit der Digitalisierung des PKW neue vielfältige Aufgaben für die Forschungs- und Entwicklungsbereiche und damit weitere Qualifizierungsbedarfe ergeben werden. Damit diese Verschiebung der Aufgaben- und Entwicklungsgebiete so weit wie möglich mit den aktuell beschäftigten Mitarbeitern realisiert werden kann, sind umfangreiche Qualifizierungskonzepte erforderlich, die ca. 10–15 % der über 70.000 FuE-Beschäftigten erreichen können. Diese Herausforderung muss angenommen werden, um die Stärke Baden-Württembergs als Standort industrieller Innovationen (siehe Kapitel 6) zu erhalten.

5.3.3 Zwischenfazit der Beschäftigungswirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität

- Selbst bei einem progressiven Umbau der baden-württembergischen Automobilwirtschaft auf einen BEV-Anteil der Neuwagenproduktion von 51 % bis in das Jahr 2030 wären im Durchschnitt nur ca. 7 % der Beschäftigten im gesamten Automobilcluster negativ betroffen. Angesichts der Bedeutung der Gesamtbranche für die baden-württembergische Wirtschaft, kann dieser Umbau mithilfe strategischer Maßnahmen bewältigt werden.

- Auf der Standortebene und dabei insbesondere bei den vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerken wird die positive Gestaltung erheblich schwieriger. Selbst im Business-as-usual-Szenario werden durchschnittlich über 19 % der Beschäftigten vom Transformationsprozess negativ betroffen sein. Sollte es nicht gelingen, die positiven Fade-in-Effekte gerade in diesen Werken zu heben, kann sich die Betroffenheit auf ca. 27 % erhöhen.

- Schon im Business-as-usual-Szenario sind deshalb große Anstrengungen von Wirtschaft und Politik notwendig, um den Transformationsprozess zur Elektromobilität ohne große soziale und wirtschaftliche Verwerfungen bewältigen zu können. Dabei ist deutlich geworden, dass die industriepolitischen Unterstützungsleistungen gerade die besonders betroffenen Standorte im Fokus haben müssen und dass die nachhaltige Entwicklung der baden-württembergischen Standorte integraler Bestandteil der Unternehmensstrategie im Transformationsprozess sein muss. Trotz all dieser Anstrengungen kann es sein, dass einige der auf den Antriebsstrang spezialisierten Produktionswerke in Baden-Württemberg in Schwierigkeiten geraten. Standortspezifische Maßnahmen können dem entgegenwirken.

- Im progressiven Szenario erscheint die Herausforderung noch größer. Durchschnittlich wäre hier fast jeder zweite Arbeitsplatz, in den vom Antriebsstrang abhängigen Produktionswerken, vom Transformationsprozess betroffen. Hier sind außerordentliche Anstrengungen aller Branchenakteure notwendig, um für möglichst viele Produktionswerke im Antriebsstrang eine nachhaltige Entwicklungsperspektive zu sichern. Umfassende staatlich gestützte Konzepte zur betriebs- und branchenübergreifenden Umqualifizierung, Transferkurzarbeitergeld und Rentenübergangsmodelle könnten genutzt werden. Zur Abfederung dieser Entwicklung könnten sich Unternehmen bereit erklären, für eine Übergangszeit die nachhaltige Standortentwicklung über die optimale wirtschaftliche Nutzung der Standorte zu stellen.

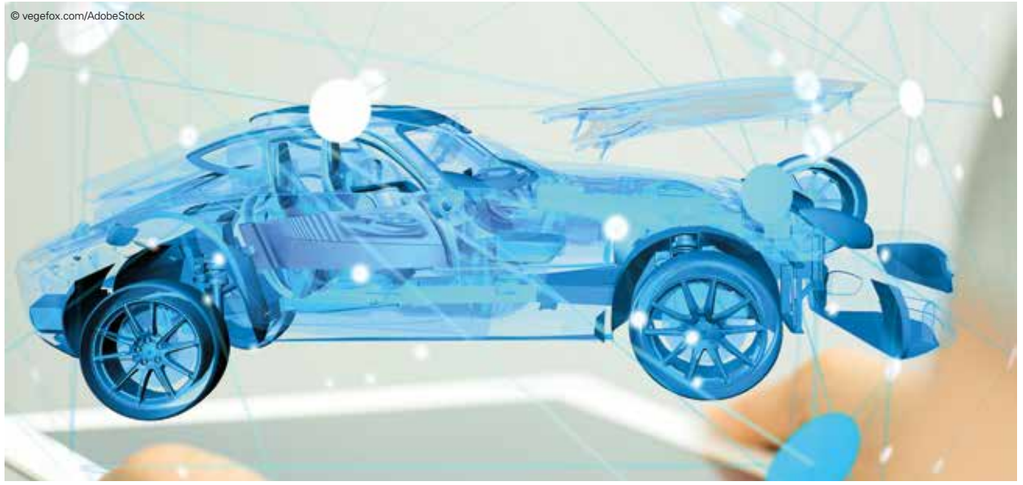
06

Baden-Württemberg als industrielles Innovationscluster

© zapp2photo/
AdobeStock

06

Baden-Württemberg als
industrielles Innovationscluster



© vegefox.com/AdobeStock

In diesem Kapitel wird der, durch den Transformationsprozess zur Elektromobilität ausgelöste, Strukturwandel in der baden-württembergischen Automobilindustrie in die allgemeine Entwicklung der baden-württembergischen Wirtschaftsstruktur eingeordnet. Dabei wird deutlich, dass Elektromobilität nur einer von mehreren Megatrends ist, die Einfluss auf die Struktur der Automobilbranche und alle anderen Branchen in Baden-Württemberg haben. Im Folgenden werden die Auswirkungen von Produktivitätsentwicklung, Digitalisierung der Produktion (Industrie 4.0) sowie weiterer Globalisierung der Produktionsnetzwerke betrachtet. Abschließend wird geklärt, welche Auswirkungen insgesamt auf die Wirtschaftskraft des Landes Baden-Württemberg zu erwarten sind.

6.1 Megatrends und ihr Einfluss auf die Automobilindustrie sowie die gesamte Wirtschaft Baden-Württembergs

6.1.1 Anhaltende Optimierung der Produktion und Produktivitätseffekte

Unabhängig von den Auswirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität ist davon auszugehen, dass sich die Arbeitsproduktivität bis zum Jahr 2030 kontinuierlich steigern wird. Durch die Weiterentwicklung von Produktionstechnologien, -verfahren und -organisation stieg das Produktionsergebnis je Beschäftigtem zwischen 2005 und 2015 um mehr als 15 % (Statistisches Bundesamt, 2017), sodass der Personalbedarf pro Produktionseinheit sinkt und weniger Beschäftigte für die Produktion gleicher Stückzahlen benötigt werden.

Diese Produktivitätseffekte wurden in den Betroffenheitsanalysen der Gesamtbranche in Kapitel 5 nicht berücksichtigt, da deren Effizienzeffekte nicht linear in Beschäftigungseffekte übertragbar sind. Denn Produktivitätssteigerungen reduzieren nicht nur den Personaleinsatz pro Produkteinheit, sie können auch durch entsprechende Preisreduktionen den Absatz der Produkte steigern und damit die negativen Beschäftigungseffekte wieder teilweise kompensieren. Selbst bei den insgesamt stagnierenden PKW-Absatzmärkten in Europa können solche Effekte beobachtet werden. Hier ergibt sich die kostenbasierte Wertschöpfungssteigerung hauptsächlich durch die Erweiterung der Ausstattungsvielfalt im Motor bzw. Fahrzeug (z. B. Ausstattung mit Turbolader).

Ein zweiter kompensatorischer Effekt kann in Deutschland beobachtet werden. Aufgrund der immer höheren FuE-Anteile und der internationalen Produktionsnetzwerke steigt der Anteil der Overheadbeschäftigten in den OEM- und Zulieferkonzernen kontinuierlich an. Von diesem Beschäftigungswachstum profitiert Deutschland in Europa am stärksten (Schwarz-Kocher et al., 2019).

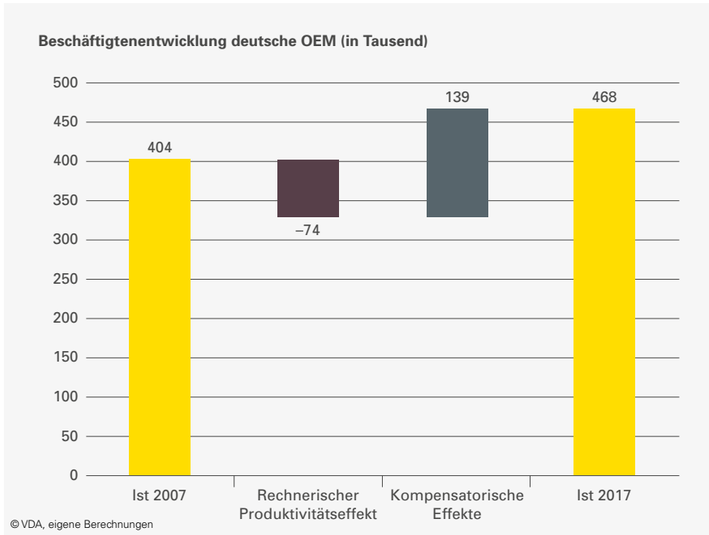
Beide Effekte führen dazu, dass sich Produktivitätsentwicklung und Beschäftigungswirkungen in der deutschen Automobilindustrie entkoppelt haben. Die deutsche Automobilindustrie hat 2007 in Deutschland ca. 5,7 Mio. PKW produziert. 2017 war es mit ca. 5,65 Mio. PKW ca. 1 % weniger. Trotzdem ist die Beschäftigtenzahl bei den Herstellern im gleichen Zeitraum um mehr als 10 % gestiegen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Produktivitätseffekte zwar negativ auf die Beschäftigungsentwicklung in der Branche auswirken werden, deren lineare Überleitung in entsprechenden Beschäftigungsabbau allerdings nicht möglich ist. In qualitativer Hinsicht kann festgehalten werden, dass die Produktivitätseffekte eher zulasten der Produktionsbeschäftigten gehen, während die positiven Kompensationseffekte eher zugunsten anderer Beschäftigter in FuE, Vertrieb und Verwaltung wirken.

In der quantitativen Modellierung (Kapitel 5) wurden deshalb Produktivitätseffekte bei der Bewertung der Beschäftigungseffekte in der Gesamtbranche nicht berücksichtigt, wohingegen sie bei der Analyse des Strukturwandels an den Produktionswerken als bestimmender Faktor mit eingerechnet werden müssen. Dabei wurde im Produktionsbereich eine durchschnittliche Produktivitätssteigerung von 1,8 % pro Jahr angesetzt.

6.1.2 Industrie 4.0 und Digitalisierung

Die Beschäftigungseffekte der Digitalisierung sind aus heutiger Sicht nur schwer abschätzbar. Frey und Osborne (2013) haben für die USA ein Bedrohungsszenario dargestellt, das in den nächsten zehn bis 20 Jahren etwa 50 % der Beschäftigten treffen könnte. Brzesk und Burk (2015) ermitteln in einer Übertragung der Ergebnisse von Frey und Osborne auf



© VDA, eigene Berechnungen

Abbildung 67: Beschäftigtenentwicklung bei den deutschen OEM

Deutschland einen Anteil von ca. 59 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten, Bonin, Gregory und Zierahn (2015) schätzen den Anteil in Deutschland auf etwa 42 %. Kelkar et al. (2017) kommen unter Anwendung der gleichen Methode zu dem Ergebnis, dass 46 % der Beschäftigten der Automobilbranche in Berufen mit hohem Substituierungspotenzial arbeiten.

Dengler und Matthes (2015a, 2015b) kritisieren, dass diese Studien die Ergebnisse von Frey und Osborne übertragen, indem sie die Substituierbarkeit der US-Berufsgruppen auf die deutschen Berufsgruppen umcodieren. Dies sei nicht zulässig, weil sich der deutsche Arbeitsmarkt in mehrfacher Hinsicht vom US-amerikanischen unterscheide, vor allem im Hinblick auf die Qualifikationsstruktur, das duale Bildungssystem und die Tätigkeitsprofile der Berufe. Deshalb nehmen Dengler und Matthes (2015a, 2015b) eine eigene Bewertung der Substituierbarkeit der ca. 3.900 Einzelberufe aus der deutschen Datenbank BERUFENET vor. Dabei werden die einzelnen Kerntätigkeiten des Berufsbildes auf ihre Automatisierbarkeit hin bewertet und schließlich wird das Substituierbarkeitspotenzial als Durchschnitt über alle Kerntätigkeiten gebildet. Berufe mit einem hohen Potenzial von mehr als 70 % werden von Digitalisierungsprozessen besonders betroffen sein. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Fertigungsberufe und die fertigungstechnischen Berufe mit durchschnittlichen Substituierbarkeitspotenzialen von mehr als 70 % bzw. rund 65 % am stärksten betroffen sind. Bezogen auf die Anforderungspotenziale zeigte sich, dass die Helfer und Fachkräfte mit einem Substituierbarkeitspotenzial von mehr als 40 % fast in gleichem Maße betroffen sind und nur bei den Spezialisten und Experten bislang eher geringe Auswirkungen der Digitalisierung bestehen.

Aus diesen Daten ergibt sich ein Anteil von ca. 15 % der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland, die einen Beruf mit hohem Substituierungspotenzial ausüben. Hafenrichter et al. (2016) übertragen diese Bewertungen auf das Land Baden-Württemberg und kommen auf einen Anteil von 17,4 % der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten, die in Berufen mit hohem Substituierungspotenzial arbeiten. Dieser – gegenüber dem Bundesdurchschnitt deutlich höhere – Wert wird mit dem in Baden-Württemberg deutlich höheren Anteil an Beschäftigten in der gewerblichen Wirtschaft erklärt, denn hier sind die Beschäftigtenanteile in den vor allem betroffenen Fertigungs- und fertigungstechnischen Berufen besonders hoch.

Durch die Digitalisierung werden nicht nur Arbeitsplätze rationalisiert. Die digitale Industrie schafft auch neue Arbeitsplätze. Wolter et al. (2015) untersuchen die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von Industrie 4.0 auf Arbeitsmarkt und Wirtschaft in Deutschland. Im Ergebnis zeigt sich, dass in der Gesamtbilanz der Beschäftigungsentwicklung bis 2030 nur ein moderater Beschäftigungsabbau von ca. 60.000 Beschäftigten in Deutschland zu erwarten ist. Allerdings wird sich der Strukturwandel hin zur Dienstleistung beträchtlich beschleunigen und die deutsche Wirtschaft und viele Beschäftigtengruppen vor große Herausforderungen stellen. Rechnerisch ermitteln diese Prognosen, dass ca. 400.000 Beschäftigte ihr Berufsfeld wechseln müssen. Davon müssen ca. 150.000 Beschäftigte auch die Branche wechseln. Am stärksten vom Stellenabbau betroffen werden die Facharbeiter sein, während die Hochschulabsolventen zu den Gewinnern gehören werden.

Eine allein auf technischer Substituierbarkeit von Arbeit beruhende Ableitung von Beschäftigungseffekten berücksichtigt allerdings nicht, inwieweit eine Substitution der Arbeit wirtschaftlich sinnvoll ist. Außerdem kann es Berufe geben, bei denen die nicht substituierbaren Tätigkeitsanteile nicht von ihren substituierbaren Anteilen getrennt werden können. So kann bei einem Facharbeiter in der Montage in seiner regelmäßigen Montagetätigkeit ein hoher Grad an substituierbarer Tätigkeit festgestellt werden. Dagegen wird der Substituierbarkeitsgrad bei den Tätigkeitselementen deutlich geringer ausfallen, bei denen er Prozessfehler erkennt, Prozesse weiterentwickelt und neue Verfahren einführt. Diesen zweiten Teil seiner Tätigkeit kann er aber nur in Zusammenhang mit den substituierbaren Tätigkeitselementen sinnvoll ausführen.

Das ZEW stellt dazu fest, dass sich die hohe technologische Dynamik der Digitalisierung bisher noch nicht in einer höheren Produktivität niederschlägt (Bersch et al., 2018). Eine aktuelle ZEW-Studie (Arntz et al., 2018) berücksichtigt diese Zusammenhänge, bewertet ebenfalls die gesamtgesellschaftlichen Wirkungen der Digitalisierung und stützt ihre Prognosen auf empirische Daten, die nicht nur die Substituierbarkeit von Tätigkeiten, sondern auch den konkreten betrieblichen Technologieansatz beleuchten. Im Ergebnis wird ein langsamerer Durchdringungsprozess für die Industrie-4.0-Technologien erwartet und dementsprechend werden für die nächsten fünf Jahre insgesamt leicht positive Beschäftigungseffekte prognostiziert (+1,8 %). Trotzdem erwartet auch diese Studie erhebliche strukturelle Veränderungen, bei denen die Branchen profitieren, die die neuen Technologien entwickeln und bereitstellen. Aber auch die Anwenderbranchen werden in der ersten Zeit der Entwicklung und Einführung positive Beschäftigungseffekte verzeichnen können, weil neue Lieferketten entstehen können.

Was bedeuten diese Untersuchungsergebnisse für die hier im Fokus stehende Branche Fahrzeugbau? Allgemein wird davon ausgegangen, dass der Fahrzeugbau zu einem der Hauptanwender der neuen digitalen Produktionsstrategien gehören wird. Der hohe Anteil an Fertigungs- und fertigungstechnischen Berufen sowie der hohe Beschäftigtenanteil an Angelernten und Facharbeitern legen hohe Substitutionspotenziale nahe, sodass in der Summe negative Beschäftigungseffekte insbesondere in den Produktionsbereichen der Branche zu erwarten sein werden.

