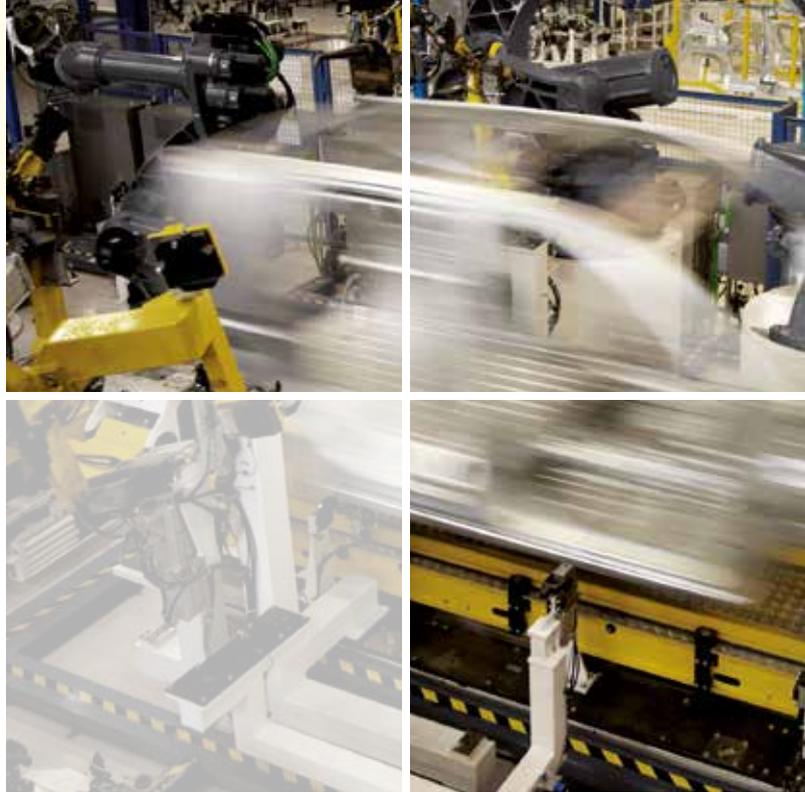


STRUKTURSTUDIE BW^e MOBIL 2015

Elektromobilität in Baden-Württemberg





STRUKTURSTUDIE BW^e mobil 2015

Elektromobilität in Baden-Württemberg

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IA0

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

INHALT

Vorwort	4
Kernergebnisse und Implikationen	6
1 Ausgangslage und Zielsetzung	7
2 Technologie	8
2.1 Elektromobile Antriebs- und Fahrzeugkonzepte	8
2.2 Energiespeicher	10
2.2.1 Energiespeicher allgemein	10
2.2.2 Lithium-Batteriezellen	12
2.2.3 Zukünftige Zellchemien	14
2.2.4 Supercaps	16
2.2.5 Redox-Flow-Batterien	16
2.2.6 Batteriesystem	17
2.3 Komponenten des Antriebsstrangs	18
2.3.1 Elektrische Maschine	18
2.3.2 Leistungselektronik	23
2.3.3 Getriebe	26
2.3.4 Range-Extender	26
2.3.5 Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs	27
2.4 Sonstige Fahrzeugkomponenten	28
2.4.1 Nebenaggregate	28
2.4.2 Klimatisierung	29
2.5 Konduktive und induktive Ladesysteme	31
2.5.1 Konduktive Ladesysteme	31
2.5.2 Induktive Ladesysteme	34
3 Markt und Wertschöpfung	38
3.1 Die Bedeutung des Automobils für Baden-Württemberg	38
3.1.1 Automobilstandort Baden-Württemberg	38
3.1.2 Aktuelle Entwicklung bei Neuzulassungen	39
3.1.3 Struktur der Automobilindustrie in Baden-Württemberg	40
3.2 Marktentwicklung	41
3.3 Marktszenarien	44
3.3.1 Entwicklung des globalen Automobilmarkts	44
3.3.2 Marktentwicklung alternativer Antriebe global	46
3.3.3 Marktentwicklung alternativer Antriebe in Deutschland	48
3.4 Veränderungen der Wertschöpfungsarchitektur	48
3.4.1 Referenzmodell und Annahmen der Wertschöpfungsbestimmung	49
3.4.2 Kostentreiber und -entwicklungen in der Herstellung von Antriebskomponenten	49
3.4.3 Kostenstrukturen/-entwicklungen verschiedener Antriebskonzepte	52
3.5 Zukünftige Auswirkungen aus Sicht der Wertschöpfung	54
3.5.1 Wertschöpfungsentwicklungen bei konventionellen Antrieben/Komponenten	54
3.5.2 Wertschöpfungsentwicklungen bei neuen Antrieben/Komponenten	55
3.5.3 Zusammenfassung der Wertschöpfungsentwicklungen	57
3.6 Effekte auf die Beschäftigung in Baden-Württemberg	58
3.6.1 Bestimmung der Beschäftigungseffekte	58
3.6.2 Potenziale durch konventionelle Antriebe/Komponenten	58
3.6.3 Theoretische Potenziale durch neue Antriebe/Komponenten	59
3.6.4 Diskussion der Ergebnisse	60
4 Aktivitäten und Erfahrungen	64
4.1 Baden-Württemberg auf dem Weg zum Leitmarkt	64
4.1.1 Instrumente zur Förderung der Marktdurchdringung	64
4.1.2 Märkte und Fördermodelle im internationalen Vergleich	66
4.1.3 Schlussfolgerungen für Baden-Württemberg	67
4.2 Baden-Württemberg auf dem Weg zum Leitanbieter	68
4.3 Expertenbefragung zum Status quo der Elektromobilität	74
4.3.1 Rückblick, Status quo und Ausblick zum Stand der Elektromobilität in Deutschland und Baden-Württemberg	75
4.3.2 Expertensicht auf die Forschungsaktivitäten deutscher Unternehmen und die Position im internationalen Wettbewerb	77
4.3.3 Handlungsbedarf im Bereich der Ladeinfrastruktur	79
4.3.4 Rückblick auf die bisherige Förderpolitik und Ausblick in die Zukunft	81
4.4 Elektromobilität aus Sicht des Anwenders	84
4.4.1 Nutzungshürden von Elektrofahrzeugen aus Sicht privater Nutzer	84
4.4.2 Erfahrungen aus Anwendungsprojekten in Baden-Württemberg	85
5 Bestehende Herausforderungen aus Akteurssicht	90
Abbildungsverzeichnis	92
Abkürzungsverzeichnis	94
Literaturverzeichnis	96
Publikationen der e-mobil BW	108

VORWORT

Elektromobilität ist die Mobilität der Zukunft. Die kommenden Jahre werden durch striktere regulative Vorgaben hinsichtlich der Verringerung von CO₂-Emissionen von Fahrzeugen geprägt sein. Gleichzeitig werden fossile Brennstoffe zunehmend knapper. Konzepte für eine nachhaltige Mobilität, in denen zunehmend elektrifizierte Fahrzeuge eine wichtige Komponente darstellen, bilden eine wesentliche Voraussetzung, um diese ökologischen Herausforderungen zu meistern und gleichzeitig wirtschaftliches Wachstum zu schaffen.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedeutet für die Automobilindustrie einen enormen Wandel und bietet gerade deshalb große Chancen, aber auch Risiken für alle beteiligten Akteure. Durch entfallende und neue Komponenten und Technologien werden sich Wertschöpfungsanteile zwischen unterschiedlichen Akteuren und möglicherweise auch zwischen Wirtschaftsregionen neu verteilen.

Baden-Württemberg hat durch seine traditionell gewachsenen Strukturen und seine besondere Unternehmenslandschaft – unterstützt durch exzellente Forschungs- und Hochschuleinrichtungen – die besten Voraussetzungen, auch zukünftig eine weltweit führende Rolle einzunehmen. Neben den großen Automobilherstellern und führenden IT-Unternehmen sind es im Land auch die Mittelständler, die einen maßgeblichen Beitrag zur Wertschöpfung der Automobilindustrie leisten. Ihre innovativen Produkte, Lösungen und Dienstleistungen finden weltweiten Absatz und Anerkennung.

Neben der Vernetzung der Branchen ist die aktive Einbindung der kleinen und mittleren Unternehmen in den Technologiewandel eine wesentliche Voraussetzung für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit Baden-Württembergs. Bereits seit Jahren gibt es daher zahlreiche Aktivitäten und Clusterinitiativen im Land, die



den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie fördern und zur Entwicklung gemeinsamer, branchenübergreifender Lösungen beitragen.

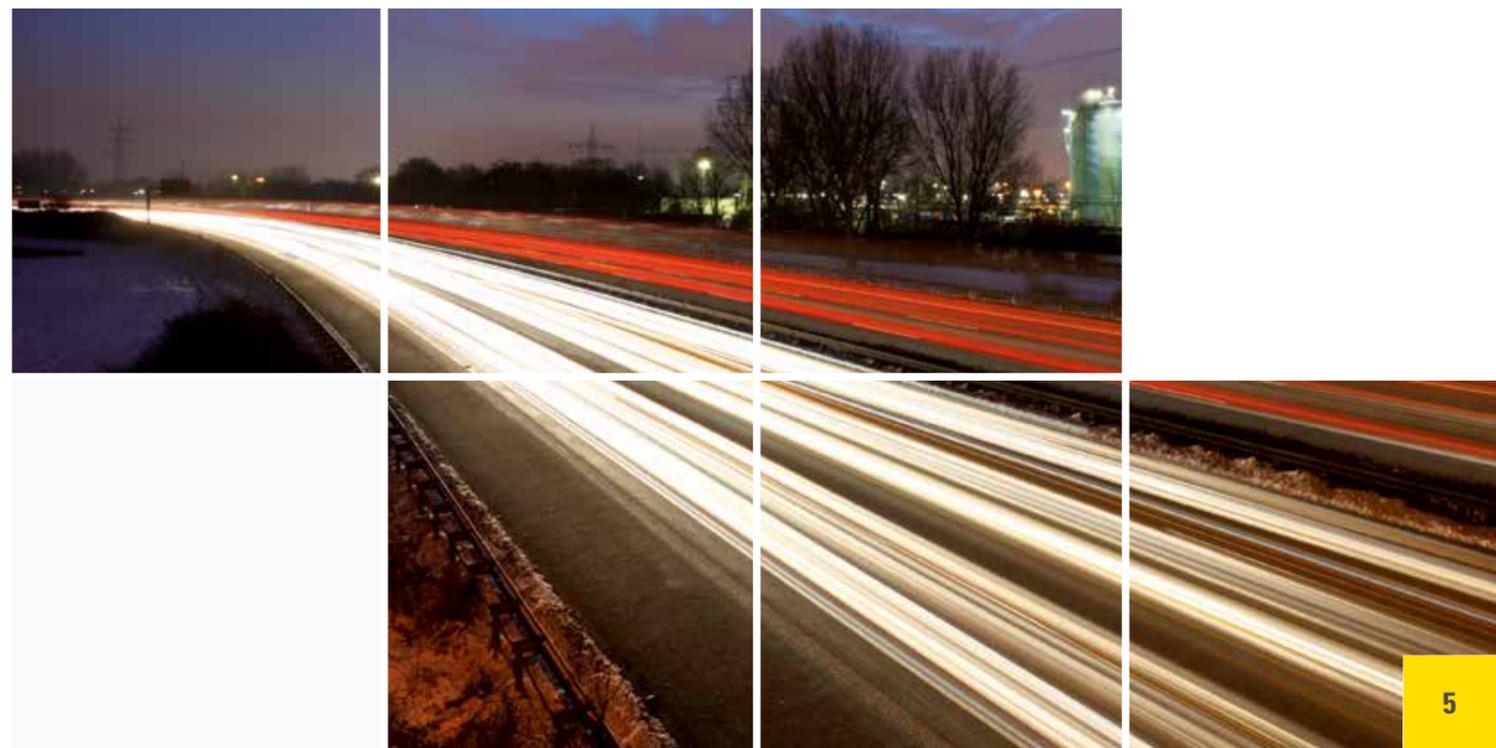
Die vorliegende Studie gibt einen Einblick in den Wandel des Wertschöpfungssystems im Hinblick auf alternative Mobilitätslösungen und zeigt – ausgehend von der heutigen Positionierung des Landes – zukünftige Potenziale und Risiken für die baden-württembergische Industrie auf.

Dr. Nils Schmid MdL

Stellvertretender Ministerpräsident und Minister für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg

Franz Loogen

Geschäftsführer e-mobil BW GmbH



KERNERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN

DIE ELEKTRIFIZIERUNG IST DER WEG IN DIE ZUKUNFT

Ein Treiber für eine breite Elektrifizierung ist der von der EU für neue PKW festgelegte Grenzwert von durchschnittlich 95 Gramm CO₂-Ausstoß pro Kilometer ab dem Jahr 2020. Um die notwendigen Effizienzsteigerungen für dieses Ziel zu erreichen, müssen der verbrennungsmotorische Teil des Antriebsstrangs weiterhin optimiert und die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und Gesamtfahrzeugs vorangetrieben werden.

DER KONVENTIONELLE ANTRIEB VERLIERT SEINE STELLUNG

Im Jahr 2030 wird, maßgeblich aus Kostengründen, nur noch rund ein Viertel der neu zugelassenen Fahrzeuge ausschließlich einen konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieb besitzen. Ein weiteres Viertel der Neuzulassungen wird, bedingt durch die notwendige Verbrauchsoptimierung, elektrifizierte Komponenten aufweisen. Nahezu die Hälfte der zu diesem Zeitpunkt neu auf den Markt kommenden Fahrzeuge besitzt einen elektrifizierten Antriebsstrang mit einer relevanten elektrischen Reichweite.

ELEKTRISCHE KOMPONENTEN BRINGEN MILLIARDEN

Aufgrund der Marktentwicklung kommt es bei den von der Elektrifizierung betroffenen Komponenten zu einer Steigerung des globalen Marktvolumens um 216,78 Milliarden Euro (2025) bzw. 341,25 Milliarden Euro (2030) gegenüber dem Jahr 2013. Rund die Hälfte dieses Zuwachses entfällt im Jahr 2025 bereits auf rein elektrische Komponenten (Leistungselektronik inklusive Ladegerät, elektrische Maschine, Batteriesystem, Brennstoffzellensystem). Für das Jahr 2030 erhöht sich der Anteil dieser Komponenten am Gesamtwachstum auf rund 60 %.

EFFIZIENZTECHNOLOGIEN SIND EIN JOBMOTOR

In Summe beläuft sich das Gesamtbeschäftigungspotenzial im Automobilssektor im Jahr 2025 auf gut 18.000 Beschäftigte für Baden-Württemberg im Vergleich zum Referenzjahr 2013. Im Bereich der „konventionellen“ Komponenten (Verbrennungsmotor, Abgassystem sowie Getriebe) resultiert für das Land Baden-Württemberg im Jahr 2025 ein zusätzliches Marktpotenzial von rund 2,85 Milliarden Euro, was ein Beschäftigungspotenzial von ca. 5.600 Beschäftigten darstellt.

Weitere Marktpotenziale für das Land bieten die Effizienztechnologien und die Nebenaggregate bzw. deren Elektrifizierung mit einem Zuwachs von insgesamt 3,47 Milliarden Euro (+6.900 Beschäftigte). Für das Jahr 2025 ergibt sich durch die Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs ein ausschöpfbares Marktpotenzial von rund 3,1 Milliarden Euro (+5.600 Beschäftigte). Ein theoretisches Potenzial für ca. 5.800 weitere Beschäftigte liegt in der Produktion von Batteriezellen und der Übernahme eines größeren Wertschöpfungsumfanges bei der Herstellung der elektrischen Antriebsstrangkomponenten.

FORSCHUNG BRINGT DIE SPITZENPOSITION

In Baden-Württemberg gibt es insbesondere im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West innovative Forschungsprojekte, die Potenziale für eine Leitanieterschaft erschließen. Zu den Themenfeldern gehören unter anderem der Anlagenbau (unter anderem in den Bereichen Zellfertigung und Batterieherstellung) sowie die Herstellung von Leistungselektroniken, elektrischen Maschinen und Aktivmaterialien für die Zellfertigung. Zusätzlich laufen im Schaufenster Elektromobilität LivingLab BW[®] mobil anwendungsorientierte F&E-Projekte zur strategischen Unterstützung der Marktvorbereitung. Solche Forschungsaktivitäten sind auch weiterhin wichtig und notwendig, um Kosten zu senken sowie ein attraktives Marktportfolio im aufstrebenden Markt der Elektromobilität generieren zu können.

ENTSCHEIDER SETZEN AUF ELEKTROMOBILITÄT

Die in der Studie befragten Experten aus Wirtschaft und Politik sind sich einig, dass sich das Thema Elektromobilität nach Höhen und Tiefen in den letzten fünf Jahren als fester Bestandteil in den Technologie-Roadmaps und F&E-Strategien der Unternehmen etabliert hat.