Doch auch hier können generelle Schlussfolgerungen für die gesamte Automobilindustrie nicht im gleichen Umfang auf die baden-württembergische Automobilbranche übertragen werden. Denn gerade die Automobilindustrie in Baden-Württemberg zeichnet ein sehr hoher Anteil indirekter Beschäftigter in den Konzernzentralen und FuE-Bereichen und eine spezifische Innovationsrolle der baden-württembergischen Produktionswerke aus (siehe Kapitel 3). So können die Produktionswerke in Verbindung mit den Innovationszentren in den Unternehmenszentralen im Einführungsprozess der neuen digitalen Produktionskonzepte eine wichtige Pilotrolle übernehmen. Zumindest in der Einführungsphase der nächsten zehn bis 20 Jahre könnten sie deshalb auch zu den Gewinnern des digitalen Wandels gehören. Insgesamt ist zu erwarten, dass der tatsächliche Beschäftigungseffekt der Digitalisierung in der Produktion geringer ausfällt, als dies die Berufsstrukturanalyse erwarten lässt. Qualitativ wird durch die Digitalisierung allerdings der Branchentrend der „Polarisierung des Arbeitsmarktes" fortgesetzt, der auf dem Arbeitsmarkt bereits infolge der Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/2009 beobachtet wurde. Hier wurden in Baden-Württemberg größere Beschäftigungsverluste in Berufen der An- und Ungelernten und insbesondere in der Automobilindustrie festgestellt, wohingegen die Beschäftigung von Ingenieuren insbesondere im Metall- und Elektrobereich stärker als beispielsweise im deutschen Durchschnitt aufgebaut wurde (Rukwid, 2010).

Dies stellt die baden-württembergische Industriepolitik vor neue Herausforderungen. Einerseits muss es darum gehen, mit passenden Qualifizierungsprogrammen die Beschäftigten in der Branche auf die neuen Aufgaben vorzubereiten. „(Weiter-)Bildung ist demnach eines der wichtigsten Handlungsfelder im Kontext der Digitalisierung" (Hafenrichter et al., 2016, S. 38). Andererseits reichen aufgrund der erheblichen Qualifizierungsdifferenzen (z. B. Facharbeiter gegenüber Ingenieur) und aufgrund der zum Teil branchenübergreifenden Verschiebungen (z. B. von Automobilzulieferer zu Softwareunternehmen) einfache betriebliche Fortbildungsprogramme nicht aus, sodass hier neue überbetriebliche Qualifizierungskonzepte gefordert sind.

Wie groß der Bedarf an solchen Umstiegs- und Aufbauqualifizierungen letztlich sein wird, ist heute nur schwierig zu bewerten. Eine wichtige Rolle kann der demografische Wandel der Beschäftigungsstrukturen der nächsten Jahrzehnte spielen. Eventuell kann der Digitalisierungsprozess einen Beitrag zur Kompensation des allseits befürchteten Facharbeitermangels leisten. Klar ist aber schon heute, dass unser gesamtes Bildungssystem intensiv auf die neuen Anforderungen nach hoch qualifizierten Experten ausgerichtet werden muss. Eine wichtige Ressource könnte erschlossen werden, wenn es gelänge, die große Zahl gescheiterter Schul- und Studienkarrieren zu reduzieren. Bundesweit haben 29 % der Bachelor-Studierenden ihr Studium abgebrochen, in Baden-Württemberg waren es 18 %; dabei haben Ingenieurwissenschaftler/-wissensschaftlerinnen und Studierende der Fächergruppe Mathematik und Naturwissenschaften höhere Abbruchquoten (MWFK, 2017).

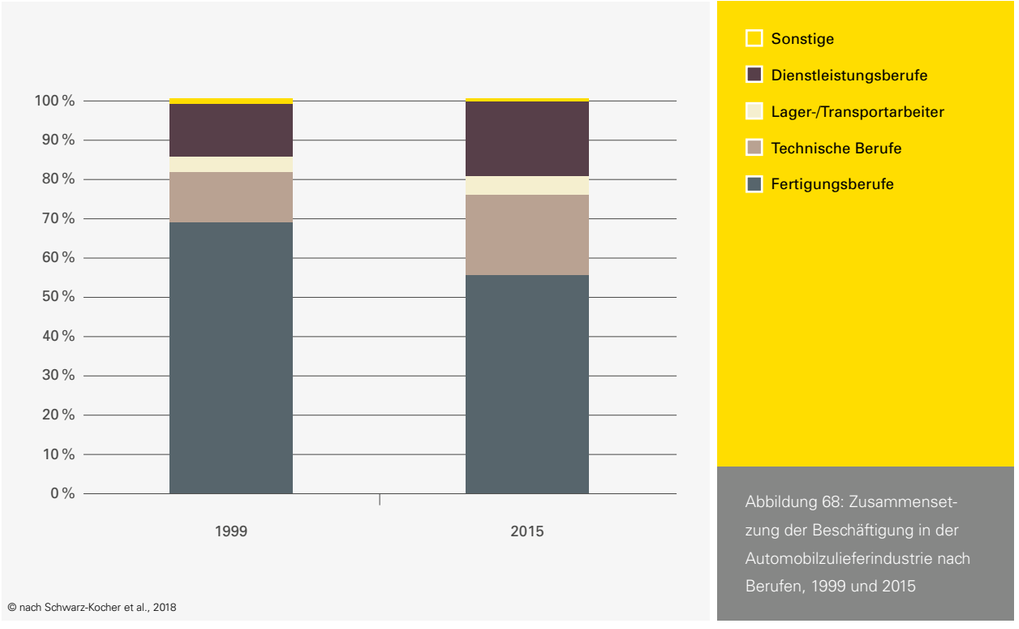
6.1.3 Globalisierung der Produktionsnetzwerke

Die Unternehmen der Automobilbranche sind ähnlich wie die des Maschinen- und Anlagenbaus stark von den weltweiten Märkten abhängig. Dabei zeigen aktuelle Marktentwicklungen, dass die wesentlichen Marktwachstumsimpulse außerhalb Europas zu finden sein werden. Insbesondere China und das übrige Asien waren in den letzten zehn Jahren Wachstumstreiber. Die Automobilindustrie hat auf diese Entwicklung reagiert und in den letzten 20 Jahren das ehemalige globale Exportmodell mehr und mehr auf ein Konzept der regionalen Versorgung umgestellt. Das heißt, so weit wie möglich sollen die drei Weltregionen Europa, Amerika und Asien unabhängige Produktionscluster ausbilden, um die Produkte für die regionalen Märkte zu produzieren. Das führt dazu, dass sich aus dem weltweiten Umsatzwachstum der deutschen Automobilkonzerne nicht mehr eins zu eins ein entsprechendes Beschäftigungswachstum an den deutschen Standorten ableiten lässt. Dies wurde in unseren Betroffenheitsanalysen berücksichtigt (siehe Kapitel 5).

Innerhalb Europas lässt sich aber in der Branche eine weitere strukturelle Veränderung der Produktionsnetzwerke feststellen. Insbesondere in der Automobilzulieferindustrie ist zu beobachten, wie sich der Schwerpunkt der europäischen Produktionsnetzwerke immer mehr nach Osteuropa verschiebt. Die Erschließung dieser sogenannten Low-Cost Countries hat sich zum wichtigen Erfolgsfaktor der Branche entwickelt. Dabei haben die Zulieferkonzerne ein spezifisches Wissen zur Betreuung und zum Aufbau von Hochqualitätsproduktion in diesen Ländern entwickelt (Schwarz-Kocher et al., 2019). Die Dimension dieser Entwicklung wird deutlich, wenn man die Entwicklung der Importe von Zuliefererteilen nach Deutschland analysiert. So sind zwischen 2007 und 2014 die Importe von Zulieferteilen aus Mittelosteuropa von 9,8 Mrd. Euro auf 16,6 Mrd. Euro um knapp 70 % gestiegen, während die Importe aus den süd- und westeuropäischen Ländern von 11,0 Mrd. Euro auf 11,4 Mrd. Euro fast gleich geblieben sind (Schwarz-Kocher et al., 2019).

Die deutschen Produktionswerke kommen durch diese Entwicklung unter Druck, weil aufgrund des Upgradingprozesses an den osteuropäischen Standorten die wachsenden Lohnkostennachteile an den deutschen Standorten nicht mehr automatisch durch höhere Produktivitätseffekte ausgeglichen werden können. Viele deutsche Produktionswerke bilden aber einen wichtigen und unersetzbaren Faktor in dieser internationalen Produktionsstrategie. Wenn sie sich auf ihre Innovationsrolle fokussieren, können sie zum wichtigen Bindeglied zwischen Produktionswissen und Produktinnovation werden und damit eine zentrale Voraussetzung für das spezifische Innovationsmuster der Automobilzulieferindustrie, die „produktionswissensbasierte Produktinnovation" bilden. Diese Umorientierung der deutschen Standorte der Automobilzulieferindustrie lässt sich anhand der Beschäftigungsentwicklung der letzten 20 Jahre deutlich feststellen.

Obwohl die Beschäftigtenzahl insgesamt stabil geblieben ist, hat sich die Zusammensetzung der Beschäftigung stark geändert. Während an vielen Produktionsstandorten der Branche Produktionsbeschäftigte abgebaut wurden, führte die Ausweitung der internationalen Konzernleistungen zu einem kompensatorischen Beschäftigungsaufbau in Forschung und Entwicklung, Vertrieb und Verwaltung. So zeigt eine Auswertung der Berufsstatistiken der Bundesagentur für Arbeit, dass zwischen 1999 und 2015 der Anteil der Fertigungsberufe in der deutschen Automobilzulieferindustrie von 69 % auf 55 % der Gesamtbeschäftigten deutlich zurückgegangen ist (Schwarz-Kocher et al., 2019).



© nach Schwarz-Kocher et al., 2018

Abbildung 68: Zusammensetzung der Beschäftigung in der Automobilzulieferindustrie nach Berufen, 1999 und 2015

Diese Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen, vielmehr könnte der Transformationsprozess zur Elektromobilität den Ausbau der osteuropäischen Produktionsnetzwerke noch beschleunigen. Denn die sinkende Nachfrage nach verbrennungsmotorabhängigen Komponenten wird deren Preise weiter unter Druck setzen, was ihre Verlagerung an „Low-Cost"-Standorte weiter beschleunigen könnte. Insbesondere die Automobilzulieferer stehen durch diese Entwicklung vor weiteren strukturellen Veränderungen, deren Effekte nur schwierig zu quantifizieren sind. Bei einer linearen Fortschreibung der aktuellen Entwicklung würden bis 2030 noch einmal ca. 10 % der Produktionsarbeitsplätze in der Automobilzulieferindustrie nach Osteuropa verlagert. In den letzten 15 Jahren konnte der Aufbau indirekter Tätigkeiten diesen Abbau zwar vollständig kompensieren, aber in Zukunft scheint eher ein Beschäftigungsabbau von ca. 2 % bis 3 % der aktuell in der Automobilzulieferindustrie Beschäftigten realistisch. Das entspricht etwa 5 % der Produktionsbeschäftigten. Bei den OEM wurden osteuropäische Kapazitäten bisher eher zur Abdeckung zusätzlicher Bedarfe eingesetzt. Es ist schwierig abzuschätzen, ob sich diese Strategie bis etwa 2030 wesentlich ändern wird. Derzeit zeichnet sich eher eine stabile Beschäftigung an den deutschen bzw. baden-württembergischen Standorten ab. Bei der Analyse der Beschäftigungseffekte der antriebsstrangabhängigen Produktionswerke wurde deshalb bis 2030 kumuliert ein Low-Cost-Country-Effekt von –5 % der Beschäftigten mit eingerechnet.

Auf jeden Fall wird aber auch dieser Trend dazu führen, dass sich die Beschäftigungsstruktur in der Branche deutlich in Richtung indirekter (hoch qualifizierter) Tätigkeit verschieben wird. Unabhängig von den direkten Beschäftigungswirkungen wird es aber darauf ankommen, dass in der Weiterentwicklung der internationalen Produktionsnetzwerke der Verbund von Produktinnovation und Produktionswissen nicht aufgegeben wird.

Eine nachhaltige Entwicklung der baden-württembergischen Produktionswerke wird dann gelingen, wenn deren strategische Ausrichtung als Innovationswerke gestärkt wird. Unternehmen, die aus Kostengründen alle deutschen Produktionswerke aufgeben und sich hier auf Produktentwicklung und Verwaltung konzentrieren, laufen Gefahr, das branchenspezifische Innovationsmuster der „produktionswissensbasierten Produktinnovation" und damit einen wichtigen Erfolgsfaktor zu verfehlen (Schwarz-Kocher et al., 2019, Voskamp und Wittke, 2012).

6.2 Baden-Württemberg als industrielles Innovationscluster

Baden-Württemberg gilt als die stärkste Industrieregion Deutschlands und zählt zu den bedeutendsten Wirtschaftsregionen in Europa. Dies sichert seit Jahren Wohlstand und Beschäftigung für die baden-württembergische Bevölkerung. Dieser Zusammenhang zwischen Industrie und Wohlstand wird auch in einer feineren regionalen Differenzierung deutlich: In den Landesregionen mit hohem Industrieanteil sind auch überdurchschnittliche Einkommen der Einwohner festzustellen. Insgesamt liegt das durchschnittlich verfügbare Pro-Kopf-Einkommen in Baden-Württemberg um 7 % über dem Bundesdurchschnitt (IW Consult, 2015, S. 48).

Der Fahrzeugbau ist mit Abstand der bedeutendste Wachstumstreiber im Wirtschaftsgefüge Baden-Württembergs (differenziert nach Größe und Dynamik der Branche; McKinsey, IAW, 2010). Circa 470.000 Beschäftigte arbeiten im baden-württembergischen Automobilcluster (siehe Kapitel 3). Das sind mehr als 10 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im Land. Über ein Viertel aller deutschen Beschäftigten im Fahrzeugbau arbeitet in Baden-Württemberg. Der regionale Cluster-Atlas Baden-Württemberg (MWAW Baden-Württemberg, 2016, S. 3) verzeichnet in elf von 13 Regionen ein regionales Automobilcluster. Veränderungen in der Branche wirken sich deshalb besonders bedeutsam auf die Wirtschaftsstruktur und den Wohlstand in fast allen Regionen Baden-Württembergs aus. Der Transformationsprozess zur Elektromobilität und die oben beschriebenen anderen Megatrends der Branche führen dazu, dass die Zahl insbesondere der Produktionsbeschäftigten bis 2030 abnehmen wird.

Was bedeutet dies für die Wirtschaftskraft des Landes und damit für den Wohlstand Baden-Württembergs? Um diese Frage zu beantworten, müssen die Stärke der baden-württembergischen Wirtschaftsstruktur und insbesondere die Rolle des Fahrzeugbaus genauer betrachtet werden. Am jährlichen Wachstum des Bruttoinlandsprodukts kann die spezifische Wirtschaftskraft Baden-Württembergs nicht direkt abgelesen werden. Die liegt nämlich seit Jahren eher im Bundesdurchschnitt, was in einer Studie von McKinsey und IAW kritisch als nachlassendes Wachstumstempo beschrieben wurde. Hier wirken sich möglicherweise die für die Automobilindustrie beschriebenen Verlagerungen der Produktionsschwerpunkte nach Osteuropa bzw. in andere Weltmarktregionen negativ auf das BIP Baden-Württembergs aus.
Dagegen ist unstrittig, dass sich die wirtschaftliche Stärke

Baden-Württembergs seit Jahren mehr und mehr auf eine besonders stark ausgeprägte industrielle Innovationsleistung stützt. In Baden-Württemberg werden 42,9 % der Wertschöpfung in wissensintensiven Wirtschaftssegmenten generiert. Damit übertrifft das Land alle Vergleichswerte der weltweit erfolgreichsten industriellen Wirtschaftsregionen. Besonders auffällig ist, dass sowohl im nationalen als auch im internationalen Vergleich in Baden-Württemberg die wissensintensive Wertschöpfung im Produktionssektor (sekundärer Sektor) höher als im Dienstleistungsbereich (tertiärer Sektor) ist. 22 % der Wertschöpfung im Produktionssektor können dem wissensintensiven Bereich zugeordnet werden – das ist fast doppelt so hoch wie der deutsche Durchschnitt. Davon kommen allein 15 % aus den Branchen Fahrzeugbau und Maschinenbau. Bei den wissensintensiven Wirtschaftsbereichen im Dienstleistungssektor ist Baden-Württemberg eher im Mittelfeld der Vergleichsregionen. Eine Ausnahme sind die unternehmensbezogenen Dienstleistungen, bei denen Baden-Württemberg wieder den höchsten Wert ausweist. Auch bei den klassischen Innovationskennziffern belegt Baden-Württemberg eine Spitzenposition. Bei den Inputfaktoren, wie FuE-Intensität der Wirtschaft, sowie bei den Innovations-Output-Faktoren, wie Patente pro Erwerbstätigem oder Anteil der Beschäftigten in wissensintensiven Branchen, schneidet Baden-Württemberg seit Jahren jeweils als beste Vergleichsregion ab. 2015 lag die FuE-Intensität – der Anteil der Innovationsausgaben am Umsatz des Unternehmenssektors – in Baden-Württemberg mit 4,9 % fast doppelt so hoch wie der Bundesdurchschnitt (2,9 %) und der EU28-Durchschnitt (2 %) (Berger et al., 2017, S. 47 ff., Hagemann et al., 2011, BAKBASEL, 2011, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg).