NUR GEMEINSAM SIND WIR ERFOLGREICH

Für die Etablierung der Elektromobilität als attraktiver Zukunftsmarkt müssen Wirtschaft, Wissenschaft und öffentliche Hand auch weiterhin sehr eng zusammenarbeiten. Die Ausschöpfung der hierdurch entstehenden Synergien bildet das Fundament für eine nachhaltige Positionierung Baden-Württembergs als einer der führenden Anbieter und Märkte der Elektromobilität.

Kapitel 1

AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Die Elektromobilität in Baden-Württemberg hat seit der Erstveröffentlichung der Studie 2008 eine intensive und dynamische Entwicklung genommen. Ladestationen und Elektrofahrzeuge werden mehr und mehr Teil des Stadt- und Landschaftsbilds.

Die Ausgangslage hat sich für die beteiligten Akteure, unter anderem durch Programme wie das Schaufenster LivingLab BW[®] mobil und den Spitzencluster Elektromobilität Süd-West, entschieden verbessert. Darüber hinaus wurden beispielsweise Bildungsangebote mit Elektromobilitätsbezug etabliert. Gleichwohl bleiben Herausforderungen bestehen. Forschungsbedarf ist weiterhin in technologischen wie auch in marktnahen Bereichen gegeben [NPE (2014a)].

Die vorliegende „Strukturstudie BW[®] mobil 2015“ ist eine vollständig aktualisierte Neuauflage der vorherigen Strukturstudien aus den Jahren 2009 und 2011. Ziel der neuen Studie ist eine umfassende Betrachtung der Elektromobilität in Baden-Württemberg. Dieser Absicht folgend befasst sich die Strukturstudie mit den Themenfeldern Technologie (Kapitel 2), Markt und Wertschöpfung (Kapitel 3) sowie Aktivitäten und Erfahrungen (Kapitel 4).

In Kapitel 2 werden die technologischen Grundlagen der Elektromobilität dargestellt. Außerdem wird ein Einblick in den Stand der Technik von Komponenten und Systemen gegeben, die in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen. Das Kapitel schafft somit eine Wissensbasis für die darauf folgenden Analysen von Wertschöpfungs- und Beschäftigungsveränderungen.

Mit derartigen Untersuchungen befasst sich Kapitel 3. Dabei werden unter anderem die folgenden Fragen beantwortet:

- Welche Marktentwicklung ist für die Elektromobilität zu erwarten?
- Welche Komponenten von Elektrofahrzeugen und welche Prozesse haben die höchsten Wertschöpfungsanteile?
- Was bedeutet der elektromobile Wandel für die Wirtschafts- und Beschäftigungsstruktur Baden-Württembergs?



Das Kapitel 4 beleuchtet den Stand der Elektromobilität in Baden-Württemberg aus Sicht zentraler Akteure aus Wirtschaft und Politik sowie der Anwender. Deren Erfahrungen werden an durchgeführten und initiierten Aktivitäten gespiegelt. Abschließend werden die akteurspezifischen Herausforderungen dargestellt.

Kapitel 5 zieht schließlich ein Fazit und bereitet die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend auf.

Die Strukturstudie fokussiert auf elektromobile Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkonzepte. Im Vergleich dazu beschreibt die Systemanalyse BW[®] mobil ihrer Bezeichnung folgend das System Elektromobilität (beispielsweise Energiesysteme, Informations- und Kommunikationssysteme, Flottenmanagementsysteme) und Wege in die Elektromobilität (beispielsweise Industrialisierung, Infrastruktur, Intermodalität). Bei Interesse an den genannten Themen wird folglich auf die Systemanalyse BW[®] mobil verwiesen.

Kapitel 2 TECHNOLOGIE

2.1 ELEKTROMOBILE ANTRIEBS- UND FAHRZEUGKONZEPTE

„Elektromobile Antriebskonzepte“ gewinnen zunehmend an Bedeutung. Dabei werden unter diesem Begriff sämtliche Personenkraftwagen, Nutzfahrzeuge sowie Zweiräder (Roller, Fahrräder) im Straßenverkehr verstanden, die zumindest einen Teil der Strecke rein elektrisch angetrieben zurücklegen können, gleich, ob sie ihre Energie von einer Batterie oder einer Brennstoffzelle beziehen. Weiterhin werden Fahrzeugkonzepte berücksichtigt, die elektrische Komponenten zur Optimierung des Antriebsstrangs besitzen. Im Rahmen dieses Kapitels werden dazu die unterschiedlichen Konzepte, technischen Grundlagen sowie mögliche Entwicklungspfade aufgezeigt.

Fahrzeuge können sowohl nach der Art des Antriebskonzepts als auch nach Fahrzeugtyp unterschieden werden. Die Antriebskonzepte wiederum lassen sich in konventionell und elektromobil unterteilen, wobei unter konventionellen Antriebskonzepten Fahrzeuge mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren verstanden werden. Eine weiterentwickelte Variante stellen elektrifizierte konventionelle Fahrzeuge dar, deren Antriebsstrang (unter Anwendung von Entwicklungen für elektromobile Antriebskonzepte) verbrauchsoptimiert ist. Elektromobile Antriebskonzepte umfassen,

wie in Abbildung 1 ersichtlich, Hybridfahrzeuge (parallel, HEV), Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV), serielle Hybride (Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung, REEV) sowie batterieelektrische Fahrzeuge (reine Elektrofahrzeuge, BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) [NPE (2012)].

ELEKTRIFIZIERTES KONVENTIONELLES FAHRZEUG

Charakteristische Merkmale:

Derzeitige und zukünftige Fahrzeuge setzen sich aus verschiedenen der folgenden Merkmale zusammen (eine repräsentative Konfiguration zeichnet sich nicht ab): Vortrieb durch Verbrennungsmotor; Senkung der CO₂-Emissionen durch mehrere elektrische Systeme innerhalb des Motors; Ersatz bislang mechanisch angetriebener Komponenten durch elektrische Aggregate; Ergänzung neuer, ebenfalls elektrischer Technologien zur weiteren Effizienzsteigerung; Möglichkeit zur Bremsenergieerückgewinnung zur Entlastung des Generators oder zur direkten Versorgung von elektrifizierten Nebenaggregaten (Micro-Hybrid).

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Ford Focus mit EcoBoost-Motor, Mercedes-Benz A-Klasse/ B-Klasse BlueEFFICIENCY, BMW 1er/3er EfficientDynamics Edition, Volvo (alle Modelle), VW Golf VIII

HYBRIDFAHRZEUG (PARALLELER HYBRID, HEV)

Charakteristische Merkmale:

Elektromotor zur Unterstützung des Fahrantriebs; Batterie durch Rekuperation aufladbar; Kombination eines klassischen Verbrennungsmotors mit Elektromotor; rein elektrischer Antrieb teilweise möglich über geringe Reichweite. Je nach Unterstützung durch den Elektromotor wird auch von Mild- oder Full-Hybrid gesprochen.

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Toyota Prius, Mercedes-Benz E 300 BlueTEC HYBRID, VW Jetta Hybrid

PLUG-IN-HYBRIDFAHRZEUG (PHEV)

Charakteristische Merkmale:

Elektromotor mit am Netz aufladbarer Batterie; Kombination von klassischem Verbrennungsmotor mit Elektromotor; rein elektrischer Antrieb möglich, abhängig von Batteriegröße und Nutzung. Der Unterschied zum HEV liegt in der Möglichkeit der Aufladung der Batterie über das Netz.

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Toyota Prius Plug-in, Porsche Panamera S E-Hybrid, Mercedes-Benz S 500 PLUG-IN HYBRID, BMW i8

SERIELLER HYBRID

(ELEKTROFAHRZEUG MIT REICHWEITENVERLÄNGERUNG, REEV)

Charakteristische Merkmale:

Starker Elektromotor mit am Netz aufladbarer Batterie; rein elektrischer Antrieb; modifizierter Verbrennungsmotor mit beschränkter Leistung zur Aufladung der Batterie.

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Chevrolet Volt, Opel Ampera, Cadillac ELR, BMW i3

BATTERIEELEKTRISCHES FAHRZEUG (BEV)

Charakteristische Merkmale:

Starker Elektromotor mit am Netz aufladbarer Batterie; kein Verbrennungsmotor, kein Treibstofftank, keine Abgasanlage; für die Batterieladung werden lediglich das Stromnetz und Rekuperation genutzt.

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Mitsubishi i-MiEV, NISSAN LEAF, smart fortwo electric drive, Tesla Model S, Mercedes-Benz B-Klasse Electric Drive

BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG (FCEV)

Charakteristische Merkmale:

Elektromotor wird über Energieträger Wasserstoff und Energiewandler Brennstoffzelle mit elektrischer Energie versorgt; verfügt ebenfalls über Batterie (Rekuperation).

Beispiele aktueller und geplanter Modelle:

Honda FCX Clarity, Toyota Mirai, Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL

Bezüglich der Fahrzeugkonzepte kann zwischen Fahrzeugen des Individualverkehrs (PKW, Zweiräder, Nutzfahrzeuge, Arbeitsfahrzeuge) und des öffentlichen Verkehrs (Busse, schienengebundene Fahrzeuge, Schiffe) differenziert werden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft Ausführungen für unterschiedliche Einsatzgebiete.

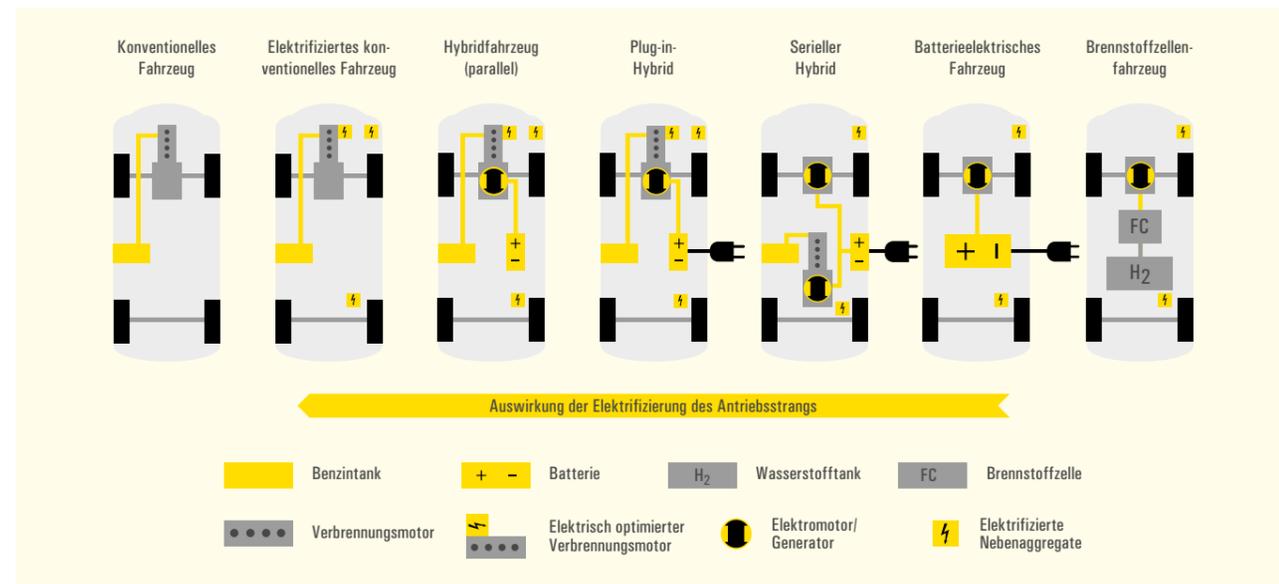


Abbildung 1: Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb.¹

¹ Eigene Darstellung.



Abbildung 2: Die Vielfalt elektromobiler Fahrzeugkonzepte.²

² Eigene Darstellung.

Kapitel 2

War die Marktverfügbarkeit von elektromobilen Fahrzeugen vor wenigen Jahren noch sehr gering, so verändert heute eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte der Hersteller das früher gewohnte Bild der Automobillandschaft. Neben einigen neuen Hybridfahrzeugen bieten die Automobilbauer vor allem zahlreiche Plug-in-Hybride sowie batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge an oder stellen deren Markteinführung in Aussicht. Im Bereich der Brennstoffzellenfahrzeuge zeichnet sich für die nächsten Jahre noch eine sehr geringe Marktverfügbarkeit ab. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der Ankündigungen von Fahrzeugherstellern für den modifizierten Personen-Individualverkehr mit zeitlicher Perspektive.

2.2 ENERGIESPEICHER

Ein Elektroantrieb muss die benötigte elektrische Energie immer aus einer geeigneten Energiequelle beziehen – diese setzt er dann hocheffizient in Antriebsleistung um. Der Energiespeicher ist damit

die Kernkomponente der Elektromobilität, da er sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Reichweite des Fahrzeugs maßgeblich bestimmt.

2.2.1 ENERGIESPEICHER ALLGEMEIN

Grundsätzlich eignen sich wiederaufladbare Batterien, Kondensatoren und der Energieträger Wasserstoff in Verbindung mit dem Energiewandler Brennstoffzelle. Als Batterien wurden früher für Elektrofahrzeuge Blei-Säure- oder nickelbasierte Technologien verwendet (z.B. Nickel-Metallhydrid (NiMH), heute noch in Hybridfahrzeugen). Diese werden aber von moderneren Lithium-Ionen-Technologien zunehmend vom Markt verdrängt. Wesentliche Kriterien zur Auswahl einer Batterietechnologie stellen die gravimetrische Energiedichte [Wh/kg] sowie die Leistungsdichte [W/kg] dar. Diese werden üblicherweise in einem sogenannten Ragone Plot dargestellt (siehe Abbildung 4). Weitere wichtige Kriterien sind die Sicherheit, die kalendarische Lebensdauer, die

Zyklusfestigkeit, der Wirkungsgrad, die nutzbare Kapazität (Depth of Discharge, DoD), die Selbstentladungsrate, die vorausgesetzten Umgebungsbedingungen und natürlich die Kosten.

Im Vergleich zu den aktuell nutzbaren gravimetrischen Energiedichten von Batterien sind die Werte von Wasserstoff und auch von fossilen Brennstoffen wie Benzin, Diesel, Erdgas (CNG) und Autogas (LPG) deutlich höher (siehe Abbildung 5). Bei den Angaben für Lithium-Ionen handelt es sich um den heutigen Technologiestand auf Zellebene, der sich im Zuge weiterer Entwicklungen noch erhöhen kann, und bei den Verbrauchsstoffen um physikalisch bedingte Maximalwerte. Für den Einsatz in Fahrzeugen spielt auch die volumetrische Energiedichte eine wichtige Rolle, vor allem bei den gasförmigen Energieträgern. Hier liegen Benzin und Diesel neben den Batteriespeichern auch vor Wasserstoff. Letzterer kann gasförmig (in der Abbildung: GH_2) bei einem heute gängigen Druck

von 350 bis 700 bar oder flüssig (in der Abbildung: LH_2) bei sehr kalten Temperaturen gespeichert werden. Der Vergleich zeigt, dass Traktionsbatterien bei gleicher Kapazität deutlich schwerer als Benzintanks ausfallen müssen und Wasserstofftechnologien deutlich mehr Bauraum erfordern. Bei Wasserstofffahrzeugen muss zusätzlich das Gewicht und der Bauraum für die Brennstoffzellen berücksichtigt werden.

Die Nachteile bei den Energiedichten können bei der Energieumsetzung in Elektrofahrzeugen durch höhere Wirkungsgrade teilweise kompensiert werden. Der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren liegt im Bereich von 20 bis 30 %, der von Elektromotoren bei 80 bis 95 % [Photonics (2014)]. Zusätzlich muss im Fahrzeug aber auch der Wirkungsgrad für das Speichersystem berücksichtigt werden, welcher für Lithiumbatterien im Bereich von 80 bis 90 % liegt, bei Brennstoffzellen im Bereich von 60 % [Fraunhofer ISI (2012); Greengear (2014)].



Abbildung 3: Auswahl aktueller und geplanter elektromobiler Fahrzeugkonzepte.³

³ Eigene Darstellung.