Diese Daten verdeutlichen, dass sich das baden-württembergische Innovationscluster auf Innovationen im Umfeld der industriellen Produktion spezialisiert hat und dabei weltweit eine führende Position einnimmt. Die nachhaltige Entwicklung der Wirtschaftskraft des Landes wird wesentlich davon abhängen, wie diese spezifische Stärke weiterentwickelt werden kann. Dabei geht es nicht um die Kopie von Erfolgskonzepten aus anderen Hightech-Regionen wie dem Silicon Valley. Vielmehr geht es darum, neue technologische Entwicklungen in das baden-württembergische industrielle Innovationscluster zu integrieren. Künstliche Intelligenz, Big Data und maschinelles Lernen werden auch den industriellen Sektor in der Produktion und im Produkt revolutionieren. Doch diese neuen technischen Impulse müssen für die industrielle Nutzung weiterentwickelt und angepasst werden. Hier liegen große Chancen für das industrielle Innovationscluster Baden-Württemberg.

Unter diesem Blickwinkel ist nun zu fragen, welche Wirkungen auf die Stärken der baden-württembergischen Wirtschaftsstruktur durch die dargestellten Megatrends zu erwarten sind. Soweit diese Trends zu einem Abbau von Beschäftigung führen, geht von ihnen eine Schwächung der Wirtschaftskraft aus. Von größerer Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung der Wirtschaftsregion ist aber die Frage, wie sich die baden-württembergischen Unternehmen und Standorte im Branchenwettbewerb entwickeln. Entscheidend dafür ist nicht die Fortschreibung bestehender Beschäftigungsstrukturen, sondern vielmehr die erfolgreiche innovative Weiterentwicklung der spezifischen Stärken der Wirtschaftsregion. Somit ist zu fragen, wie sich der beschriebene Strukturwandel der Automobilindustrie auf das industrielle Innovationscluster Baden-Württembergs auswirken wird. Die beschriebenen Megatrends können hier neue Impulse für den Ausbau dieser regionalen Stärke bieten.

- Die Transformation der Automobilindustrie zur Elektromobilität erfordert eine große Innovationsleistung im Produkt und in der Produktion. Neue Produkttechnologien erfordern neue Produktionsprozesse und neue Automatisierungskonzepte. Hier kann das industrielle Innovationscluster Baden-Württemberg wichtige neue Impulse liefern. In der engen Verzahnung von Produktionswissen und Produktinnovation könnte der Industrialisierungsprozess der neuen Technologie schneller und erfolgreicher umgesetzt werden als in anderen Regionen. Darüber hinaus könnte ein gelungener Transformationsprozess zur Elektromobilität das industrielle Innovationscluster in Baden-Württemberg weiter stärken, weil damit weltweite Absatzchancen für die neuen Konzepte entstehen könnten.

- Die Digitalisierung der Produktion und Unternehmensverwaltung (Stichwort „Industrie 4.0“) erfordert ebenfalls eine enge Zusammenarbeit von Innovationszentren aus dem Maschinenbau mit den Anwendern der großen Produktionsbetriebe. Auch hier bietet das baden-württembergische Innovationscluster mit einem starken Maschinenbau und einer starken Produktionsanwendungsseite ideale Entwicklungsmöglichkeiten.

- Und schließlich führt die weitere Internationalisierung der Produktionsnetzwerke dazu, dass sich die baden-württembergischen Standorte noch stärker auf die weltweite konzerninterne Innovationsdienstleistung in Produkt und Prozess fokussieren. Diese Entwicklung wird unmittelbar zu einer Stärkung des industriellen Innovationsclusters Baden-Württemberg führen.

Damit wird deutlich, dass der Transformationsprozess zur Elektromobilität und die anderen Megatrends gleichermaßen Risiken wie Chancen für die Wirtschaftskraft Baden-Württembergs bedeuten. Mit dieser Entwicklung könnte die zentrale Stärke der Wirtschaftsregion – das industrielle Innovationscluster – erheblich ausgebaut werden. Voraussetzung dafür ist, dass die notwendigen Rahmenbedingungen für dieses Erfolgsmodell von allen Akteuren erkannt und weiterentwickelt werden. Die Wirtschaft muss sich weiterhin zu diesem industriellen Innovationscluster bekennen. Trotz weiterer Schritte zur Internationalisierung der Produktionsnetzwerke muss sie zum Erhalt des Innovationsverbunds aus Produktion sowie Forschung und Entwicklung beitragen, um im eigenen Interesse ihre Zukunft zu sichern. Ergänzend können Hochschulen, Universitäten und die weiteren staatlichen Forschungseinrichtungen diesen Wandlungsprozess unterstützen und mit vorantreiben. Darüber hinaus helfen neue Bildungs- und Studienkonzepte dabei, dass Fachkräfte für die Weiterentwicklung des industriellen Innovationsclusters verfügbar sind.

Ob und in welchem Umfang die Innovationsimpulse des technologischen Wandels zur Elektromobilität zur Stärkung der Wirtschaftsregion Baden-Württemberg genutzt werden können, hängt wesentlich davon ab, wie schnell sich die Innovationen durchsetzen. Deshalb sollte Baden-Württemberg zum Leitmarkt und Leitanbieter für eine nachhaltige Mobilität und damit zum Vorreiter für den Transformationsprozess zur Elektromobilität werden. Dies kann nur gelingen, wenn sich die Unternehmens- und Standortstrategien, gepaart mit dem Veränderungswillen der Beschäftigten und der Unterstützung aus Politik und Wissenschaft, an diesem Entwicklungsziel ausrichten. Dabei kann die Sicherung einer nachhaltigen Beschäftigungsperspektive der betroffenen Mitarbeiter ein wichtiges Element zur Überwindung von Veränderungshemmnissen werden. Denn nicht die Transformation zur Elektromobilität selbst, sondern verpasste Gestaltungschancen bei deren aktiver Weiterentwicklung können die wirtschaftliche Stärke Baden-Württembergs gefährden.

07 Zusammenfassung und Handlungsoptionen

© Daimler AG

07

Zusammenfassung und Handlungsoptionen

© Audi AG

7.1 Kernergebnisse der Studie

Im Pariser Klimaschutzabkommen haben sich 2015 die Vertreter fast aller Nationen der Welt darauf verständigt, aktive und wirkungsvolle Schritte zur Eindämmung der Folgen des Klimawandels zu ergreifen. Sie haben vereinbart, dass der CO_2-Ausstoß weltweit erheblich reduziert werden muss, um die Erhöhung der weltweiten Durchschnittstemperatur auf maximal 1,5 bis 2 °C zu begrenzen. Um diese international und in der EU vereinbarten Ziele zu erreichen, hat die Bundesregierung einen Klimaschutzplan verabschiedet, der einzelnen Sektoren Minderungsziele zuordnet.

Bis 2030 soll im Verkehr (Straßen-, Schienen-, Maritim- und Luftverkehr) der CO_2-Ausstoß, ausgehend von dem Wert des Jahres 1990, mindestens um 40 % auf ca. 95 Mio. Tonnen CO_2-Äquivalente reduziert werden (Tank to Wheel). Bis 2050 soll dann eine Verringerung bis zu 95 % erreicht sein. Heute emittiert der Verkehrssektor ca. 170 Mio. Tonnen CO_2-Äquivalente. Der Verbrennungsmotor auf Basis konventioneller Kraftstoffe als zentrale Antriebstechnik insbesondere im PKW muss früher oder später durch andere Technologien ergänzt oder ersetzt werden. Trotz Effizienzsteigerungen in den letzten Jahren und der zukünftigen Nutzung weiterer technologischer Verbesserungspotenziale wird es keine Nullemission eines auf fossilen Brennstoffen beruhenden Verbrennungsmotors geben. Weitere Schadstoffbelastungen (NO_X, Feinstaub) in Europa und Asien – insbesondere in den Megacities in China – und anderen Ländern sind zu verringern.

Insbesondere mit Elektromobilität, der wasserstoffbasierten Brennstoffzelle oder synthetischen Kraftstoffen sind verschiedene CO_2-arme oder -neutrale Antriebskonzepte in der Umsetzung, die jedoch in Bezug auf die Versorgungsinfrastruktur und die industrielle Fertigung sehr unterschiedliche Umsetzungsstände haben. China will aus strategischen Gründen und mit staatlicher Unterstützung der Elektromobilität zum Durchbruch verhelfen. Damit wandelt sich Elektromobilität durch die Regulation staatlicher und überstaatlicher Organisationen von der ursprünglichen Idee eines effizienteren, ökologischeren Verkehrs jetzt hin zu einem wettbewerbsorientierten Marktfaktor für die Unternehmen der Automobilindustrie, denn China steht für den wachstumsstärksten und größten PKW-Markt der Welt.

Baden-Württemberg kann auf eine lange und erfolgreiche Geschichte der Automobilindustrie blicken. Hier ist es gelungen, ein komplettes Automobilcluster zu etablieren, das neben international bedeutenden OEM und weltweit operierenden Zulieferern auch viele weltmarktbeherrschende Ausrüster aus dem Maschinen- und Anlagenbau beheimatet. Die Elektromobilitäts-Transformation ist deshalb in Baden-Württemberg nicht nur eine Frage der ökologischen Notwendigkeit. Vielmehr wird die industrielle Stärke Baden-Württembergs durch eine gelungene Transformation weiter ausgebaut, während ein verpasster Umstieg auf die neuen Technologien sich schnell negativ auf die Industriestruktur und den Wohlstand des Landes auswirken könnte.

In der vorliegenden Studie wurden die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten alternativer Antriebsstränge und deren Technologien dargestellt (Kapitel 2). Nicht nur die immer stärkere Elektrifizierung der Antriebe bedingt einen Wandel im Technologieportfolio und in den Wertschöpfungsstrukturen, sondern auch die großen Trends der Digitalisierung, des automatisierten und autonomen Fahrens sowie neue Formen der Produktion (Industrie 4.0) können das Mobilitätssystem verändern und komplett neue Mobilitätsmuster und Geschäftsmodelle schaffen.

In Kapitel 3 wurde die aktuelle Branchenstruktur der baden-württembergischen Automobilindustrie analysiert. Mithilfe eines wissenschaftlich fundierten Modells ist es gelungen, die ca. 470.000 Branchenbeschäftigten einzelnen Clusterebenen und Wertschöpfungssegmenten zuzuordnen. So können die Wirkungen des Transformationsprozesses zur Elektromobilität differenziert für jede einzelne Beschäftigtengruppe abgeleitet werden. Die Marktanalyse hat gezeigt, dass die baden-württembergische Automobilbranche mit einem Exportanteil von 72 % deutlich über dem Bundesdurchschnitt liegt. Allerdings wird nur ca. ein Viertel dieser Exportumsätze in die Wachstumsmärkte außerhalb Europas geliefert. Diese anteilige Partizipation am weltweiten Marktwachstum ist in der Ableitung der Beschäftigungsentwicklung zu berücksichtigen.

Mit dem DLR-Szenariomodell VECTOR21 konnten in Kapitel 4 zwei unterschiedliche Marktdurchdringungsszenarien auf Basis fundierter Analysen der Rahmenbedingungen und deren Einflüsse auf den Markthochlauf berechnet werden. Das Modell ermöglicht die wissenschaftlich verifizierte Simulation des Kaufverhaltens von Neuwagenkunden für den europäischen Markt unter Berücksichtigung komplexer gesellschaftlicher, marktlicher, technologischer und gesetzlicher Rahmenbedingungen, die alle in unterschiedlicher Weise auf die Dynamik und die Intensität der Marktdurchdringung alternativer Antriebsstränge wirken. Damit können unter anderem Preisentwicklungen, politische Regulation, aber auch die Bereitstellung von Produktionsvolumina für unterschiedliche PKW-Antriebsstrangtypen als Prämissen vorgegeben und die Wirkungen auf das Kaufverhalten der europäischen Kunden simuliert werden. Im Ergebnis liegen zwei unterschiedliche Szenarien vor: „Business as usual“ und „progressiv“. Die beiden Szenarien stellen einen möglichen Ergebnisraum für die PKW-Marktentwicklung in Europa bis 2030 bei unterschiedlicher Entwicklung der Rahmenbedingungen und kritischer Stellgrößen dar. Das Eintreten der für die Szenarien formulierten Rahmenbedingungen in Baden-Württemberg ist vor allem von exogenen Faktoren bestimmt.

Das Business-as-usual-Szenario geht von einer Fortschreibung der bestehenden politischen und ökonomischen Ansätze in Europa aus. Die von der EU festgelegten neuen Flottengrenzwerte von 95 g CO_2/km ab 2020 und ein Ziel von 67 g CO_2/km ab 2030 (entspricht –30 %) sind ebenso berücksichtigt wie die aus heutiger Sicht erwartbaren Preisentwicklungen für alte und neue Komponenten sowie der absehbare Ausbau elektrischer Ladestationen auf einen flächendeckenden Versorgungsgrad von 58 %. Davon ausgehend werden 2030 ca. 15 % aller neu zugelassenen PKW in Europa mit einem rein batterieelektrischen Antriebsstrang und ca. 49 % mit einem Hybridantrieb ausgestattet sein. Mit diesem durchaus ambitionierten Transformationsmodell werden die von der EU für 2030 vorgegebenen und von der Bundesregierung geplanten CO_2-Reduktionsziele für den Straßenverkehr im PKW-Sektor erreicht. Jedoch werden die ökologischen Zielwerte der Bundesregierung für 2050 mit der Fortschreibung der Transformationsgeschwindigkeit aus dem Business-as-usual-Szenario über 2030 hinaus verfehlt.

Deshalb wurden im progressiven Szenario einzelne Prämissen nochmals deutlich verschärft. So wird hier ein Flottenverbrauchsziel von 50 g CO_2/km ab 2030 vorgegeben und der flächendeckende Versorgungsgrad an elektrischen Ladestationen auf 75 % erhöht. Zusätzlich wird eine höhere Lernkurve bei der Produktion neuer Komponenten unterstellt, was sich positiv auf deren Preisentwicklung auswirkt. Hier ist im Jahr 2030 ein Mittelklasse-BEV auf dem gleichen preislichen Niveau wie ein hocheffizientes, 48-Volt-elektrifiziertes Benzinfahrzeug. Zudem steigen – das ist eine ganz wesentliche Prämisse – das Modellangebot und das Produktionsvolumen elektrifizierter Fahrzeuge schneller an, sodass der europäische Kunde seine individuellen Bedürfnisse früher und vollständiger aus dem Pool technologischer Optionen befriedigen kann. Die Modellrechnung ergibt, dass unter diesen progressiv gesetzten Rahmenbedingungen 2030 mit ca. 51 % rein batterieelektrischen PKW und 45 % Hybridfahrzeugen zu rechnen sein wird. Mit diesem Produktmix könnten die von der EU vorgegebenen CO_2-Reduktionsziele für 2030 erreicht werden. Eine Fortschreibung auf die Entwicklung bis 2050 veranschaulicht, dass mit diesem progressiven Szenario auch das angestrebte deutsche Sektorziel einer 95 %-Reduktion erreicht werden kann.

Allerdings gelten diese Aussagen für beide Szenarien nur unter der Voraussetzung, dass sich die jährlichen Gesamtfahrleistungen im Verkehrssektor im Vergleich zu 2017 nicht weiter erhöhen und die durchschnittliche Motorleistung der PKW nicht wesentlich steigt. In den letzten zehn Jahren ist die Fahrleistung der PKW nach Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (2018) allerdings um fast 8 % gestiegen. Zudem ist im gleichen Zeitraum die durchschnittliche Motorleistung der PKW um ca. 30 % auf über 150 PS gestiegen, im gleichen Maß hat sich deren Gewicht erhöht. Der Ausbau des öffentlichen Personenverkehrs und Konzepte zur Gewichtsreduktion im PKW können deshalb wichtige Ergänzungen zur Absicherung des Transformationsprozesses zur

Elektromobilität sein. Zudem setzt die Zielerreichung beider Szenarien voraus, dass auch alle anderen Bereiche des Verkehrs mit gleichem Anteil zur CO_2-Verringerung beitragen wie der PKW-Verkehr. Da jedoch zumindest die Verkehrsleistung des Luftverkehrs und des Güterverkehrs in den nächsten Jahren weiter steigen werden, sind Maßnahmen erforderlich, die zumindest über das Business-as-usual-Szenario hinausgehen.

In Kapitel 5 wurden dann die Wirkungen der zwei Szenarien auf die Beschäftigung in der Automobilbranche in Baden-Württemberg modelliert und es wurde die „Betroffenheit" der Beschäftigten abgeschätzt. Diese Schätzung untersucht, welche Beschäftigungseffekte vom Wandel zur Elektromobilität abhängen können, ohne dass eine Prognose im Sinne einer Vorausrechnung möglich ist. Dabei zeigte sich im Business-as-usual-Szenario im Durchschnitt der Gesamtbranche eine positive Beschäftigungsentwicklung, da die positiven Beschäftigungseffekte aus Marktwachstum, Wertschöpfungsausweitung bei Hybridmodellen und Wertschöpfung bei neuen Komponenten die negativen Effekte aus Abbau in der Produktion von Verbrennerkomponenten und Reduktion des Dieselanteils überkompensieren. In den einzelnen Wertschöpfungssegmenten wird es dabei aber zu sehr unterschiedlichen Wirkungen kommen, und es darf nicht verschwiegen werden, dass einzelne Standorte und Unternehmen auch im Business-as-usual-Szenario in existenzielle Schwierigkeiten geraten könnten. Produktionsstandorte, die sich auf den vom Verbrennungsmotor abhängigen Antriebsstrang spezialisiert haben, sind vom Transformationsprozess besonders negativ betroffen. Ca. 10 % der Beschäftigten (inkl. Produktivitätseffekten 27 %) werden vom Umbau negativ betroffen[7] sein. Hier sind große Anstrengungen aller Akteure notwendig, um die Beschäftigten und die baden-württembergischen Standorte auf neue Aufgaben vorzubereiten.