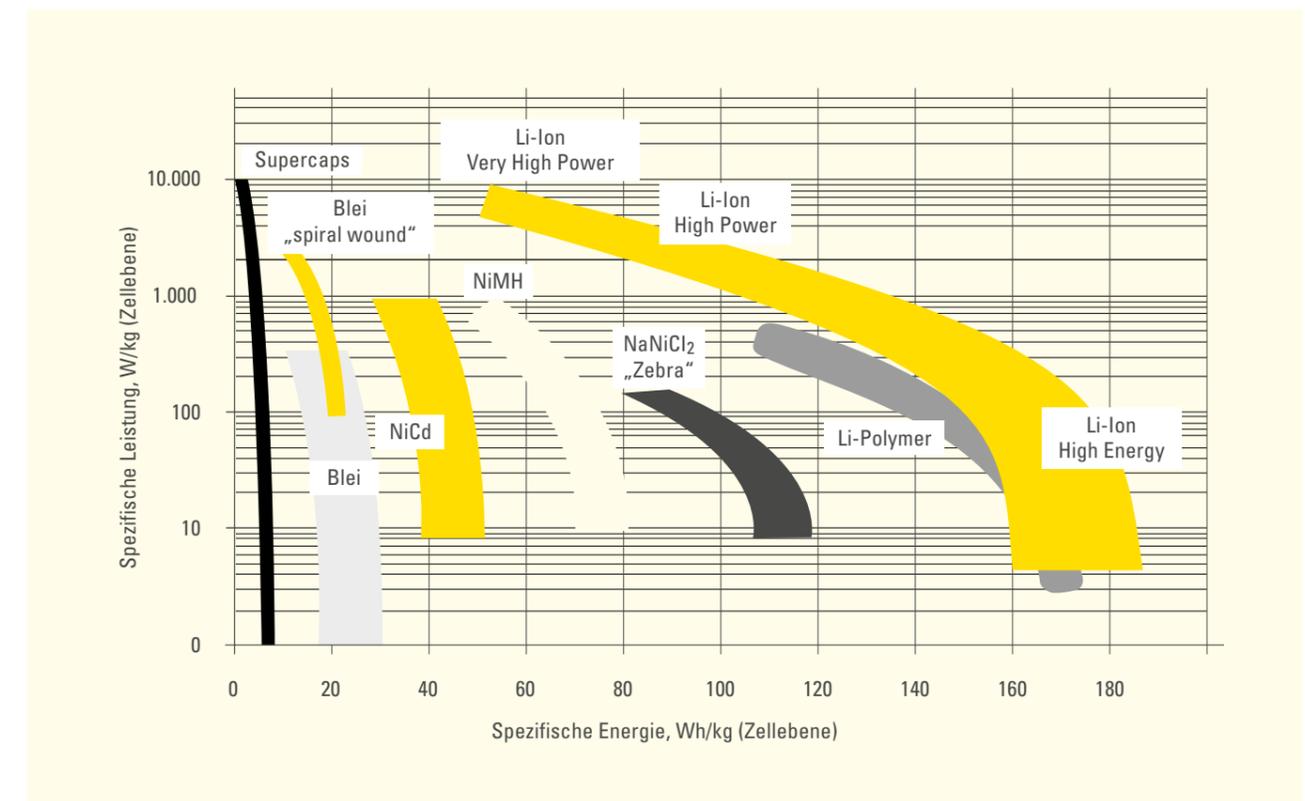


Abbildung 4: Energie- und Leistungsdichten unterschiedlicher Speichertechnologien.⁴

⁴ Vgl. Sauer (2009).

Kapitel 2

2.2.2 LITHIUM-BATTERIEZELLEN

AUFBAU UND CHARAKTERISTIKA

Die Lithium-Batterie besitzt unter anderem aufgrund ihrer verhältnismäßig guten Energiedichte (50 bis 250 Wh/kg) und Leistungsdichte (bis zu 5.000 W/kg) das höchste Potenzial für den Einsatz in zukünftigen Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen. Auch spricht die erreichbare hohe Zyklfestigkeit (über 5.000 Zyklen bis 80 % DoD) sowie eine hohe Zykleneffizienz (etwa 96 % bei 80 % DoD) für einen Einsatz der Batterie im Fahrzeug. Allerdings sind Lithium-Batterien verhältnismäßig teuer. Die Batteriezellen bestehen aus 2 Elektroden (negative Anode und positive Kathode), welche von einem Separator getrennt werden und meist ein Elektrolyt enthalten. Wiederaufladbare Lithium-Batterien lassen sich je nach gewähltem Elektrodenmaterial sowie Separator und Elektrolyt in Lithium-Ionen-Batterien (Lithium-Ion mit flüssigem Elektrolyt sowie Lithium-Ion-Polymer mit Gelelektrolyt) und Lithium-Metall-Batterien (Lithium-Metall mit flüssigem Elektrolyt sowie Lithium-Polymer mit Polymerelektrolyt) unterteilen. Je nach Materialwahl ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften und Charakteristiken der Zellen [Fraunhofer ISI (2012); VDMA (2014)].

CONSUMER-BEREICH

Im Consumer-Products-Bereich werden Lithium-Ionen-Batterien

seit Langem eingesetzt. Meist finden hierbei eine Lithium-Kobaltdioxid-(LiCoO₂-)Kathode, eine Lithium-Grafit-Anode, ein organischer Elektrolyt und ein Polyethylen-Separator Verwendung. Japan, Korea und China führen diesen Markt hinsichtlich Technologie und Produktion an. Bei einem Einsatz dieser Consumer-Products-Zellen im Automobil erweisen sich allerdings Eigenschaftsausprägungen hinsichtlich Sicherheit, Lebensdauer und Alterung der Zellen als problematisch, die aufgrund kurzer Innovationszyklen oder geringer Belastungen im Consumer-Bereich nicht zum Tragen kommen. Dagegen bieten Consumer-Zellen vergleichsweise hohe Energiedichten (ca. 250 Wh/kg) zu moderateren Preisen, da die Technologie und Produktion schon einen Massenmarkt bedient (z.B. für Laptops).

AUTOMOBILE ANWENDUNGEN

Für das Elektrofahrzeug sind nicht nur neue Zellchemien, sondern auch neue Zelltypen gefragt. Im Fahrzeugbereich werden in der Regel prismatische Zellen oder Pouchzellen („Coffee-Bags“) verwendet, Rundzellen kommen seltener zum Einsatz. Der Trend geht hier zu größeren Zellen, die für die Anwendung in Batteriesystemen, die aus mehreren Zellen bestehen, zusammengefasst werden. Die Energiedichte liegt auf Zellebene heute bei über 150 Wh/kg, auf Systemebene bei etwa 120 Wh/kg [Korthauer (2013)]. Aus dem in Abbildung 4 erkennbaren Zielkonflikt zwischen Leis-

tungsdichte und Energiedichte resultiert je nach gewählter Zellchemie und Zellaufbau eine Differenzierung in Hochenergie- und Hochleistungsbatterien: Während die erste eine hohe Reichweite des Fahrzeugs ermöglicht, was beispielsweise bei einem batterieelektrischen Fahrzeug erwünscht ist, erlaubt die zweite eine starke Leistungsaufnahme und -abgabe, wie sie beispielsweise bei Rekuperation oder Boost-Funktionen im Hybrid gefordert ist.

Zu berücksichtigen ist hierbei auch die bei den Konzepten unterschiedliche nutzbare Batteriekapazität. Diese wird bei Hybriden auf einen sehr niedrigen Wert und eine sehr hohe Zyklenanzahl ausgelegt (d.h., man verwendet nur einen kleinen Teil der nominal verfügbaren Kapazität), bei batterieelektrischen Fahrzeugen beträgt sie teils mehr als 80 % bei einer geringeren Anzahl an Ladezyklen.

UNTERSCHIEDLICHE ZELLCHEMIEN

Für die Anwendung im Fahrzeug wurden bzw. werden zahlreiche Zelltechnologien bis zur Serienreife entwickelt. Eine Auswahl der gängigsten Varianten mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen findet sich in Abbildung 6. Da für neue Zellchemien vom Material über die Zellen und Batteriesysteme bis hin zur Anwendung im Fahrzeug Entwicklungszyklen von ungefähr zehn Jahren angesetzt werden können, werden diese Technologien auch in den kom-

menden Jahren den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen tragen [Hahn (2011)]. Abbildung 7 zeigt, welche Batteriezellen in aktuellen Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Weiterentwicklungen werden sich vor allem positiv auf die Herstellungskosten auswirken; sie werden aber erst mit einer Massenproduktion voll zum Tragen kommen. Preistreiber sind neben den aufwendigen, zeit- und energieintensiven Produktionsverfahren und hohen Maschinenkosten die Materialkosten für Anoden, Kathoden und Elektrolyte, aber auch für die verwendeten hauchdünnen Aluminium- und Kupferfolien [Huslage (2014); Tschsch (2014)]. Bei anderen Parametern ist ebenfalls Entwicklungspotenzial vorhanden, beispielsweise bei der Energiedichte. Bei dieser wird in den kommenden Jahren eine Erhöhung auf 250 Wh/kg angestrebt. Deutlichere Verbesserungen werden aber erst in nachfolgenden Batteriegenerationen mit neueren Materialkombinationen erwartet, da bei aktuellen Systemen selbst die theoretisch erreichbaren Energiedichten lediglich im Bereich von 400 Wh/kg liegen [Korthauer (2013)]. Weitere Entwicklungskriterien sind die Sicherheit, insbesondere bei Unfällen, sowie die Lebensdauer unter den hohen Anforderungen im Automobilbereich.