Die aus ökologischer Sicht sinnvolle Entwicklung des progressiven Szenarios zeigt in der Summe negative Beschäftigungseffekte für die Automobilbranche in Baden-Württemberg. Unter Berücksichtigung der unterstellten Rahmenbedingungen wird hier im Branchendurchschnitt bis 2030 die Beschäftigung um etwas weniger als 7 % der gesamten Beschäftigten der Automobilbranche Baden-Württembergs abgebaut. Auch wenn diese Beschäftigungseffekte die führende Rolle der Automobilbranche in Baden-Württemberg wohl kaum gefährden werden, zeigt eine Analyse der auf den Antriebsstrang spezialisierten Produktionswerke die punktuellen Herausforderungen der Transformationseffekte. Durchschnittlich wäre hier fast jeder zweite Arbeitsplatz vom Transformationsprozess betroffen. Der Strukturwandel stellt die Produktionswerke vor große Herausforderungen. Hier sind außerordentliche Anstrengungen aller Branchenakteure notwendig, um für möglichst viele Produktionswerke im Antriebsstrang eine nachhaltige Entwicklungsperspektive zu sichern.

Mit ihren unterschiedlichen Anteilen batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge laufen die beiden Szenarien auf das gleiche Ziel heraus: auf die Transformation zur Elektromobilität. Sie stellen unterschiedliche Geschwindigkeiten bei der Marktdurchdringung der alternativen Antriebsstränge dar. In den beiden Szenarien sind letztlich gleich viele Beschäftigte vom Strukturwandel der Branche betroffen, wenn auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Damit zeigen die Untersuchungsergebnisse einen expliziten Handlungsdruck auf, um sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Ziele im Transformationsprozess zur Elektromobilität zu erreichen.

Der Markthochlauf der Elektromobilität im PKW-Sektor kann durch unterschiedliche interne und externe Einflussfaktoren verlangsamt oder beschleunigt werden. Die Verschiebung der Preisrelationen zwischen Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen zugunsten der Elektrofahrzeuge wird bereits im DLR-Fahrzeugszenariomodell VECTOR21 berücksichtigt. Zudem können neue Automobilanbieter mit offensiver Angebotspolitik Elektrofahrzeuge schon früher zu geringeren Preisen anbieten, so strategisch in den Markt drängen und damit die Entwicklung beschleunigen. Das Eintreten der für die Szenarien formulierten Rahmenbedingungen in Baden-Württemberg ist vor allem von exogenen Faktoren bestimmt.

Die in den Modellrechnungen formulierten Rahmenbedingungen liefern wichtige Hinweise, welche Beiträge die politischen und wirtschaftlichen Akteure leisten können, um einen ökologisch wie wirtschaftlich erfolgreichen Transformationsprozess der Automobilindustrie Baden-Württembergs zu unterstützen. Dieser Prozess beinhaltet weitreichende gesellschaftliche Unsicherheiten und wirtschaftliche Risiken, aber auch die Chance, die weltweite Innovationsführerschaft in der Branche zu erhalten. Dabei ist insbesondere das Business-as-usual-Szenario nicht ausreichend, um zum Erhalt der Technologieführerschaft beizutragen. Je früher und konsequenter sich Politik und Industrie auf die Transformation der Antriebstechnik einstellen, desto besser wird die Bewältigung des Wandels gelingen.

Die auf den Modellrechnungen basierenden Handlungsoptionen sind in drei Abschnitte gegliedert.

7 I Negativ betroffen bedeutet, dass diese Beschäftigten bei einer linearen Überleitung der Marktreduktion der vom Verbrennungsmotor abhängigen Produkte ihren Arbeitsplatz verlieren würden. Unterschiedliche betriebswirtschaftliche Effekte und Marktbereinigungen werden zusätzlich positiven wie negativen Einfluss auf die tatsächliche Beschäftigungsentwicklung entfalten.

I. Leitmarkt nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg – Förderung einer beschleunigten Marktdurchdringung alternativer Antriebsarten.

II. Leitanbieter nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg – Sicherung und Ausbau der Wertschöpfung im Transformationsprozess.

III. Kompetenz- und Innovationscluster Elektromobilität Baden-Württemberg – Sicherung und Ausbau der Beschäftigung für den technologischen Wandel.

Die Handlungsoptionen richten sich an Politik, Wirtschaft und Beschäftigte. Denn nur in einer koordinierten gemeinsamen Anstrengung kann der Transformationsprozess erfolgreich gelingen.

7.2 Handlungsoptionen im Transformationsprozess zur Elektromobilität

I. Leitmarkt nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg – Förderung einer beschleunigten Marktdurchdringung alternativer Antriebsarten

Die Landesregierung hat die Transformation vom Automobil- zum Mobilitätsstandort zum politischen Ziel erklärt. Baden-Württemberg soll zum Leitmarkt für Elektromobilität werden (Landesregierung Baden-Württemberg, 2018). Um mit der hohen Transformationsdynamik in China mithalten zu können, sind Handlungsoptionen gefordert, mit denen die im Business-as-usual-Szenario dargestellten Zielwerte möglichst noch übertroffen werden.

Handlungsoption I – beschleunigter Ausbau der Ladeinfrastruktur

Bei der Unterstützung eines schnelleren Markthochlaufs alternativer Antriebsstränge sollten die Anstrengungen zum Auf- und Ausbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur noch erhöht werden. Im progressiven Szenario wird unterstellt, dass 2030 der Abdeckungsgrad der Ladeinfrastruktur in Europa einen Wert von 75 % erreicht. Nach heutigem Stand liegt der EU-Schnitt bei circa 20 Ladesäulen je 100.000 Einwohner. Um diesen Prozess entsprechend zu beschleunigen, ist eine konzertierte Aktion von Politik, Automobilbranche und Energieversorgern notwendig. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hat dazu ein Ladeinfrastrukturprogramm bis 2020 mit über 300 Mio. Euro aufgelegt. Die Landesregierung hat sich das Ziel gesetzt, Ladeinfrastruktur für Elektroautos bis 2019 flächendeckend einzurichten. Gefördert wird dies unter anderem vom baden-württembergischen Ministerium für Verkehr durch das Projekt „Flächendeckendes Sicherheitsladenetz für Elektrofahrzeuge in Baden-Württemberg" (SAFE), mit dem ein 10-km-Raster mit AC-Ladesäulen bzw. ein 20-km-Raster mit DC-Ladesäulen entsteht. Eine wichtige Unterstützung beim Ausbau der Ladeinfrastruktur wäre auch die Klärung und Reduzierung rechtlicher und verwaltungstechnischer Hürden bei der Genehmigung neuer Ladepunkte.

Handlungsoption II – Kampagne „Mobil ohne CO_2"

Ein Ausbau der Öffentlichkeitsarbeit zur Aufklärung über die CO_2-Problematik des Verkehrs und zur Verdeutlichung der Praktikabilität bereits verfügbarer Elektromobilitätskonzepte kann zu einer Beschleunigung des Transformationsprozesses führen. In einem Ideenwettbewerb könnten Möglichkeiten gesucht werden, um den Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß ansprechend und eingängig zu visualisieren. So kann beispielsweise in Bussen und Zügen veranschaulicht werden, dass klimafreundlich gefahren wird, oder es kann in einer Plakataktion auf den CO_2-Ausstoß unterschiedlicher Fortbewegungsarten und -mittel hingewiesen werden. Alternativ könnte eine App entwickelt werden, die via GPS die zurückgelegten Strecken ermittelt und die jeweils genutzten Verkehrsmittel angibt. Dabei sollte verdeutlicht werden, dass schon heute die allermeisten Fahrten problemlos mit einem BEV bewältigt werden könnten. Bleiben die Nutzer unterhalb eines CO_2-Grenzwertes, nehmen sie automatisch an einem Gewinnspiel teil. Gleichzeitig hätte diese App den Nutzen, dass differenzierte Daten über das Verkehrsverhalten in Baden-Württemberg ermittelt werden, die in ihrer Aktualität und Genauigkeit die Daten aus den beiden großen Erhebungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur „Mobilität in Deutschland" (MiD) und „Deutsches Mobilitätspanel" (MOP) ergänzen.

„Mobil ohne CO_2" hängt eng mit dem Angebot an öffentlichem Verkehr zusammen. Maßnahmen zum Ausbau und zur weiteren Förderung sind kontinuierlich zu prüfen und umzusetzen, denn das Angebot öffentlicher Verkehrsmittel ist ein wichtiges Instrument, um den weiteren Anstieg der Verkehrsleistung beim PKW zu begrenzen. Ebenso gehört die Förderung alternativer Antriebe bei Bussen und Schienenfahrzeugen in diesen Maßnahmenbereich.

Handlungsoption III – Finanzierungshilfen für Schnellumsteiger

Darüber hinaus könnten über bestehende Maßnahmen wie den Umweltbonus der Bundesregierung und den BWe-Gutschein des Landes Baden-Württemberg hinaus Kaufprämien oder sonstige staatlich geförderte Finanzierungsmodelle (Leasing, Carsharing etc.) für eine schnellere Marktdurchdringung sorgen. Die von der Bundesregierung beschlossene Reduktion des zu versteuernden Anteils bei BEV- und PHEV-Dienstwagen kann hier ein Anfang sein. Auch die Fahrzeugflotten des Landes, möglichst der Kommunen sowie weiterer öffentlicher Einrichtungen können mit Blick auf die schnellere Marktdurchdringung noch stärker auf alternative Antriebe umgestellt werden.

II. Leitanbieter nachhaltige Mobilität Baden-Württemberg – Sicherung und Ausbau der Wertschöpfung im Transformationsprozess

Baden-Württembergs derzeitige Stellung als eines der weltweit führenden Innovationscluster der Automobilindustrie kann auch in der Transformation zur Elektromobilität erhalten werden. Zu diesem Zweck müssen sich politisches Handeln – beispielsweise bei der Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen – und unternehmerisches Handeln ergänzen. Mit dem „Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg“ wurde ein Kommunikationsformat gefunden, das eine Abstimmung und Koordination der jeweiligen strategischen Ansätze ermöglicht.

Handlungsoption IV – Stützung des vollständigen Wertschöpfungsclusters für den elektrischen Antriebsstrang

Das von uns vorgelegte Modell der Beschäftigungswirkungen der Elektromobilität setzt voraus, dass die baden-württembergischen Standorte der Automobilindustrie zukünftig auch bei allen wichtigen Komponenten des elektrischen Antriebsstranges führend vertreten sind. Die Modellrechnungen gehen davon aus, dass für die Komponenten Batterietechnik, elektrische Maschinen und Leistungselektronik ca. 8 % des europäischen Produktionsvolumens in Baden-Württemberg erzeugt werden. Dies ist eine große Herausforderung, da bei vergleichbaren Produkten in Baden-Württemberg zurzeit nur zwischen 3 % und 5 % des europäischen Produktionsvolumens gefertigt werden. Im Vergleich dazu werden hier über 12 % der europäischen Verbrennungsmotorkomponenten produziert.

Damit wird deutlich, dass es neben der Batteriezellenfertigung auch bei den weiteren Komponenten des elektrischen Antriebsstranges einer konzertierten Anstrengung von Politik, Wissenschaft und Wirtschaft bedarf. Die Unternehmen müssen den engen Innovationsverbund von Entwicklung und Produktion aufrechterhalten und deshalb auch für die neuen Komponenten Produktionswerke und Kompetenzzentren in Baden-Württemberg sichern beziehungsweise ausbauen. Industriepolitisch kann dies abgestützt werden durch wissenschaftliche Forschungsschwerpunkte für die Grundlagen- und Anwendungsforschung in den Bereichen Elektromotoren, Batterien und Leistungselektronik an den baden-württembergischen Universitäten und Hochschulen sowie durch spezifische Beratungsformate, die gerade für kleinere und mittlere Unternehmen technische Unterstützungsleistungen bieten können.

Handlungsoption V – Unterstützung der Entwicklung neuer Batterietechnologien

Die Lieferfähigkeit kostengünstiger Batteriezellen kann bei einem schnellen Markthochlauf elektrischer Antriebe zum entscheidenden Engpass werden. Die Abhängigkeit von asiatischen Batteriezellenherstellern im Wettbewerb um die Innovationsführerschaft bei den neuen Antriebstechnologien kann so zum entscheidenden strategischen Nachteil werden. Deshalb ist es sehr bedauerlich, dass es noch nicht gelungen ist, eine strategische Allianz der deutschen bzw. europäischen Automobilhersteller zur Produktion von Batteriezellen zu entwickeln. Hier sind industriepolitische Maßnahmen gefordert, die solche strategischen Allianzen anregen und unterstützen. Baden-Württemberg kann dabei eine entscheidende Rolle spielen.

Allgemein wird erwartet, dass eine neue Batteriezellentechnologie die für den Kunden noch einschränkenden Faktoren der Reichweite sowie letztlich der Kosten grundsätzlich lösen könnte und als nächste Generation von Traktionsbatterien die derzeit verbauten Lithium-Ionen-Akkus ablöst. Deshalb wäre die Beschleunigung der Entwicklung und Industrialisierung dieser neuen Batteriegeneration ein wesentlicher Hebel der Transformation zur Elektromobilität. Wenn dieser Innovationsschritt in der deutschen und vor allem in der baden-württembergischen Automobilindustrie vollzogen wird, wäre das ein bedeutender Beitrag zur Absicherung der hiesigen Innovationskompetenz. Ein wichtiger Schritt ist daher die Förderung einer digitalisierten und damit industriellen Batteriezellenproduktion und des Aufbaus eines europäischen Prüf- und Kompetenzzentrums für Batterien und Energiespeicher durch die baden-württembergische Landesregierung. Dieser Forschungsbereich sollte mittel- bis langfristig so ausgestattet werden, dass die derzeit herausragende Stellung Baden-Württembergs bei der Forschung zu und der Entwicklung von Verbrennungsmotoren auch bei der Elektromobilität gehalten werden kann. Ein weiteres Ziel wäre eine eigenständige „Forschungsgesellschaft Traktionsbatterie 2030“, die die Forschungsaktivitäten aller deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen bündelt und für die Mitarbeit von Branchenunternehmen offensteht. Dabei sollten, verteilt auf die beteiligten Bundesländer, Produktionslabors für die Industrialisierung der neuen Zellentechnologien integriert werden. In diesem Verbund können schon heute Batteriezellenfabriken der aktuellen Zellengeneration aufgebaut werden, die dann als Keimzelle der Produktionslabors die hier gewonnenen Produktionserfahrungen nutzen.

Handlungsoption VI – Koordinationsstelle „E-Komponenten-Werk“ für nachhaltige Standortentwicklung

Im Transformationsprozess zur Elektromobilität sind insbesondere die antriebsstrangabhängigen Zulieferer und OEM-Komponentenwerke gefordert. Die Analyse hat gezeigt, dass negative Beschäftigungseffekte zu 75 % diesem Wertschöpfungssegment zuzuordnen sind. Hier braucht es intelligente Unternehmensstrategien, damit die aktuelle Marktstärke auch in die neue Welt überführt werden kann. Doch nicht jede Unternehmensstrategie berücksichtigt eine nachhaltige Entwicklung aller Produktionsstandorte in Baden-Württemberg. Die industriepolitische Unterstützung im Transformationsprozess darf sich deshalb nicht allein auf die baden-württembergischen Unternehmen konzentrieren. Sie muss zusätzlich auch immer die nachhaltige Entwicklung der baden-württembergischen Standorte und hier insbesondere der Produktionswerke im Fokus haben.

Es gibt bereits Beispiele, wie nachhaltige Standortentwicklung in die Unternehmensstrategie integriert werden kann. In einem Projekt wurden deutsche Standorte eines Automobilzulieferers auf ihre Betroffenheit im Transformationsprozess und ihre spezifischen Standortkompetenzprofile untersucht. Im zweiten Schritt werden diese Kompetenzen auf der Grundlage der zukünftigen technologischen Anforderungen der Elektromobilität bewertet und Entwicklungspotenziale abgeleitet. Daraus entsteht dann ein Maßnahmenbündel, das schon heute den Standort für die neuen Anforderungen von morgen weiterentwickeln kann. Auch wenn in einem solchen Projekt nicht für jeden Standort neue Produkte für die Elektromobilität gefunden werden können, so erhöhen sich doch die jeweiligen Standortchancen im Transformationsprozess deutlich.