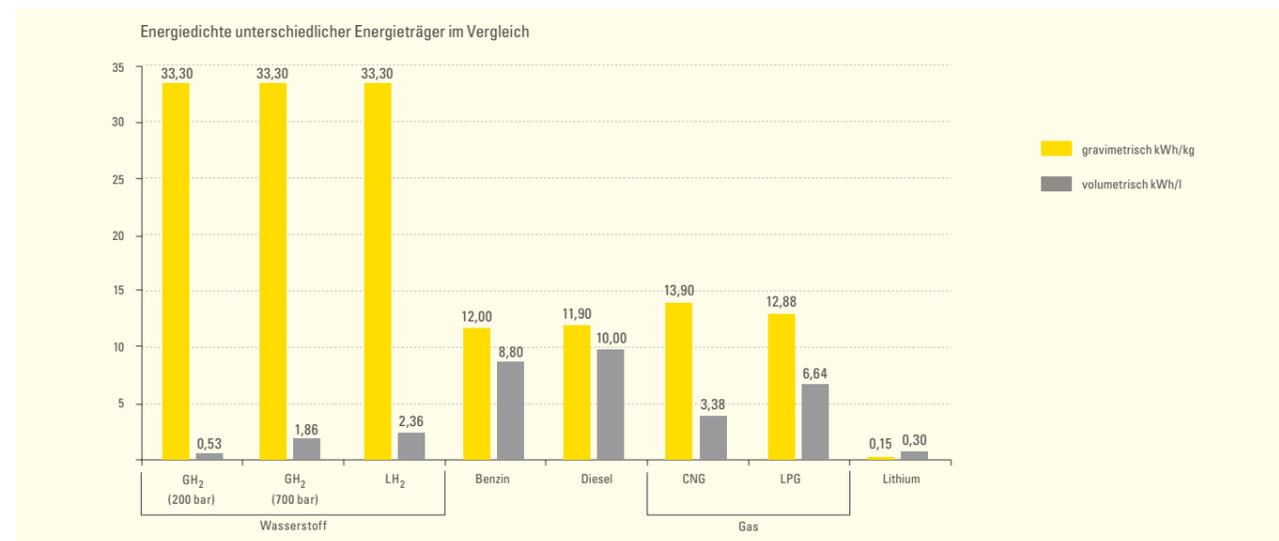


Abbildung 5: Energiedichte unterschiedlicher Energieträger im Vergleich.⁵

⁵ Vgl. Hycenta (2005); Hydrox (2014); VDMA (2014).

Abkürzung	LCO	LNO	NCA	NMC	LMO	LFP	LTO
Name	Lithium-Kobaltdioxid	Lithium-Nickel-dioxid	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-dioxid	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltdioxid	Lithium-Mangan-Spinelldioxid	Lithium-Eisen-phosphat	Lithium-Titanat
Kathode	LiCoO ₂	LiNiO ₂	Li(Ni _{0,85} Co _{0,1} Al _{0,05})O ₂	Li(Ni _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33})O ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	z.B.: LMO,NCA, ...
Anode	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
Zellspannung	3,7–3,9 V	3,6 V	3,65 V	3,8–4,0 V	4,0 V	3,3 V	2,3–2,5 V
Energiedichte	150 Wh/kg	150 Wh/kg	130 Wh/kg	170 Wh/kg	120 Wh/kg	130 Wh/kg	85 Wh/kg
Energie	+	o	+	o	+	+	++
Sicherheit	-	o	o	o	+	++	++
Lebenszeit	-	o	+	o	o	+	+++
Kosten	--	+	o	o	+	+	o

Abbildung 6: Unterschiedliche Materialvarianten bei Lithium-Batteriezellen.⁶

⁶ Vgl. Recharge (2013).

Kapitel 2

Zellhersteller	Chemie (Anode/Kathode)	Kapazität (Ah)	Form	Spannung (V)	Gewicht (kg)	Volumen (l)	Energiedichte (Wh/l)	Spez. Energie (Wh/kg)	Anwendung z.B. in (Firma) (Modell)	
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)										
AESC	G/LMO-NCA	33	Pouch	3,75	0,80	0,40	309	155	Nissan	Leaf
LG Chem	G/NMC-LMO	36	Pouch	3,75	0,86	0,49	275	157	Renault	Zoe
Li-Tec	G/NMC	52	Pouch	3,65	1,25	0,60	316	152	smart	fortwo
Li Energy Japan	G/LMO-NMC	50	prismatisch	3,7	1,70	0,85	218	109	Mitsubishi	i-MiEV
Samsung	G/LMO-NMC	64	prismatisch	3,7	1,80	0,97	243	132	Fiat	500
Lishen Tianjin	G-LFP	16	prismatisch	3,25	0,45	0,23	226	116	Coda	RV
Toshiba	LTO-NMC	20	prismatisch	2,3	0,52	0,23	200	89	Honda	Fit
Panasonic	G-NCA	3,1	zylindrisch	3,6	0,045	0,018	630	248	Tesla	Model S

Abbildung 7: Lithium-Batteriezellen unterschiedlicher Hersteller.⁷

2.2.3 ZUKÜNFTIGE ZELLCHEMIEN

Batterietechnologien zukünftiger Generationen basieren häufig auf metallischen Anoden, beispielsweise Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft. Hierdurch lassen sich signifikant höhere Energiedichten erreichen. Eine Herausforderung ist aktuell noch die Wiederaufladung: Hierbei kommt es zu einer ungleichmäßigen Ablagerung des Lithiums. Dadurch werden sogenannte Dendriten gebildet, die mit mehrmaligem Aufladen den Separator durchdringen und somit zum internen Kurzschluss und Ausfall der Zelle führen können. Zurzeit werden insbesondere Lithium-Schwefel für die mittelfristige Perspektive (2020 bis 2030) und Lithium-Luft für die langfristige Perspektive diskutiert (nach 2030). Neben der Leistungsfähigkeit der Zellen haben allerdings die Sicherheit und geforderte Lebensdauer die höchste Wichtigkeit für die Automobilbauer. Diese gilt es grundlegend zu erfüllen, bevor ein Serieneinsatz der Zellen wahrscheinlich wird.

LITHIUM-SCHWEFEL-ZELLEN

Eine Lithium-Schwefel-Zelle besteht im geladenen Zustand aus einer metallischen Lithium-Anode, die mit einer schwefeltragenden Kathode verbunden ist. Hierbei ergeben sich ein hoher Anteil an aktivem Material sowie eine große Oberfläche und gute Leitfähigkeit. Daraus resultieren eine theoretische Energiedichte von 2.600 Wh/kg [Korthauer (2013)]. Das mittelfristig technisch nutzbare

Potenzial wird auf bis zu 600 Wh/kg eingeschätzt, aktuelle Werte liegen bei 350 Wh/kg [Sionpower (2014)]. Die Zellspannung liegt etwa bei 2,1 V. Weitere Vorteile sind geringe Kosten, gute Materialverfügbarkeit des Schwefels und ein breiter Temperaturbereich für die Verwendung der Zellen [Friedrich (2014)]. Heutige Lithium-Schwefel-Zellen können aufgrund der bereits dargelegten Dendritenbildung nur bedingt wieder aufgeladen werden, Zyklenzahlen liegen unter Laborbedingungen lediglich bei maximal 500 bis 600. Weitere Probleme ergeben sich aus einer hohen Selbstentladung der Zellen („Shuttle-Mechanismus“) und der daraus resultierenden eingeschränkten Effizienz. Heutige Entwicklungen richten sich insbesondere auf die Reduzierung der Kostenstruktur der Elektroden, Erhöhung der tatsächlichen Energiedichte, Erhöhung der Zyklenfestigkeit (angestrebt > 2.000 Zyklen) und die Reduzierung der Selbstentladung [Tübke (2011); Hagen (2011)].

LITHIUM-LUFT-ZELLEN

Lithium-Luft-Batterien versprechen aktuell die größten Energiedichten. Die Anode besteht aus reinem Lithiummetall, während die Kathode aus einem porösen Mn_3O_4/C -Gemisch besteht und mit von außen zugeführter Luft versetzt wird. Die theoretisch erreichbare Energiedichte liegt bei 5.200 Wh/kg. Es handelt sich dabei um ein offenes System, bei dem die Zelle durch Sauerstoffaufnahme im entladenen Zustand schwerer wird. Ohne Berücksichtigung des Gewichts des Sauerstoffs liegt die theoretische Energiedichte so-

gar bei 11.000 Wh/kg und damit im Bereich konventioneller Kraftstoffe. Das technisch nutzbare Potenzial wird langfristig bei 1.700 Wh/kg gesehen (IBM, Polyplus), da zusätzliche Materialien eingebracht werden müssen, um Korrosion oder unerwünschte Nebenreaktionen mit Stickstoff, CO_2 oder Wasserdampf zu verhindern. Laborsysteme werden deshalb in reiner Sauerstoffumgebung betrieben und erreichen heute in der Praxis bis zu 700 Wh/kg (Polyplus). Die Zellspannung liegt dabei etwa bei 2,6 V. Problematisch ist heute die Reversibilität der chemischen Prozesse, weshalb Prototypen heute nur wenige Male (< 100) bei stark nachlassender Kapazität wieder aufgeladen werden können. Grund ist unter anderem eine Zersetzung der Elektrolyte. Lithium-Luft-Technologien befinden sich heute noch im Status der Grundlagenforschung. Ob und wann sich dieser Zelltyp in Serienanwendungen einsetzen lässt, ist heute noch nicht abzusehen, vor 2030 wird aber nicht mit einem Einsatz gerechnet [Korthauer (2013)].

HOCHVOLT-ZELLEN

Weitere Entwicklungen zielen darauf, höhere Spannungen in den Zellen zu ermöglichen. Damit könnte man mit einer geringeren Anzahl an Zellen auskommen. Zielgrößen liegen hier bei 5 V. Hochvolt-Materialien gelten bereits als anwendungstechnisch fortgeschritten (beispielsweise $LiNi_xMn_yCo_zO_2$, $LiCoPO_4$, $LiNiPO_4$, Hochvolt-Spinell) und könnten mittel- bis langfristig in Batteriesystemen zum Einsatz kommen [Hartnig (2011)]. Aktuelle Werte liegen bei 4,3 V. Der Spannungsbereich lässt sich allerdings nicht beliebig erhöhen, da insbesondere derzeitige Materialien bei höheren Spannungen instabil werden und auch hochvoltstabile Elektrolyte nicht vorliegen [Möller (2011)]. Forschungsbestrebungen gibt es außerdem hinsichtlich der Verbesserung der Sicherheit, Zyklenfestigkeit und Lebensdauer.

LITHIUM-POLYMER- UND FESTSTOFFBATTERIEN

Bei Lithium-Polymerzellen besteht der Separator/Elektrolyt aus einem festen oder gelförmigen Polymer. Vorteile der Polymerzellen liegen insbesondere bei einer höheren Sicherheit [Fraunhofer ISI (2012)]. Problematisch dagegen sind die eingeschränkten Betriebstemperaturen (reichen bis 80 °C) bei festen Polymeren, welche ein Thermomanagement erfordern [Korthauer (2013)]. Polymer-elektrolyte eignen sich besonders bei metallischen Lithiumanoden (Lithium-Metall-Polymerzellen, LMP), da damit das dendritische Wachstum des Lithiums beim Wiederaufladen verhindert und die

Sicherheit der Batterie gewährleistet wird.

Bei Lithium-Feststoffbatterien wird der flüssige oder gelartige Elektrolyt durch einen alternativen Feststoff ersetzt (Nicht-Polymer, z.B. keramisch). Vorteile liegen in der höheren Temperaturstabilität und der Sicherheit [VDMA (2014)]. Problematisch ist bei festen Separatoren dagegen die Leitfähigkeit bei Raumtemperatur. Polymer- und Feststoff-Technologien könnten mittel- bis langfristig eine Option für Elektrofahrzeuge darstellen.

ALLGEMEINE ENTWICKLUNGSTENDENZEN

Die technologischen Entwicklungen konzentrieren sich aktuell auf folgende Punkte [Tübke (2008); Sauer (2009); Winter (2011)]:

- Erhöhung der Energiedichte der Anode durch Steigerung des Lithium-Anteils: beispielsweise durch neue Anodenmaterialien wie Silizium-Anodenmaterial ($Li_{21}Si_5$) oder Zinn
- Erhöhung von Lebensdauer und Zyklenbeständigkeit: beispielsweise durch neue Zellchemien ($LiNi_xCo_yMn_zO_2$, $LiNi_xCo_yAl_zO_2$) und Verbesserung bestehender Materialien
- Reduktion des Gefährdungspotenzials und Auswirkungen durch interne und externe Kurzschlüsse, Überladung, Tiefentladung und Wärmezufuhr
- Steigerung der Sicherheit durch neue Materialien: Anodenmaterialien (TiO_2 , Metalllegierungen), Kathodenmaterialien ($LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$), Separatoren (keramisch), Elektrolyte (polymere Elektrolyte, ionische Flüssigkeiten, keramische Elektrolyte)
- Verringerung der Kosten, beispielsweise durch neue Elektroden: Anodenmaterialien (TiO_2), Kathodenmaterialien ($LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$)
- Optimierung der Leistungsfähigkeit auch bei niedrigeren Temperaturen
- Hochenergiezellen der nächsten Generation (Lithium-Luft, Lithium-Schwefel)
- Alternative Materialstrukturen: Beispielsweise durch Nanopartikelelektroden und nanostrukturierte Elektroden (für Anode und Kathode)
- Ersatz organischer Lösungsmittel und Separatoren durch Anorganik und Keramik
- Entwicklung lithiumunabhängiger Batterien (z.B. Zink-Luft) und alternativer Konzepte (z.B. Redox Flow)

⁷ Vgl. Anderman (2013); VDMA (2014).

Kapitel 2

2.2.4 SUPERCAPS

Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (auch Ultracaps oder Supercaps genannt) besitzen eine große Oberfläche und eine geringe Dicke des Dielektrikums. Supercaps zeichnen sich im Vergleich zu Batterien insbesondere durch eine wesentlich verbesserte Leistungsaufnahme und -abgabe (gravimetrische Leistungsdichte bis 20.000 W/kg) und hohe Wirkungsgrade (Zykleneffizienz 98 % bei 80 % DoD) aus. Ebenso verfügen sie über eine hohe Zyklenfestigkeit (bis zu 1 Million Zyklen) und Lebensdauern im Bereich von 10 Jahren. Demgegenüber stehen hohe Kosten und eine geringe Energiedichte (gravimetrische Energiedichte von etwa 5 Wh/kg) [Frost & Sullivan (2009); Tübke (2011); Hofmann (2014)]. Supercaps können eine interessante Erweiterung zu bestehenden Li-Ion-Energiespeichern darstellen und eine Unterstützung im „Stop-and-go“ bieten, aber auch allgemein bei kurzzeitigen starken Ladevorgängen (Rekuperation) und Entladevorgängen (Boost-Funktion) die Batterie entlasten. Häufig werden sie deshalb beispielsweise in Stadtbussen eingesetzt. Aufgrund der hohen Leistungsdichten kommt ein Einsatz vor allem bei Micro- und Mild-Hybriden in Kombination mit Batterien infrage. Diese Art der Anwendung wird ebenfalls in Baden-Württemberg entwickelt. Ein Einsatz als Primärspeicher bei rein elektrischen Fahrzeugen ist wegen der geringen Energiedichte dagegen nicht zu erwarten. Forschungsschwerpunkte sind heute die Steigerung der Energiedichte durch verbesserte und nanostrukturierte Oberflächen sowie die Senkung des Innenwiderstands, um noch höhere Leistungen zu ermöglichen [Hofmann (2014)].