Dieses Beispiel kann nur Schule machen, wenn die Unternehmen zur Weiterentwicklung der baden-württembergischen Standorte als Kompetenzbasis auch für die neuen Produkte bereit sind. Die Politik kann fruchtbare Unterstützung leisten, wenn spezifische Beratungsformate und technische Unterstützung aus unterschiedlichen Fachbereichen der Universitäten und Hochschulen diesen Standortentwicklungsprozess aktiv unterstützen. Der im Auftrag des Wirtschaftsministeriums geplante „Technologiekalender Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg (TKBW)“ oder die verschiedenen Angebote der Mittelstandsoffensive Mobilität können hier wichtige Orientierung und Unterstützung bei der Zuordnung von Standortkompetenzen und zukünftigen Kompetenzanforderungen geben. Der seit 2007 bestehende Cluster Elektromobilität Süd-West bietet ein mehr als 140 Partner umfassendes Netzwerk für die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit über die Branchengrenzen hinweg. Der Cluster ermöglicht eine bessere Vernetzung von Forschung und Industrie, vor allem KMU.

Eine landesweite Koordinierungsstelle „E-Komponenten-Werk Baden-Württemberg“ kann die Hochschulkompetenzen systematisch für die Unterstützung der nachhaltigen Standortentwicklung erschließen und spezifische Beratungsangebote koordinieren. Diese Koordinierungsstelle könnte im Rahmen des Clusters Elektromobilität Süd-West realisiert werden. Im Rahmen von Forschungsprojekten sollte die Rolle der Verbindung von Produktionswissen und Produktinnovation am Beispiel des Transformationsprozesses zur Elektromobilität untersucht werden. Dabei sollte die Bedeutung der Innovations- und Leitwerke in räumlicher Nähe zu den Entwicklungszentren auch betriebswirtschaftlich bewertet werden.

III. Kompetenz- und Innovationscluster Elektromobilität Baden-Württemberg – Sicherung und Ausbau der Beschäftigung für den technologischen Wandel

Der Transformationsprozess der baden-württembergischen Automobilindustrie kann nur gelingen, wenn die dazu benötigten Beschäftigten für die neuen Aufgaben adäquat qualifiziert werden. Die Analyse der Beschäftigungseffekte hat gezeigt, dass sich die Folgen bei den Beschäftigten der Clustersegmente sowohl im Umfang als auch in ihrem Verlauf deutlich unterscheiden. Deshalb müssen passende Personalentwicklungskonzepte auf die Anforderungen der unterschiedlichen Beschäftigtengruppen eingehen.

Handlungsoption VII – Aufbaustudiengang für Ingenieure/Ingenieurinnen in Forschung und Entwicklung

Entsprechend dem progressiven Szenario werden 2030 im Saldo mehr als 5 % der Beschäftigten in Forschung und Entwicklung negativ betroffen sein. Aufgrund der Digitalisierung der PKW werden im FuE-Bereich genügend neue Aufgaben entstehen, um rein quantitativ die Betroffenen zu beschäftigen. Voraussetzung ist aber eine fachliche Neuausrichtung der Entwickler auf zum Teil völlig neue Aufgabenbereiche. Auch für die Entwickler der neuen Komponenten der Elektromobilität besteht Qualifizierungsbedarf. Insgesamt müssen deshalb etwa 10 % bis 15 % der zurzeit rund 74.000 FuE-Beschäftigten der Branche für neue Aufgaben qualifiziert werden. Für diese Beschäftigtengruppe sollten Qualifizierungsangebote entwickelt werden, mit denen sie sich für die Konstruktion und Entwicklung der Komponenten für die Elektromobilität oder die Digitalisierung der Fahrzeuge qualifizieren können. Dies sprengt inhaltlich und zeitlich den Rahmen betrieblicher Qualifizierungsangebote.

Hierfür könnten Universitäten und Hochschulen berufsbegleitende Aufbaustudiengänge entwickeln und anbieten. Zwischen den Betriebs- und Tarifparteien sollten dazu Freistellungs- und Finanzierungskonzepte entwickelt werden. Eine gelungene Umqualifizierung eröffnet nicht nur den betroffenen Entwicklern und Entwicklerinnen eine neue Beschäftigungsperspektive, sie hilft auch den Unternehmen dabei, ihre Personalbedarfe in den strategisch wichtigen neuen Entwicklungsbereichen abzusichern. Da von diesem Kompetenzaufbau auch die Unternehmen deutlich profitieren, ist deren finanzielle Beteiligung an den Kosten des Aufbaustudienganges zu prüfen. Schon heute gibt es erste Beispiele eines Zulieferkonzerns, der bereits in Kooperation mit baden-württembergischen Hochschulen ein entsprechendes Qualifizierungskonzept für Ingenieure und Ingenieurinnen entwickelt hat.

Die Qualifizierungsbedarfe sollten dabei gemeinsam mit Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Hochschulen/Universitäten formuliert werden. Im Sinne größerer Öffentlichkeitswirksamkeit ist hier auch eine gemeinsame Konferenz denkbar, ein „Fachtag Qualifizierung zur Elektromobilität", der gemeinsam mit Südwestmetall, IG Metall und der gemeinsam eingerichteten „Agentur Q" veranstaltet wird. Das Qualifizierungskonzept sollte in einem Forschungsprojekt entwickelt und verifiziert werden.

Handlungsoption VIII – Qualifizierungsangebote und neue Beschäftigung für Produktionsbeschäftigte

Beschäftigte aus der Produktion sind vor allem bei den Zulieferern und in der Komponentenfertigung der Endhersteller betroffen. Im progressiven Szenario sind die Beschäftigten in den OEM-Komponentenwerken und die Teilefertiger in der Zulieferindustrie mit mehr als 13 % am stärksten vom drohenden Beschäftigungsabbau betroffen. Das heißt, circa 22.000 Beschäftigte müssen für neue Arbeitsplätze in anderen Branchen qualifiziert werden. Zusätzlich müssen hier circa. 5 % der Beschäftigten für neue Aufgaben in der Produktion neuer Komponenten qualifiziert werden.

Aber auch die Beschäftigtenbereiche in der Montage und im Kfz-Gewerbe, die wenig von Arbeitsplatzverlust bedroht sind, müssen sich auf neue Anforderungen am Arbeitsplatz einstellen. Hier zeichnet sich mittelfristig Handlungsbedarf ab, wenn spätestens 2025 die (Massen-)Produktion batterieelektrischer Fahrzeuge in Serie geht. Hier sollten bei der Produktionsumstellung Qualifizierungsangebote für den Umgang mit den zunehmend elektrifizierten Antrieben verfügbar sein (vgl. Dispan, 2018).

Die Arbeitsagenturen in Baden-Württemberg entwickeln zurzeit spezielle Beratungs- und Qualifizierungskonzepte, um den Anforderungen aus dem Transformationsprozess der Automobilbranche gerecht zu werden.

Handlungsoption IX – Förderung der digitalen Kompetenzen der Automobilbranche

Digitalisierung und künstliche Intelligenz als Megatrends betreffen sowohl das Produkt „Auto" im engeren Sinne durch die Erweiterung von Funktionen (Vernetzung, autonomes Fahren) als auch neue Mobilitätsdienstleistungen und Geschäftsmodelle. Die Ausbildung und Qualifizierung von Informatikern und Informatikerinnen, von Software-Experten und -Expertinnen und die Frage, wie sie als Arbeitskräfte für baden-württembergische Unternehmen gewonnen werden können, ist eine gemeinsame Herausforderung für das Land mit seinen Kommunen sowie für die Unternehmen. Entsprechende Forschungsschwerpunkte an den baden-württembergischen Hochschulen sowie Forschungsprojekte und entsprechende Weiterbildungskonzepte können hier wichtige Impulse für die Wirtschaft liefern.

Bekanntlich fällt es vielen Branchenunternehmen, insbesondere in den ländlichen Regionen Baden-Württembergs, schwer, entsprechende Experten an ihrem Standort zu verpflichten. Hier kann es helfen, wenn sich an den baden-württembergischen Universitäten und Hochschulen international anerkannte Zentren für die neuen Aufgaben entwickeln. Denn eine Rekrutierung von Experten, die in der Region studiert haben, fällt in der Regel leichter als deren Anwerbung aus anderen internationalen Forschungszentren. Aber auch neue Kooperationsformen zwischen interner FuE und externen Softwareunternehmen können hier notwendig werden.

Handlungsoption X – Unterstützung des Markteintritts neuer Angebote durch Unternehmensgründungen und Hilfen für bestehende Unternehmen

Besondere Bedeutung haben die Schnittstelle von der Forschung in den Markt beziehungsweise der Technologietransfer von Forschungseinrichtungen in Unternehmen. Die Unterstützung des Marktübergangs neuer Technologien stützt das Automobilcluster und kann Beschäftigung und Wertschöpfung in Baden-Württemberg sichern. Denkbar wäre hier eine auf Elektromobilität und neue Mobilitätskonzepte ausgerichtete Förderung von Start-ups bzw. Unternehmensgründungen, beispielsweise ein „Mobilitäts-Pitch" durch die Mittelständische Beteiligungsgesellschaft Baden-Württemberg. Diese Förderung sollte besonders auf Start-ups zielen, die sich mit Innovationen in der Produktion befassen und damit die Stärke Baden-Württembergs stützen. Gerade für die produktionswissensbasierten Start-ups könnten ergänzende Angebote geschaffen werden, beispielsweise durch die Vernetzung mit baden-württembergischen kleinen und mittleren Unternehmen, die beispielsweise – finanziert aus Landesmitteln – Beratung und Bau von Prototypen übernehmen könnten. Hierfür können auch bestehende Netzwerke wie der Cluster Elektromobilität Süd-West oder der Cluster Brennstoffzelle BW eine gute Plattform bieten. Ein weiteres Instrument wäre eine Übergangsförderung für bestehende Unternehmen des Clusters, die für die Neuausrichtung ihrer Produkte und Geschäftsmodelle auf Elektromobilität oder andere Antriebe in den nächsten Jahren einen höheren Entwicklungsaufwand haben, beispielsweise durch das Angebot befristeter Unternehmensbeteiligungen. Außerdem könnte der in Baden-Württemberg etablierte Hightech-Award „Cyber One" um eine vierte Kategorie zu Mobilität bzw. Mobilitätsdienstleistungen ergänzt werden.

Handlungsoption XI – Arbeitsmarktinstrumente zur Begleitung des Strukturwandels entwickeln

Soziale Unsicherheiten im Transformationsprozess zur Elektromobilität können zum entscheidenden Hemmnis für eine ambitionierte Veränderungsgeschwindigkeit werden. Deshalb sollte der Transformationsfokus auf die nachhaltige Entwicklungsperspektive möglichst vieler Branchenbeschäftigter gerichtet sein. Allerdings werden nicht alle Betroffenen wieder eine Beschäftigung finden, sodass sozialverträgliche Konzepte zur Moderation des Strukturwandels notwendig werden. Zu diesem Zweck sind spezifische arbeitsmarktpolitische Instrumente von der Politik und den Sozialpartnern zu entwickeln.

So können z. B. spezifische Strukturkurzarbeitsmodelle den Branchenumbau abfedern oder tarifliche und gesetzliche Möglichkeiten den Rentenübergang für besonders betroffene Beschäftigungsgruppen erleichtern.

Schlussbemerkung

Der Strukturwandel zur Elektromobilität wird stattfinden. Heute kann er noch so gestaltet werden, dass die Wirtschaftskraft Baden-Württembergs davon profitiert. Die hier vorgestellten Handlungsoptionen sollen Anregungen für eine breite Debatte aller Akteure liefern, die dann selbst die passenden Maßnahmen für einen erfolgreichen Transformationsprozess zur Elektromobilität entwickeln sollten.

Literaturverzeichnis

Absenger, N., Ehlers, E., Herzog-Stein, A., Lott, Y., Maschke, M., Schietinger, M. (2016): Digitalisierung der Arbeitswelt!? Ein Report der Hans-Böckler-Stiftung. Düsseldorf: Hans Böckler Stiftung.

ADAC (Hrsg.) (2014): ADAC deckt Sicherheitslücke auf. Online verfügbar unter https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/bmw-luecke.aspx, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

ACEA (2017): Vehicles in use – Europe 2017.

ACEA (2018): Alternative fuel vehicle registrations. Abgerufen am 20.02 2018 von http://www.acea.be/statistics/tag/category/electric-and-alternative-vehicle-registrations

Amsterdam Round Tables (2014): EVolution – Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase. Amsterdam.

Anderson, D. (2009): An evaluation of current and future costs for lithium-ion batteries for use in electrified vehicle powertrains. Duke University Press.

Arndt, W.-H., Döge, N., Marker, S. (2016): Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.

Arntz, M., Gregory, T., Jansen, S., Zierahn, U. (2016): Tätigkeitswandel und Weiterbildungsbedarf in der digitalen Transformation. Mannheim: Studie des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) und des Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB) im Auftrag der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

Arntz, M., Gregory, T., Zierahn, U. (2018): Digitalisierung und die Zukunft der Arbeit: Makroökonomische Auswirkungen auf Beschäftigung, Arbeitslosigkeit und Löhne von morgen. Mannheim (= ZEW-Studie).

Autonomes Fahren & Co. (Hrsg.) (2012): Lidar. Licht-Radar. Online verfügbar unter http://www.autonomes-fahren.de/lidar-licht-radar/, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Baader, M. (2015): Wo ist der Platz der deutschen Automobilindustrie in der internationalen Produktionskette? (Vortrag auf der Automobilkonferenz der IG Metall Bayern am 02.07.2015 in Nürnberg.)

Baden-Württemberg Stiftung (Hg.) (2017): Mobiles Baden-Württemberg. Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität. Stuttgart.

Bach, Moritz (2016): Autonomes Fahren und gesetzliche Grundlagen. Online verfügbar unter https://www.uni-koblenz-landau.de/de/koblenz/fb4/ist/AGZoebel/Lehre/sommer2016/SeminarASidA/A1, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

BAKBASEL – BAK Basel Economics AG (Hrsg.) (2011): Innovationskraft Baden-Württemberg: Erfassung in Teilregionen des Landes und Beitrag zum Wirtschaftswachstum.

Bauer, Wilhelm; Dispan, Jürgen; Friedrich, Horst E.; Spath, Dieter; et al. (2012): Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB). Studienergebnisse. Düsseldorf (Hrsg.: Hans-Böckler-Stiftung).

Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.

BBC (Hrsg.) (2015): Fiat Chrysler recalls 1.4 million cars after Jeep hack. Online verfügbar unter http://www.bbc.com/news/technology-33650491, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

BBSR (19.06.2017): Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Immer mehr Menschen pendeln zur Arbeit. Bonn.

BDEW (2017): Erneuerbaren-Anteil liegt 2017 bei über 36 Prozent. Abgerufen am 12.02.2018 von https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/erneuerbaren-anteil-liegt-2017-bei-ueber-36-prozent/

BDEW (21.01.2019) Hamburg weiter Spitzenreiter im Städteranking. Abgerufen am 18.02.2019 von https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/hamburg-weiter-spitzenreiter-im-staedte-ranking/

Berger, Marius; Boockmann, Bernhard; Felbermayr, Gabriel; Klempt, Charlotte; Koch, Andreas; Kohler, Wilhelm, Lerch, Christian; Neuhäusler, Peter; Rammer, Christian (2017): Strukturanalyse und Perspektiven des Wirtschaftsstandortes Baden-Württemberg im nationalen und internationalen Vergleich. Tübingen, Mannheim, München und Karlsruhe (herausgeben von IAW, ZEW, Ifo Institut und Fraunhofer ISI)

Berlemann, M., Freese, J., Luik, M.-A., Wesselhöft, J.-E., Ragnitz, J. (2012): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger. Berlin: BMVI.

Bernhart, W. (2011): Powertrain 2020 – The Li-Ion Battery Value Chain – Trends and implications. Stuttgart: Roland Berger Automotive Competence Center.

Bersch, Johannes; Diekhof, Josefine; Krieger, Bastian; Licht, Georg; Wagner, Simona (2018): Abnehmendes Produktivitätswachstum – zunehmende Produktivitätsunterschiede. Mannheim (ZEW policy brief 4/2018), letzter Aufruf 25.08.2018.

BITKOM und Fraunhofer IAO (2014): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin.

BITKOM, Fraunhofer IAO (Hrsg.) (2014): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin/Stuttgart.

Bischoff, J. (Hrsg.) (2015): Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand". Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BWM). Abgerufen am 27.01.2018.

Blöcker, A., Jürgens, U., Meißner, H. (2009): Innovationsnetzwerke und Clusterpolitik in europäischen Automobilregionen. Münster.

Blöcker, A. (2015): Industrielle Wertschöpfungsketten: Herausforderungen für das deutsche Industriemodell am Beispiel der Automobilindustrie. In: WSI-Mitteilungen 7/2015, S. 534–541.

BMUB (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und Global. Berlin.

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Berlin.

BMVI (15.02.2017): Startschuss für das Bundesprogramm Ladeinfrastruktur. Abgerufen am 29.01.2018 von https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/019-dob-rindt-e-ladesaeulenoffensive.html

BMVI (2017): Ethik-Kommission – automatisiertes und vernetztes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-der-ethik-kommission.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.08.2018.

BMW AG (2018): BMW Efficient Dynamics. Abgerufen am 26.01.2018 von http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/efficientdynamics-2015/uebersicht.html

BMW Press (Hrsg.) (2015): BMW Group Announces the First Integration of EnLighten App. Online verfügbar unter https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0227922EN_US/bmw-group-announces-the-first-integration-of-enlighten-app?language=en_US, zuletzt geprüft am 17.01.2017.

BMWi (2017): Elektromobilität. Berlin.

Boes, A., Kämpf, T. (2016): Arbeiten im globalen Informationsraum. Berlin: BMAS Arbeiten 4-0 Werkheft 1.

Böhme, T., Frank, B. (2017): Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles. Cham, CH: Springer International.

Bonin, Holger; Gregory, Terry; Zierahn, Ulrich (2015): Übertragung der Studie von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland. Mannheim.

Bormann, R., Fink, P., Iwer, F., Schade, W. (2014): Wie Phönix aus der Asche? Zur Zukunft der Automobilindustrie in Deutschland. Bonn.

Bornemann, H. (2015): Wie digitalisiert ist Deutschland? Basel.

Bozem, K., Nagl, A., Rennhak, C. (2013): Energie für nachhaltige Mobilität: Trends und Konzepte. Wiesbaden: Springer Gabler.

Brändle, T., Morlock, M. (2017): Digitalisierung in Baden-Württemberg. Stand der Digitalisierung in den Betrieben und

potenzielle Implikationen. Ein Bericht auf Basis des IAB Betriebspanels 2016. Tübingen: IAW Kurzbericht 1/2017.

Brödner, P. (2015): Industrie 4.0 und Big Data – wirklich ein neuer Technologieschub? In: Hirsch-Kreinsen, Ittermann, Niehaus, S. 231–250.

Bruhn, M., Hadwich, K. (Hrsg.) (2017): Dienstleistungen 4.0. Geschäftsmodelle – Wertschöpfung – Transformation. Wiesbaden.

Brzeski, Carsten; Burk, Inga (2015): Die Roboter kommen. Folgen der Automatisierung für den deutschen Arbeitsmarkt. (ING-DiBa Economic Research).

Business Insider (23.10.2017): The mayors of London, LA, Paris and Seattle pledge to ban gasoline and diesel vehicles by 2030. Abgerufen am 20.02.2018 von http://www.businessinsider.de/ap-world-mayors-pledge-emissions-free-cities-by-2030-2017-10?r=US&IR=T

Bundesverband Carsharing (2016): Neue bcs-Studie: Mehr Platz zum Leben – wie CarSharing Städte entlastet . Online verfügbar unter http://carsharing.de/sites/default/files/uploads/bcs_factsheet_nr.2_0.pdf, zuletzt geprüft am 24.08.2018.

BW Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration (2017): Digitalisierungsstrategie, S. 22–93.

CAM (2018): AutomotiveINNOVATIONS - Die Innovationen der globalen Automobilkonzerne: Eine Analyse der Zukunftstrends und Innovationsleistungen der globalen Automobilhersteller und Zulieferer. Bergisch-Gladbach.

Chang, S.-B. (2012): Using patent analysis to establish technological position: Two different strategic approaches, Technological Forecasting & Social Change. Technological Forecasting and Social Change .

Commerzbank (2014): Autozulieferer. Frankfurt am Main.

Commerzbank (2017): Automobilzulieferer in Deutschland. Frankfurt am Main.

Corbo, P., Migliardini, F., Veneri, O. (2011): Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles. Luxemburg: Springer.

Daimler AG (2018): Daimler steigt bei ChargePoint ein: Intelligente Ladelösungen verhelfen Elektromobilität zum Durchbruch. Abgerufen am 26.01.2018 von http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Daimler-steigt-bei-ChargePoint-ein-Intelligente-Ladeloesungen-verhelfen-Elektromobilitaet-zum-Durchbruch.xhtml?oid=15763094

Daimler AG (2018): GLC F-Cell startet in die Vorserie. Abgerufen am 26.01.2018 von https://www.daimler.com/innovation/specials/iaa-2017/glc-fcell.html

Daimler AG (Hrsg.) (2015): moovel: Der Pionier auf dem Gebiet innovativer Mobilitätsdienstleistungen. Online verfügbar unter http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/moovel-Der-Pionier-auf-dem-Gebiet-innovativer-Mobilitaetsdienstleistungen.xhtml?oid=9904905, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

DAT – Deutsche Automobil Treuhand (2016): DAT-Report 2016. Ostfildern.

Deloitte (2014): Umbruch in der Automobilzulieferindustrie – Standortoptimierung und Sourcing. München.

DENA (30. 06 2016): Deutsche Energie-Agentur GmbH, Potenzialatlas Power to Gas. Berlin.

Dengler, Katharina; Matthes, Britta (2015a): Folgen der Digitalisierung für die Arbeitswelt. In kaum einem Beruf ist der Mensch vollständig ersetzbar. Nürnberg (= IAB-Kurzbericht 24/2015).

Dengler, Katharina; Matthes, Britta (2015b): Folgen der Digitalisierung für die Arbeitswelt. Substituierbarkeitspotenziale von Berufen in Deutschland. Nürnberg (= IAB-Forschungsbericht 11/2015).

Dengler, Katharina; Matthes, Britta (2018): Wenige Berufsbilder halten mit der Digitalisierung Schritt. Nürnberg (= IAB-Kurzbericht 4/2018).

Deutsche Wirtschafts Nachrichten (Hrsg.) (2017): Wie Digitalisierung die Autowelt verändern wird. Online verfügbar unter https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2017/06/22/wie-digitalisierung-die-autowelt-veraendern-wird/, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Die Bundesregierung (2011): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien. Berlin.

Diez, W. (2015): Mittelständische Automobilzulieferer – Chancenpotenziale und strategische Optionen. Stuttgart (Vortrag beim Baden-württembergischen Zuliefertag am 12.11.2015 in Stuttgart).

Dispan, Jürgen (2013): Elektromobilität: Schlüsselfaktor Qualifikation. Ergebnisse der ELAB-Studie zu Kompetenzanforderungen und Qualifikationsbedarfen. Stuttgart.

Dispan, Jürgen (2017): Branchenanalyse Kraftfahrzeug-Gewerbe. Strukturwandel und Beschäftigungstrends in Autohäusern und Kfz-Werkstätten. Düsseldorf.

Dispan, Jürgen (2018): Qualifikation und Arbeitsschutz im Bereich der Elektromobilität. In: Schröder, Lothar; Urban, Hans-Jürgen (Hrsg.): Ökologie der Arbeit. Impulse für einen nachhaltigen Umbau. Jahrbuch Gute Arbeit 2018. Frankfurt am Main, S. 224–234.

Dispan, Jürgen; Koch, Andreas; Luitjens, Pascal; Seibold, Bettina (2017): Strukturbericht Region Stuttgart. Schwerpunkt Digitalisierung in der Region. Stuttgart, Tübingen.

Dispan, Jürgen; Koch, Andreas; Krumm, Raimund; Seibold, Bettina (2015): Strukturbericht Region Stuttgart. Schwerpunkt Investitionen. Stuttgart, Tübingen.

Dispan, Jürgen; Krumm, Raimund; Seibold, Bettina (2009): Strukturbericht Region Stuttgart. Schwerpunkt Umbruch in der Automobilregion. Stuttgart, Tübingen.

Dispan, Jürgen; Meißner, Heinz-Rudolf (2011): Elektromobilität. Wirkungen auf regionale Wertschöpfungsketten und auf die Beschäftigung in Baden-Württemberg. Stuttgart.

Dispan, Jürgen; Stieler, Sylvia (2018): Digitalisierung und Unternehmensstrategie. Strategische Unternehmenspolitik im Kontext des Megatrends Digitalisierung und der Zukunft der Arbeit am Beispiel des Technologiekonzerns Siemens. Düsseldorf und Frankfurt am Main.

Dittberner, Nicolas (2017): Autonomes Fahren in Deutschland: Status quo und Zukunftsvision. Online verfügbar unter https://de.udacity.com/blog/post/autonomes-fahren-in-deutschland-status-quo-und-zukunftsvision, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

DKE, AK EMOBILITY.60 (2016): Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Frankfurt am Main.

DLR, e-mobil BW (Hrsg.) (2017): Automatisiertes Fahren im Personen und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen.

Dölle, Johannes E. (2013): Lieferantenmanagement in der Automobilindustrie – Struktur und Entwicklung der Lieferantenbeziehungen von Automobilherstellern, Wiesbaden

Duleep, G., van Essen, H., Kampman, B., Grünig, M. (2011): Impacts of Electric Vehicles-Assessment of electric vehicle and battery technology. Delft: Committed to the Environment (CE) Delft.

Car2Go (Hrsg.) (2018): Car2Go. Online verfügbar unter https://www.car2go.com/DE/de/, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Carl, Michael (2015): Think Tank – Warum selbstfahrende Autos kein Lenkrad haben werden.

EAFO (2018): France. Abgerufen am 20.02.2018 von http://www.eafo.eu/content/france

EAFO (2018): Netherlands. Abgerufen am 20.02.2018 von http://www.eafo.eu/content/netherlands

EAFO (2018): United Kingdom. Abgerufen am 20.02.2018 von http://www.eafo.eu/content/united-kingdom

ECF (2017): European Climate Foundation, Low-carbon cars in Germany: Technical Report. Cambridge, UK.

Eckl-Dorna, W. (16.01.2018): Diese Männer trimmen deutsche Autobauer auf Elektro. Abgerufen am 26.01.2018 von http://www.manager-magazin.de/unternehmen/

autoindustrie/elektroauto-diese-manager-polen-deutsche-autokonzerne-auf-elektro-um-a-1187616-6.html

Eckl-Dorna, Wilfried (18.12.2017): E-Auto-Offensive mit 10 Modellen. Abgerufen am 26.01.2018 von http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/toyota-kuendigt-elektroauto-offensive-mit-10-modellen-an-a-1183940.html

Eichlseder, H., Klell, M. (2012): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Einwiller, Ruth (2017): Forschung und Entwicklung in Baden-Württemberg – Zukunft gestalten. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 1+12/2017, S. 26–32.

Einwiller, Ruth (2018): Forschung und Entwicklung im IKT-Sektor. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 3/2018, S. 15–19.

ELAB (2012): Elektromobilität und Beschäftigung – Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Beschäftigung und Standortumgebung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

ELAB 2 (2018) : Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Auswirkungen auf die Beschäftigung in Deutschland". Stuttgart: Fraunhofer IAO

eMAP (2015): The Capability of the Future Automotive Industrial Development of e-Mobility. Stuttgart.

e-mobil BW (Hrsg.) (2013): Systemanalyse BWe mobil 2013: IKT- und Energieinfrastruktur für innovative Mobilitätslösungen in Baden-Württemberg. Stuttgart. (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hg.) (2015a): Elektromobilität weltweit. Baden-Württemberg im internationalen Vergleich. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hg.) (2015b): Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hg.) (2015c): Strukturstudie BW^e mobil 2015. Elektromobilität in Baden-Württemberg. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hg.) (2016): Kommerzialisierung der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg. Rahmenbedingungen und Perspektiven. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hrsg.) (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge. Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (Hrsg.) (2018): Mobilitätswandel vor Ort. Elektrifizierung und Digitalisierung der Mobilität in Städten und Gemeinden in Baden-Württemberg. Stuttgart (e-mobil BW).

e-mobil BW (2013): Systemanalyse BWe mobil 2013. IKT- und Energieinfrastruktur für innovative Mobilitätslösungen in Baden-Württemberg. Stuttgart.

e-mobil BW (2014): Entwicklung der Beschäftigung im After Sales. Effekte aus der Elektromobilität. Stuttgart

e-mobil BW (2015): Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. – Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Stuttgart.

e-mobil BW (2015): Strukturstudie BW^e mobil 2015 – Elektromobilität in Baden-Württemberg. Stuttgart.

e-mobil BW (2015): Das Schaufenster Baden-Württemberg elektrisiert. Ergebnisse. Erkenntnisse. Ausblick. Stuttgart.

e-mobil BW (2015): Elektromobilität weltweit. Baden-Württemberg im internationalen Vergleich. Stuttgart.

e-mobil BW (2017): Nullemissions-Nutzfahrzeuge – Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Stuttgart.

e-mobil BW (2018): Elektrifizierung und Digitalisierung der Mobilität in Städten und Gemeinden. Stuttgart.

Ernst & Young (28.01.2017): Autoindustrie boomt dank China. Abgerufen am 12.01.2018 von http://www.ey.com/de/de/newsroom/news-releases/ey-20170128-autoindustrie-boomt-dank-china

EU (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO_2-Emissionen von PKW und leichten Nfz. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union.

Europäische Kommission (08.11.2017): Energy Union: Commission takes action to reinforce EU's global leadership in clean vehicles. Abgerufen am 20.02.2018 von https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-11-08-driving-clean-mobility_en

Europäische Kommission (08.11.2017): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel.

Eurostat (2018): Abruf am 27.08.2018 unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do#Frankfurter Allgemeine ((Hrsg.)) (2015): Autonotruf eCall wird Pflicht für Neuwagen. Online verfügbar unter http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/eu-parlament-beschliesst-ecall-pflicht-fuer-alle-neuwagen-13563842.html, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Frankfurter Allgemeine (Hrsg.) (2016): Tesla stopft Sicherheitslücke nach Hackerattacke. Online verfügbar unter http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/neue-mobilitaet/tesla-stopft-sicherheitsluecke-nach-hackerattacke-14445660.html, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Fraunhofer IAO (Hrsg.) (2018): ELAB 2 – Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. Stuttgart (unveröffentlichter Vorabbericht zum 04.06.2018).

Fraunhofer IAO, DLR-FK – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte; IMU – IMU Institut (Hrsg.) (2012): Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB). Stuttgart.

Fraunhofer IPA (2014): Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg". Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Abgerufen am 28.02.2018.

Frey, Carl; Osborne, Michael (2013): The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? Abruf unter https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf am 13.08.2018.

Frost & Sullivan (2017): Markt für autonomes Fahren konzentriert sich auf künstliche Intelligenz und kognitives Cloud Computing. Online verfügbar unter https://ww2.frost.com/news/press-releases/markt-fur-autonomes-fahren-konzentriert-sich-auf-kunstliche-intelligenz-und-kognitives-cloud-computing/, zuletzt geprüft am 31.01.2018.

Füßel, A. (2017): Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Garrett, D. E. (2004): Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride. Waltham: Academic Pr Inc.

Gossen, Maike; Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (Hrsg.) (2012): Nutzen statt Besitzen. Motive und Potenziale der internetgestützten gemeinsamen Nutzung am Beispiel des Peer-to-Peer Car-Sharing. Online verfügbar unter https://www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/IOEW_SR_202_Nutzen_statt_Besitzen.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

Greenpeace International (2015): energy (r)evolution. Hamburg.

Greencar Magazine (2018): Trend digitaler Autokauf. Online verfügbar unter: https://greencarmagazine.de/trend-digitaler-autokauf/, zuletzt geprüft am 24.08.2018.

Grundhoff, S. (2018): Die Tesla-Pläne bis 2020. Abgerufen am 26.01.2018 von https://www.blick.ch/auto/news_n_trends/die-tesla-plaene-bis-2020-das-elektrische-millionenspiel-id2636106.html

Grünweg, T. (17.10.2017): Volvos eiskalter Tesla-Konter. Abgerufen am 26.01.2018 von http://www.spiegel.de/auto/aktuell/polestar-mit-diesen-elektroautos-will-volvo-tesla-angreifen-a-1173321.html

Gurka, N. (2016): Investitionstätigkeit in Baden-Württemberg – ein Blick auf die Nettoinvestitionen. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 11/2016, S. 33–37.

Habrich-Böcker, C., Beuthner, A. (2017): Wann kommt der digitale Feinschliff? In: Automobil Produktion 07/2017: 58–59.

Hafenrichter, J., Hermann, S., Buch, T., Dengler, K. (2016): Digitalisierung der Arbeitswelt. Folgen für den Arbeitsmarkt in Baden-Württemberg. Nürnberg: IAB-Regional Baden-Württemberg 03/2016.

Hagemann, Harald; Christ, Julian; Rukwid, Ralf; Erber, Georg (2011): Die Bedeutung von Innovationsclustern, sektoralen und regionalen Innovationssystemen zur Stärkung der globalen Wettbewerbsfähigkeit der baden-württembergischen Wirtschaft. Hohenheim (Endbericht).

Handelsblatt (2016): VW will aus Moia ein Einhorn machen . Online verfügbar unter: https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/neue-volkswagen-marke-vw-will-aus-moia-ein-einhorn-machen/14934318.html?ticket=ST-1888036-ywQchJdmAoctrPqP9Wxs-ap2, zuletzt geprüft am 24.08.2018.

Hecking, Miriam (2016): Fahrdienstvermittler im Faktencheck. Wie Uber, Gett & Co. die Mobilität revolutionieren wollen. Online verfügbar unter http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/wie-uber-gett-co-die-mobilitaet-revolutionieren-wollen-a-1100274.html, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Heinze, E. (2018): Baden-württembergische Industrieinvestitionen 2016 auf neuem Rekordniveau. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 01/2018, S. 21–28.

Heinze, E. (2017): Investitionen der Südwestindustrie im Jahr 2015 auf Rekordniveau. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 01/2017, S. 22–28.

Hensley, R., Newman, J., Rogers, M. (2012): Battery technology charges ahead. Detroit: McKinsey.

Hildebrandt, A., Landhäußer, W. (2017): CSR und Digitalisierung – Der digitale Wandel als Chance und Herausforderung für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin: Springer Gabler.

Hirsch-Kreinsen, H., Ittermann, P., Niehaus, J. (Hrsg.) (2015): Digitalisierung industrieller Arbeit – Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden

Hirsch-Kreinsen, H., ten Hompel, M., Ittermann, P., Dregger, J., Niehaus, J., Kirks, T., Mättig, B. (2018): „Social Manufacturing and Logistics" – Arbeit in der digitalisierten Produktion.

Huchler, Norbert (2016): Die „Rolle des Menschen" in der Industrie 4.0 – Technikzentrierter vs. humanzentrierter Ansatz. In: Arbeits- und Industriesoziologische Studien 9 (1), S. 57–79.

IAO und Horvath (2016): The Value of Time – Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren. Stuttgart.

IEA (2011): World Energy Outlook 2011. Paris.

IEA (2017): Global EV Outlook 2017. Paris.

IHK – Industrie- und Handelskammern Baden-Württembergs (Hrsg.) (2017): Die größten Unternehmen in Baden-Württemberg. Stuttgart.

Ingenieurgruppe IVV Aachen (Hrsg.) (2017): Motorisierter Individualverkehr. Online verfügbar unter http://www.ivv-aachen.de/motorisierter-individualverkehr.html, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

Ittermann, P., Niehaus, J., Hirsch-Kreinsen, H. (2015): Arbeiten in der Industrie 4.0.

IW Consult GmbH (2015): Wohlstand dank Industrie. Zukunft der Produktion in Baden-Württemberg. Köln

Jürgens, Ulrich; Meißner, Heinz-Rudolf (2008): Ausbruch aus der Sandwich-Position? Risiken und Chancen der neuen ost-/westeuropäischen Arbeitsteilung für die ostdeutsche Automobilindustrie. Berlin (WZB – Discussion Paper SP III 2008–301)

Kagermann, H., Helbig, J., Wahlster, W. (Hrsg.) (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Berlin: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.

Kagermann, H., Helbig, J., Wahlster, W. (Hrsg.) (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Berlin: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.

KBA (2017): Neuzulassungen von PKW in den Jahren 2007 bis 2016 nach ausgewählten Herkunftsländern. Abgerufen am 12.02.2018 von https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MarkenHersteller/n_mark_pkw_zeitreihe.html?nn=658682

KBA (2018): Neuzulassungen. Abgerufen am 20.02.2018 von https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html

Kelkar, O., Esposito, S., Hertweck, D., Kinitzki, M., Sigle, N. (2017): Digitale Transformation - Der Einfluss der Digitalisierung auf die Workforce in der Automobilindustrie. Stuttgart und Reutlingen, Abruf am 3.9.2018 von https://www.mhp.com/fileadmin/www.mhp.com/assets/downloads/studien/MHPStudie_Workforce_Digitalisierung.pdf

Kleinhans, C., Neidl, T., Radics, A. (2015): Automotive Entwicklungsdienstleister – Zukunftsstandort Deutschland, Eine Studie des Verbands der Automobilindustrie e.V. (VDA) in Zusammenarbeit mit der Berylls Strategy Advisors GmbH, Berlin, https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/band-48-automotive-entwicklungsdienstleistung.pdf, letzter Zugriff, 09.02.2018.

Köhler, Thomas (2018): Randthema „Laden" darf E-Mobility nicht bremsen. In: Automobilproduktion 06/2018, S. 6–7.

Kollosche, Ingo; Schwedes, Oliver (2016): Wiso – Mobilität im Wandel Transformationen und Entwicklungen im Personenverkehr. Online verfügbar unter: http://library.fes.de/pdf-files/wiso/12702.pdf , zuletzt geprüft am 24.08.2018

König, Peter (2015): Autonomes Fahren – der Status quo und was ist möglich?

Korge, A., Schlund, S., Marrenbach, D. (2016).: Zukunftsprojekt Arbeitswelt 4.0 Baden-Württemberg – Vorstudie Bd. 2. Szenario-basierte Use-Cases und Zukunftsszenerien für den Maschinenbau. Abgerufen am 27.01.2018.

Koschnitzke, Lukas (2017): Autonomes Fahren. Fahren oder gefahren werden. Online verfügbar unter http://www.zeit.de/mobilitaet/2017-11/autonomes-fahren-computer-studie, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Krzywdzinski, M. (2016): Technologie, Qualifikationen und internationale Arbeitsteilung. Berlin

Krzywdzinski, Martin; Schwarz-Kocher, Martin; Korflür, Inger; Löckener, Ralf; Schröder, Axel (2016): Standortperspektiven in der Automobilzulieferindustrie. Befragung von Arbeitnehmervertretern in Deutschland und Mittelosteuropa, Version 1.01, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) 2016, unveröffentlichter Datensatz.

Land BW (20.06.2017). Baden-Württemberg baut Förderung der Elektromobilität aus. Abgerufen am 29.01.2018 von https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/baden-wuerttemberg-baut-foerderung-der-elektromobilitaet-aus/

Landesregierung Baden-Württemberg (2018): Pressemitteilung vom 20.06.2018 „Baden-Württemberg baut Förderung der Elektromobilität aus", Online: https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/ministerium/presse/pressemitteilung/pid/baden-wuerttemberg-baut-foerderung-der-elektromobilitaet-aus-1/. Abruf 27.08.2018.

Lerch, C., Jäger, A., Maloca, S. (2017): Wie digital ist Deutschlands Industrie wirklich? Arbeit und Produktivität in der digitalen Produktion. Karlsruhe: Mitteilungen aus der ISI Erhebung, Ausgabe 71.

Lindinger, M. (24.03.2018): Der Preis der E-Mobilität. Abgerufen am 29.03.2018 von http://www.faz.net/aktuell/wissen/forschung-politik/kostbare-rohstoffe-fuer-batterien-die-e-mobilitaet-koennte-ein-teures-unterfangen-werden-15502495.html

Mandl, C. (2017): Auf der Suche nach Industrie-4.0-Pionieren. Wien.

Mättig, B., Jost, J., Kirks, T. (2018): Erweiterte Horizonte – Ein technischer Blick in die Zukunft der Arbeit.

Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (2015): Autonomes Fahren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Mauerer, G. (17.01.2018): Absatz in wichtigen Märkten der Welt 2017. Abgerufen am 26. 03 2018 von https://www.automobilwoche.de/article/20180117/NACHRICHTEN/301179988/absatz-in-wichtigen-maerkten-der-welt–china-und-europa-legen-zu-us-markt-schrumpft

McKinsey & Company (2010): A portfolio of powertrains for Europe: a fact-based analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-In Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles.

McKinsey & Company; IAW – Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung (2010): Technologien, Tüftler und Talente. Wirtschaftliche und technologische Perspektiven der baden-württembergischen Landespolitik bis 2020. Stuttgart, Tübingen

MEEM (05.12.2016): Développement des véhicules propres. Abgerufen am 12.02.2018 von www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-des-vehicules-propres

Meißner, H. (2013): Logistik- und Entwicklungsdienstleister in der deutschen Automobilindustrie. Frankfurt am Main.

Münzenmeier, Werner (1988): Zur Abhängigkeit baden-württembergischer Arbeitsplätze vom Automobilbau. In: Baden-Württemberg in Wort und Zahl 12/1988, S. 514–521

MWAW – Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2016): Regionaler Cluster-Atlas Baden-Württemberg. Überblick über clusterbezogene Netzwerke und Initiativen. Stuttgart

MWFK – Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (2017): Studienerfolg – Studienabbruch: Wissenschafts- und Wirtschaftsministerium legen erstmals Studie über Motive und Ursachen des Studienabbruchs vor. Abgerufen von https://mwk.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/studie-ueber-motive-und-ursachen-des-studienabbruchs/ am 13.08.2018

Nobi, P., Fischhaber, S. (2015): Belastung der Stromnetze durch Elektromobilität. München.

NPE (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. Berlin.

NPE (2016): Wegweiser Elektromobilität. Berlin: GGEMO.

Oberkersch, Benjamin (2015): Mercedes-Benz zündet nächste Stufe der Car-to-X Kommunikation. Neue E-Klasse spricht jetzt auch mit Baustellen. Online verfügbar unter http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-zuendet-naechste-Stufe-der-Car-to-X-Kommunikation-Neue-E-Klasse-spricht-jetzt-auch-mit-Baustellen.xhtml?oid=9920375, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Osterloh, Margit; Frost, Jetta (2000): Motivation und Wissen als strategische Ressource. In: Frey, Bruno; Osterloh, Margit (Hrsg.): Managing Motivation. Wie Sie die neue Motivationsforschung für Ihr Unternehmen nutzen können. Wiesbaden, S. 43–67.

Pfeiffer, S., Lee, H., Zirnig, C., Suphan, A. (2016): Industrie 4.0 – Qualifizierung 2025. Frankfurt am Main.

Pfleger, Peter (2016): Automatisiertes Fahren – Infrastruktur.

Pienkos, J. (2004): The Patent Guidebook. Chicago: American Bar Association.

Porsche AG (05.04.2017): Porsche und Audi bündeln Kräfte für gemeinsame Fahrzeugarchitektur. Stuttgart.

Porter, M. (1991): Nationale Wettbewerbsvorteile. Erfolgreich konkurrieren auf dem Weltmarkt. München (Droemer Knaur).

PWC – PricewaterhouseCoopers GmbH (Hrsg.) (2017): eascy – Die fünf Dimensionen der Transformation der Automobilindustrie. Frankfurt am Main. Abgerufen am 04.09.2018 von https://www.pwc.de/de/automobilindustrie/pwc_automotive_eascy-studie.pdf.

Ramsauer, K. (2015): Investitionen der Kfz-Industrie. In: Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 10/2015, S. 38–42.

RAND Cooperation (Hrsg.) (2017): Why Waiting for Perfect Autonomous Vehicles May Cost Lives. Online verfügbar unter https://www.rand.org/blog/articles/2017/11/why-waiting-for-perfect-autonomous-vehicles-may-cost-lives.html, zuletzt geprüft am 18.01.2018.

Reiche, L. (18.01.2017): BMW will ab 2021 Brennstoffzellen-Autos anbieten. Abgerufen am 26.01.2018 von http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/bmw-und-daimler-wollen-das-wasserstoffauto-voranbringen-a-1130491.html

Renault SA (06.10.2017): Drive The Future 2017–2022: New strategic plan builds on record results, targets sustainable, profitable growth. Abgerufen am 26.01.2018 von https://media.group.renault.com/global/en-gb/groupe-renault/media/pressreleases/21197704/drive-the-future-2017-2022-le-nouveau-plan-strategique-sappuie-sur-des-resultats-records-et-vise-une

Roland Berger Strategy Consultants, Lazard (2014): BRIC = BRIC? – Study on future automotive growth markets and implications for suppliers.

Roland Berger (2011): Zukunftsfeld Elektromobilität – Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. München.

Rukwid, Ralf (2010): Die Beschäftigungsentwicklung Baden-Württembergs während der Weltfinanzkrise – eine vergleichende Analyse aus Sicht unterschiedlicher Berufsgruppen. Hohenheim.

SAE International (Hrsg.) (2014): Automated driving. Levels of driving Automation are defined in new SAE International Standard J3016, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Schacht, Jörg (2017): Was ist autonomes Fahren? Die Einstufungen der SAE ins Deutsche übersetzt. Online verfügbar unter https://www.i-q.de/expertenwissen/adas-was-ist-automatisiertes-fahren/, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Schade, Wolfgang; Zanker, Christoph; Kühn, André; Hettesheimer, Tim (2014): Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030. Berlin (edition sigma).

Schäfer, K. (03.06.2016): Motoren: Mit Vollgas in die Sackgasse. Abgerufen am 12.01.2018 von https://www.heise.de/tr/artikel/Motoren-Mit-Vollgas-in-die-Sackgasse-3223514.html

Schäfer, P. (2017): Elektroauto-Quote für China kommt ab 2019. Springer Verlag.

Schreier, J. (2017): Virtual Reality – Dürr Ecoclean schult sein Servicepersonal jetzt virtuell, Internet of Things. Abgerufen am 27.01.2018 von https://www.industry-of-things.de/duerr-ecoclean-schult-sein-servicepersonal-jetzt-virtuell-a-626699/.

Schwarz-Kocher, M., Pfäfflin, H., Korflür, I. (2017): Perspektiven für die deutschen Produktionswerke der Automobilzulieferindustrie. Stuttgart und Dortmund.

Schwarz-Kocher, M., Krzywdzinski, M., Korflür, I. (Hrsg.) (2019): Standortperspektiven der Automobilzulieferindustrie in Deutschland und Mittelosteuropa unter dem Druck veränderter globaler Wertschöpfungsstrukturen. Düsseldorf.

Schwarz-Kocher, Martin; Pfäfflin, Heinz; Korflür, Inger (2017): Perspektiven für die deutschen Produktionswerke der Automobilzulieferindustrie. Stuttgart und Dortmund (Arbeitspapier).

Seibold, B., Stieler, S. (2016): Digitalisierung der Bürotätigkeiten. Stuttgart: unveröffentlichter Projektbericht.

Spath, D. (Hrsg.), Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., Schlund, S. (2013): „Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0". Stuttgart: Fraunhofer-Institut IAO.

Smeddinck, Ulrich (1996): Umweltverkehr: Bausteine für eine zukunftsfähige Verkehrswelt.

Spath, D. (Hrsg.), Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., Schlund, S. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart.

Spiegel (Hrsg.) (2017): Regierung beschließt Autopilot-Gesetz. Online verfügbar unter http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonomes-fahren-regierung-beschliesst-autopilot-gesetz-a-1131675.html, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

Stan, C. (2016): Alternative Propulsion for Automobiles. Springer International.

Statista (03.01.2018): Anzahl der Ladestationen für Elektroautos in Deutschland, chargemap (2018) Anzahl der Ladestationen in Deutschland. Abgerufen am 21.12.2018 von https://de.chargemap.com/about/stats/deutschland

Statista (2018): Absatz von Automobilen in China; Number of cars sold worldwide; Passenger car sales in Japan; U.S. car sales OICA. (2018). Provisional new pc registrations or sales. Abgerufen am 21.12.2018 von http://www.oica.net/wp-content/uploads/Sales-Passenger-cars-2017.pdf

Statista (2018): Anzahl zugelassenen PKW in den USA FHWA. (2017). State Motor-Vehicle Registrations – 2016. Abgerufen am 21.12.2018 von https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2016/mv1.cfm

Statista (2018): Number of cars sold worldwide from 1990 to 2017 (in million units). Abgerufen am 20.02.2018 von https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/

Statista (2018): Passenger car sales in Japan from 2005 to 2016 (in units). Abgerufen am 20.02.2018 von https://www.statista.com/statistics/269889/passenger-car-sales-in-japan-since-2007/

Statista (2018): PKW-Bestand in China NBSC. (2017). China Statistical Yearbook 2017. Table 16–21 Possession of Private Vehicles. Peking. Abgerufen am 23.02.2018 von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/219928/umfrage/anzahl-der-pkw-in-china/

Statista (2018): PKW-Bestand in Japan JAMA. (2018). The Motor Industry of Japan 2018. Tokyo. Abgerufen am 23.02.2018 von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/280869/umfrage/pkw-bestand-in-japan/

Statista (2018): U.S. car sales from 1951 to 2017 (in units). Abgerufen am 20.02.2018 von https://www.statista.com/statistics/199974/us-car-sales-since-1951/

Statista (2018): CO_2-Emissionen von Neuwagen in Deutschland bis 2017. Abgerufen am 26.01.2018 von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/399048/umfrage/entwicklung-der-co2-emissionen-von-neuwagen-deutschland/

Statistisches Bundesamt (2017): Produzierendes Gewerbe. Indizes der Produktion und der Arbeitsproduktivität im Produzierenden Gewerbe. Fachserie 4, Reihe 2.1. Wiesbaden

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2017): Automobilbranche: 9 Milliarden Euro für Forschung und Entwicklung. Stuttgart. (Pressemitteilung 254/2017 vom 15.09.2017)

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018): Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr seit 1980 nach Straßenkategorien und Fahrzeugarten. Abruf von A.T. Kearney (2016): Digitale Transformation stellt klassisches Neuwagengeschäft und etablierte Vertriebsstrukturen in Frage. München (Foliensatz).

Staufen AG (2017): Deutscher Industrie 4.0 Index 2017. Abgerufen am 27.01.2018 unter https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-studie-deutscher-industrie-4.0-index-2017-de_DE.pdf.

Steding, D., Herrmann, A., Lange, M. (2004): Car-Sharing – sozialinnovativ und kulturell selektiv. Möglichkeiten und Grenzen einer nachhaltigen Mobilität. ZUFO-Berichte 3.

Steinaecker, Jörg v. (2016): Die Digitalstrategie im Autohaus. Wiesbaden (Foliensatz).

Stimpfle, Bernhard (2013): ENTWICKLUNG INNOVATIVER PREMIUM-MOBILITÄTSDIENSTLEISTUNGEN. Online verfügbar unter https://www.bicc-net.de/workspace/uploads/subfeatures/downloads/entwicklung-innovativer-premiu-527279c00f62d.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

STROM (2014). Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität (STROMbegleitung). Abschlussbericht im Rahmen der Förderung des Themenfeldes „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)". Stuttgart, Wuppertal, Berlin.

Tesla (2018): Tesla Gigafactory. Abgerufen am 06.04.2018 von https://www.tesla.com/de_DE/gigafactory?redirect=no

Tille, T. (2016): Automobil-Sensorik – Ausgewählte Sensorprinzipien und deren automobile Anwendung. Heidelberg: Springer Vieweg.

Brändle, Tobias; Morlock, Miriam (2017): Digitalisierung in Baden-Württemberg. Stand der Digitalisierung in den Betrieben und potenzielle Implikationen. Ein Bericht auf Basis des IAB Betriebspanels 2016. Tübingen (= IAW-Kurzbericht 01/2017).

Töpler, J., Lehmann, J. (2017): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven. Berlin: Springer Vieweg.

UBA (06.04.2017): Umweltbundesamt, Emissionen des Verkehrs. Abgerufen am 26.01.2018 von https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs

UNFCCC (2017): National Inventory Submissions 2017. Abgerufen am 18.07.2018 von https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017#fn1

USGS (2011): U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Reston: USGS Mineral Resources Program.

van Basshuysen, R., Schäfer, F. (2017): Handbuch Verbrennungsmotor (Bd. 8. Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.

VDA (2015): Automotive Entwicklungsdienstleistung. Zukunftsstandort Deutschland. Berlin (= Materialien zur Automobilindustrie: 48).

VDA (2018b): https:/www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/export.html, letzter Abruf am 16.07.2018

VDA (2018a): Jahreszahlen Allgemeines, https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/allgemeines.html, Aufruf am 16.02.2018.

VDA (2018c): Future Automotive Industry Structure. FAST 2030. Berlin.

VDA (2017a): Zahlen Daten. Abgerufen am 30.01.2017 unter https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/zahlen-und-daten-uebersicht.html.

VDA (2017b): CO_2-Regulierung bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen. Abgerufen am 12.02.2018 von https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen.html

VDMA (2018): Antrieb im Wandel. Frankfurt am Main.

Veneri, O. (2016): Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-In Hybrid Vehicles. Cham, CH: Springer International.

Verkehrsministerium Baden-Württemberg (2017): Intelligente Mobilität der Zukunft: Digitalisierung in der Schlüsselrolle.

Volkswagen AG. (11.09.2017): Mit der „Roadmap E" startet der Volkswagen Konzern die umfassendste Elektrifizierungsoffensive der Automobilindustrie. Abgerufen am 26.01.2018 von https://www.volkswagenag.com/de/news/2017/09/Roadmap_E.html

Voskamp, U., & Wittke, V. (2012): Globale Qualitätsproduktion. Eine Studie zu neuen Strategien transnationaler Produktion bei Zulieferern der Automobilindustrie und im Maschinenbau. SOFI Arbeitspapier/SOFI Working Paper 2012–7, online: http://www.sofi-goettingen.de/fileadmin/Publikationen/Working-Paper_7_Voskamp-Wittke.pdf, letzter Abruf 25.08.2018.

Wallmann, J. (20.01.2016): Siliziumkarbid-Halbleiter auf der Überholspur. Abgerufen am 28.01.2018 von http://www.all-electronics.de/siliziumkarbid-halbleiter-auf-der-ueberholspur/

Weber, H., & Wegge, M., Conrad, R. (2013): Strukturwandel der Automobilindustrie: Krise und automobile „Zweiklassengesellschaft". = IMO-Report 01/2013.

Weyer, Daniel; Grambow, Kai (2018): Geschäftsmodell vernetztes Fahrzeug: Teure Commodity oder Cash Cow der Zukunft? Online verfügbar unter http://veranstaltungen.handelsblatt.com/autogipfel/geschaeftsmodell-vernetztes-fahrzeug-teure-commodity-oder-cash-cow-der-zukunft/, zuletzt geprüft am 26.01.2018.

Wolter, M., Mönnig, A., Hummel, M., Schneemann, C., Weber, E., Zika, G., Helmrich, R.; Maier, T., Neuber-Pohl, C. (2015): Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. Nürnberg (= IAB-Forschungsbericht 08/2015).

Wolf, S., Dollinger, C., Hees A., Reinhart, G. (2018): Der Mensch in Interaktion mit autonomen Planungs- und Steuerungssystemen für Cyber-Physische Produktionssysteme.

Wolter, M., Mönnig, A., Hummel, M. W. E. Zika, G., Helmrich, R., Maier, T., Neuber-Pohl, C. (2016): Wirtschaft 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Ökonomie. Szenario-

Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen. Nürnberg (= IAB-Forschungsbericht 13/2016).

Woyczechowski, N. (2014): Die Zukunft der Elektromobilität in Deutschland. Hamburg: Diplomica Verlag.

Oliver Wyman (2018): http://www.oliverwyman.de/media-center/2018/mai/Automobilindustrie-vor-stuermischen-Zeiten.html, letzter Abruf abgerufen am 05.07.2018

ZF (Hrsg.) (2017): ZF lässt Fahrzeuge sehen, denken, handeln. Online verfügbar unter https://www.zf.com/corporate/de_de/products/technologietrends/see_think_act/see_think_act.html, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Zeit Online (2018): Daimler und BMW legen Carsharing zusammen Reuters. Online verfügbar unter: https://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2018-03/car2go-drivenow-fusion-daimler-bmw, zuletzt geprüft am 24.08.2018

ZEV (2017): California: ZEV. Abgerufen am 20.02.2018 von http://www.transportpolicy.net/standard/california-zev/

ZEW – Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (2018): Innovationsausgaben der deutschen Wirtschaft erreichen neuen Rekordwert. Mannheim (= ZEW vom 08.02.2018; http://www.zew.de/de/presse/pressearchiv/innovationsausgaben-der-deutschen-wirtschaft-erreichen-neuen-rekordwert/; Abruf vom 20.02.2018).

ZEW – Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung GmbH; NW – Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg.) (2009): Die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche Volkswirtschaft im europäischen Kontext. Hannover, Mannheim (ZEW und NW, Endbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie).

Ziemke, A., Stöckel, T., Thomsen, L. (2016): Produktion 4.0. Neue Wege für die Automobilindustrie. Pattensen.

Zika, G., & Maier, T.; Helmrich, R., Hummel, M., Kalinowski, M., Hänisch, C. (2015): Engpässe und Überhänge regional ungleich verteilt. Stuttgart.

ZSW (15.02.2018): Datenservice Erneuerbare Energien. Abgerufen am 20.02.2018 von https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice#c6700

Zwirner, Heiko (2017): ZUKUNFT DER MOBILITÄT. „Das autonome Fahren hat drei große Vorteile". Online verfügbar unter https://www.welt.de/motor/article168683802/Das-autonome-Fahren-hat-drei-grosse-Vorteile.html, zuletzt geprüft am 17.01.2018.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen und Kerninhalte der Strukturstudie BW^e mobil 2019 ... 13
Abbildung 2: Übersicht über konventionelle und elektrifizierte Antriebskonzepte ... 18
Abbildung 3: Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte i. V. zum konventionellen Antrieb ... 20
Abbildung 4: Vorgestellte Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge 2000–2017 ... 22
Abbildung 5: Elektrifizierte Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge aus Europa und Asien ... 23
Abbildung 6: Konzept-, Prototypen- und Serienfahrzeuge nach Herst. und Elektrifizierungsgrad ... 24
Abbildung 7: Aufteilung der Fahrzeuge nach Status ... 25
Abbildung 8: Strombedarf erneuerbarer Energien für Antriebs- und Kraftstoffkombinationen ... 26
Abbildung 9: Markteinführung elektrifizierte Fahrzeuge nach Herstellern ... 28
Abbildung 10: Durchschnittlicher CO_2-Ausstoß von Neu-PKW in Deutschland 1998–2017 ... 31
Abbildung 11: Kostenzusammensetzung einer exemplarischen Traktionsbatterie ... 33
Abbildung 12: Key-Performance-Parameter aus Sicht der Kunden/OEM für BEV ... 35
Abbildung 13: Entwicklung der Li-Ion-Batteriekosten ... 36
Abbildung 14: Anteil ausgewählter Batterietechnologien nach Antriebskonzept ... 36
Abbildung 15: Patentanalyse für Lithium-Ionen-Energiespeicher, 2000–2015 ... 37
Abbildung 16: Anteil permanent- und fremderregter E-Maschinen nach Antriebskonzept ... 40
Abbildung 17: Anteil der Synchron- und Asynchronmaschinen nach Einbauort ... 40
Abbildung 18: Patentanalyse für E-Maschinen im Antriebsstrang 2000–2015 ... 41
Abbildung 19: Patentanalyse für Leistungselektronik im Antriebsstrang 2000–2015 ... 43
Abbildung 20: Patentanalyse für Brennstoffzellen in Bezug auf elektrifizierte Fahrzeuge, 2000–2015 ... 44
Abbildung 21: Übersicht über gängige Ladestecker ... 45
Abbildung 22: Übersicht über E-Mobilitäts-Ladeinfrastruktur ... 46
Abbildung 23: Die sechs Stufen des automatisierten Fahrens ... 50
Abbildung 24: Beispiele für Fahrzeugsysteme zur Automatisierung und Vernetzung ... 52
Abbildung 25: Sensoren für die Umfelderkennung ... 53
Abbildung 26: Car2Car-Kommunikation ... 55
Abbildung 27: Car2Infrastructure-Kommunikation ... 55
Abbildung 28: Car2Backend-Kommunikation ... 55
Abbildung 29: Patentanalyse für „Autonomes Fahren (SAE Level 5)" 2000–2016 ... 56
Abbildung 30: Entwicklung des CarSharing in Deutschland ... 59
Abbildung 31: Aktuelles digitales Geschäftsmodell am Beispiel BMW ... 60
Abbildung 32: Smart Factory – dezentrale Intelligenz im Datennetz cyberphysischer Systeme ... 64
Abbildung 33: Digitalisierungsmotive der Industrie-4.0-Anwender ... 65
Abbildung 34: Anteile der Betriebe im Industrie-4.0-Readiness-Index nach Branchen ... 67
Abbildung 35: PKW-Fertigung der deutschen OEM in Mio. Einheiten ... 73

Abbildung 36: Verteilung der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Europa ... 74
Abbildung 37: Umsatz- und Beschäftigungswachstum des baden-württembergischen Fahrzeugbaus ... 76
Abbildung 38: Tätigkeiten in einem PKW-Montagewerk ... 79
Abbildung 39: Erweiterte Darstellung des Automobilclusters in Baden-Württemberg ... 80
Abbildung 40: Beschäftigtenstruktur des Automobilclusters in Baden-Württemberg ... 85
Abbildung 41: Entwicklung des weltweiten Bestands an BEV, PHEV 2010–2017 ... 87
Abbildung 42: Marktsituation und Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich ... 88
Abbildung 43: Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-PKW in Deutschland 2010–2017 und B-W ... 89
Abbildung 44: Neuzul. Elektrofahrzeug in ausgewählten europ. Ländern 2010–2017 ... 91
Abbildung 45: Marktanteil elektrifizierter Fahrzeuge in ausgew. europ. Ländern 2010–2017 ... 91
Abbildung 46: Neuzul. elektrifizierter Fahrzeuge in China, USA und Japan ... 93
Abbildung 47: Entwicklungspfade der untersuchten Studien ... 101
Abbildung 48: Neuzulassungen PKW für ausgewählte Weltregionen 2017 ... 102
Abbildung 49: Struktur des Fahrzeugszenariomodells VECTOR21 ... 104
Abbildung 50: Szenario „Business as usual“ der Neuzulassungsentwicklung für Europa bis 2030 ... 106
Abbildung 51: Szenario „progressiv“ der PKW-Neuzulassungsentwicklung für Europa bis 2030 ... 107
Abbildung 52: Szenario „brennstoffzellengetriebene Neuzulassungen“ für Europa bis 2030 ... 108
Abbildung 53: PKW-Neuzulassungsanteile für Europa im Jahr 2030 für „BAU“ und „progressiv“ ... 109
Abbildung 54: Kostenentwicklung verschiedener Mittelklasse-Fahrzeugkonzepte bis 2030 ... 111
Abbildung 55: Anteile von PKW-Neuzul. und des PKW-Flottenbestands in Norwegen 2010-2017 ... 113
Abbildung 56: Szenario „Business as usual“ PKW-Bestand im europäischen Markt bis 2030 ... 113
Abbildung 57: Szenario „progressiv“ PKW-Bestand im europäischen Markt bis 2030 ... 114
Abbildung 58: Energiebedarfe für unterschiedliche Antriebsarten zwischen 2015 und 2030 ... 115
Abbildung 59: Energiebedarf für beide Szenarien pro Antriebsstrang ... 116
Abbildung 60: TtW CO_2-Emissionspfade für den europäischen PKW-Bestand ... 117
Abbildung 61: WtW CO_2-Emissionspfade für den europäischen PKW-Bestand ... 118
Abbildung 62: Vorgehen zur Ermittlung der durch Elektromobilität betroffenen Beschäftigten ... 128
Abbildung 63: Entwicklung von PKW-Absatz und PKW-Produktion in China ... 129
Abbildung 64: Entwicklung von In- und Auslandsproduktion deutscher OEM ... 130
Abbildung 65: Versorgung der außereuropäischen Märkte durch deutsche OEM ... 130
Abbildung 66: Vorgehen zur Ermittlung der durch neue Komponenten betroffenen Beschäftigten ... 133
Abbildung 67: Beschäftigtenentwicklung bei den deutschen OEM ... 147
Abbildung 68: Beschäftigung in der Automobilzulieferindustrie nach Berufen, 1999 und 2015 ... 150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der Antriebskonzepte ... 21
Tabelle 2: Übersicht Komponenten nach Antriebskonzept ... 29
Tabelle 3: Potenziale unterschiedlicher Batterietechnologien für Automobilanwendungen ... 33
Tabelle 4: Schwerpunkte und Querschnittsthemen der Strategie „digital@bw“ ... 48
Tabelle 5: Umsatz, Exportquote und sozialversicherungspflichtig Beschäftigte 2016 ... 72
Tabelle 6: Umsatzsteigerung „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ 2009–2017 ... 76
Tabelle 7: Investitionen, Investitionsintensität und Investitionsquote ... 77
Tabelle 8: Beschäftigung des produzierenden Gewerbes im Automobilcluster B-W ... 83
Tabelle 9: Beschäftigte des baden-württembergischen Automobilclusters nach Tätigkeiten ... 86
Tabelle 10: Rahmenparameter für die Szenarien (Deutschland) ... 105
Tabelle 11: Stückzahlentwicklung relevanter Komponenten ... 110
Tabelle 12: Entwicklung der CO_2-Emissionen für Deutschland, Italien und Polen 2010–2030 ... 117
Tabelle 13: Fade-out-Effekte im automobilen Wertschöpfungscluster ... 132
Tabelle 14: Stückzahlen neuer Komponenten im Jahr 2030 ... 134
Tabelle 15: Fade-in-Effekte durch neue E-Mobilitäts-Komponenten ... 135
Tabelle 16: Beschäftigungseffekte Elektromobilität im Kfz-Gewerbe ... 137
Tabelle 17: Beschäftigungseffekte Elektromobilität im gesamten Automobilcluster Baden-Württemberg ... 139
Tabelle 18: Beschäftigungseffekte Elektromobilität in den Produktionswerken ... 141

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AnÜ	Arbeitnehmerüberlassung/Leiharbeit
AZI	Automobilzuliefererindustrie
BAU	Business as usual
BEV	Battery Electric Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
bl	Barrel
BW	Baden-Württemberg
CAN	Controller Area Network
CCS	Combined Charging System
CD	Charge Depleting
CIM	Computer-integrated Manufacturing
CNG	Compressed Natural Gas
COP	Conference of the Parties
CPS	Cyber-physische Systeme
CS	Charge Sustaining
DC	Direct Current (Gleichstrom)
D	Diesel
D-FHEV	Diesel Full Hybrid Electric Vehicle
DL	Dienstleistung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DV	Datenverarbeitung
EV	Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FHEV	Full Hybrid Electric Vehicle
FuE	Forschung und Entwicklung
G	Gasoline
G-FHEV	Gasoline Full Hybrid Electric Vehicle
GaN	Galliumnitrid
G-PHEV	Gasoline Plug-in Hybrid Electric Vehicle
GPS	Global Positioning System
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	International Energy Agency
IT	Informationstechnologie
Kfz	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCC	Low Cost Country
LIDAR	Light Detection and Ranging System
Li-Ion	Lithium-Ionen
Li-Luft	Lithium-Luft
Li-S	Lithium-Schwefel
LKW	Lastkraftwagen
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiMh	Nickel-Metall-Hydrid
NKW	Nutzfahrzeuge
NPE	Nationale Plattform Mobilität
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
REEV	Range-extended Electric Vehicle
RFID	Radio Frequence Identification
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SIM	Subscriber Identity Module
STZ	Stuttgarter Zeitung
TCO	Total Cost of Ownership
TtW	Tank-to-Wheel
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USD	US-Dollar
VDA	Verband der Automobilindustie e.V.
VECTOR21	Vehicle Technology Scenario Model
VEU	Verkehrsentwicklung und Umwelt
VG	Verarbeitendes Gewerbe
WLAN	Wireless Local Area Network
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WtW	Well-to-Wheel
WZ	Wirtschaftszweig
ZEV	Zero Emission Vehicles

Impressum

Herausgeber
e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. –
Institut für Fahrzeugkonzepte:
Benjamin Frieske, Bent van den Adel

IMU Institut GmbH:
Dr. Martin Schwarz-Kocher, Sylvia Stieler

BridgingIT GmbH:
Andreas Schnabel, Dr. Reha Tözün

Redaktion und Koordination der Studie
e-mobil BW GmbH
Isabell Knüttgen, Dr. Wolfgang Fischer

Layout/Satz/Illustration
markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos
Umschlag: MichaelUtech/istockphoto
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Druck
Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker

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

Februar 2019

© 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.

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

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C110650
www.fsc.org

klimaneutral gedruckt
www.klima-druck.de
ID-Nr. 1977830
bvdm.