2.2.5 REDOX-FLOW-BATTERIEN

Das Verfahren der Redox-Flow-Batterien beruht auf dem Prinzip der Speicherung von chemischer Energie in Form von gelösten Redox-Paaren in externen Tanks. Die Stromerzeugung erfolgt in einem getrennten Leistungsmodul. Den Elektroden wird während der Entladung kontinuierlich der umzusetzende gelöste Stoff aus den Vorrattanks zugeführt und das entstehende Produkt abgeführt. Zum Laden wird die Pumprichtung des Elektrolyten umgekehrt. Man unterscheidet Redox-Flow-Batterien mit zwei flüssigen elektroaktiven Komponenten sowie Hybrid-Flow-Batterien mit einer flüssigen und einer festen elektroaktiven Komponente. Elektrolyte werden heute meist als metallische Salze in wässri-

ger Lösung, am häufigsten auf Basis von Vanadium, entwickelt. Allerdings wird auch an organischen Materialien geforscht, um Kosten zu minimieren und die Materialverfügbarkeit zu erhöhen [Harvard (2014)]. Weitere Elektrolytmaterialien sind Vanadium-Bromid, Polysulfid-Bromid, Uran, Eisen-Chrom oder Neptunium. Bei der Hybrid-Flow-Batterie ist hingegen Zink-Brom oder Cer-Zink im Einsatz [Tübke (2011)]. Die Energiedichten der Anlagen werden zumeist in der Größenordnung von Blei-Akkus angegeben und mit bis zu 70 Wh/l beziffert. Die Wirkungsgrade erreichen bis zu 85 % und liegen auf Systemebene, also inklusive des Energieverbrauchs durch die Pumpen immer noch bei über 75 %. Heutige Anlagen haben Lebensdauern von mehr als 20 Jahren und Zyklenzahlen von über 10.000. Redox-Flow-Batterien zeichnen sich weiterhin durch schnelle Ansprechzeiten (μs – ms), gute Überlade- und Tiefentladetoleranzen, weite Temperaturbereiche (-25 bis 40 °C) sowie praktisch nicht vorhandene Selbstentladung aus [ISEA (2014)]. Der große Vorteil von Redox-Flow-Batterien ist die Skalierbarkeit: Durch Vergrößerung der Tanks können Anlagen mit nahezu beliebigem Energieinhalt (bis zu mehreren MWh) aufgebaut, durch Erweiterung der Leistungsmodul Leistungen bis in den MW-Bereich bereitgestellt werden. Aufgrund der genannten Eigenschaften werden Redox-Flow-Technologien vor allem für stationäre Anwendungen gesehen, beispielsweise als Energiespeicher für Windparks. Diese meist in Containern aufgebauten Anlagen sind heute von mehreren Herstellern in unterschiedlichen Energie- und Leistungsklassen kommerziell erhältlich. Für die mobile Anwendung in Elektrofahrzeugen sind deutlich höhere Energiedichten erforderlich. Im Gegensatz zu herkömmlichen Batterien kann die Ladung extern an einer Tankstelle erfolgen. Das Fahrzeug kann dann mit den geladenen Elektrolytflüssigkeiten in wenigen Minuten betankt werden. Ein Prototypenfahrzeug (Quant e-Sportlimousine) mit Redox-Flow-Speicher wurde jüngst von der Firma nanoFlowcell AG vorgestellt [Nanoflowcell (2014)]. Der Hersteller gibt die Energiedichte mit 600 Wh/kg bei einer möglichen Nennleistung von 30 kW an.

Entwicklungsziele sind insbesondere neue Elektrolytsysteme für höhere Energiedichten, aber auch die Optimierung der Leistungsmodul für mehr Leistung sowie Reduzierung der Anlagen- und Wartungskosten durch beispielsweise neue Membrane.

2.2.6 BATTERIESYSTEM

Sekundärzellen müssen zum Einbau in Kraftfahrzeuge zu Batteriesystemen zusammengefasst werden, um höhere Spannungen, Leistungen und Kapazitäten zu erreichen. Dabei sind die einzelnen Zellen parallel und in Reihe geschaltet. Hierdurch ergeben sich für PKW derzeit Kennwerte von 100 V und 20 kW (bei Hybridfahrzeugen) [Wind (2012)] über 400 V und 150 kW (bei batterieelektrischen Fahrzeugen) [Schoewel (2014)] bis hin zu 430 V und 230 kW (bei Hybrid-Sportfahrzeugen) [Markus (2013)]. Zukünftig ergeben sich auch höhere Werte. Die Kapazitäten von heute verwendeten Batteriesystemen liegen ca. zwischen 1 kWh und über 80 kWh. Innerhalb der Batteriesysteme werden die Zellen üblicherweise zu Modulen gebündelt, was ihre Handhabung bei der Montage und einer möglichen Wartung vereinfacht. Neben den Zellen und Modulen umfasst ein komplettes Batteriesystem auch Komponenten zum mechanischen, elektrischen und elektronischen Zusammenschluss sowie für das thermische Management und die Kommunikation (vgl. Abbildung 8).

Aus unterschiedlichen Zelltypen leiten sich unterschiedliche Anforderungen an das Gesamtsystem ab, beispielsweise hinsichtlich Kühlung und Package. Dies hat direkten Einfluss auf die Komplexität und die Gesamtkosten des Systems. Es ist daher notwendig, die Batterie als Gesamtsystem zu verstehen und entsprechend nicht nur einzelne Komponenten zu verbessern, um eine Systemverbesserung zu erreichen, sondern eine systemische Optimierung zu betreiben. Diese holistische Betrachtung bei der Konzeption und Optimierung des Systems ist notwendig, da dies direkten Einfluss auf die Charakteristik des Gesamtsystems hat.

BATTERIEMANAGEMENT

Das Batteriemangement erhält bzw. erhöht die Lebensdauer und die Zyklenzahl der einzelnen Zellen des Batteriesystems. Dazu erfasst es die Zellspannungen, die Temperatur der Batterie sowie den Batteriestrom und vergleicht die Werte mit festgelegten Vorgaben. Bei einer Abweichung werden Korrekturmaßnahmen eingeleitet. Beispiele hierfür sind, dass das Batteriemangement einen Ladungsausgleich zwischen Zellen initiiert (Cell-Balancing) oder die Batteriekühlung ansteuert. In kritischen Fällen kann es auch eine Sicherheitsabschaltung einleiten. Wichtige Bestandteile des Batteriemagements sind die Überwachungs- und die



Abbildung 8: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung.⁸

Kontrolleinheit, Spannungs-, Temperatur- und Stromsensoren, Sicherheitselemente (Sicherungen, Schütze) und Datenübertragungskanäle (CAN-Bus). Die Kommunikation innerhalb des Batteriemagements erfolgt über eine Sternverdrahtung oder eine Ringverdrahtung. Das Elektrolytsystem von Lithium-Ionen-Zellen ist nicht überladefähig und damit empfindlich gegen Über- und Tiefentladung. Des Weiteren führen Produktionsunterschiede zu unterschiedlichen Zelleigenschaften. Somit können einzelne Zellen während eines Ladevorgangs die maximale Spannung früher als andere erreichen. Da die schwächste Zelle das Verhalten des gesamten Batteriesystems bestimmt, ist der Ladungsausgleich von besonderer Bedeutung. Hierfür kommen heute üblicherweise passive Verfahren zum Einsatz, bei denen überschüssige Energie an Widerständen in Wärme umgewandelt wird. Wirksamer sind allerdings aktive Methoden, bei denen Ladungen mit DC/DC-Wandlern zwischen den Zellen transferiert werden [Korthauer (2013)]. Zukünftig werden auch Gesamtsysteme aus Batteriezellen und Supercaps erwartet, die von einem zentralen Controller gesteuert werden.

⁸ Eigene Darstellung; Bildmaterial: Saft (2009); Quick (2009); Lavrinc (2011); ADAC (2012); Kane (2013).

Kapitel 2

BATTERIE-THERMOMANAGEMENT

Die Zellen eines Batteriesystems lassen sich nicht bei jeder Temperatur gleich gut und gleich lange nutzen. Die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen ist zwischen 20 °C und 40 °C am besten. Je tiefer die Temperatur unter 20 °C liegt, desto höher werden die Innenwiderstände dieser Zellen und desto geringer ist die dem Antrieb zur Verfügung gestellte Leistung. Unter 0 °C altern Lithium-Ionen-Zellen außerdem besonders schnell oder nehmen sogar irreversiblen Schaden bis hin zum Kurzschluss. Gleiches gilt für Temperaturen oberhalb von 40 °C. Bei besonders hohen Temperaturen kann sich der Elektrolyt thermisch zersetzen und die Zelle infolgedessen in Brand geraten (vgl. Abbildung 9) [Korthauer (2013)].

Aufgabe des Batterie-Thermomanagements ist es, die Temperatur aller Zellen des Batteriesystems innerhalb des Bereichs der bestmöglichen Leistungsfähigkeit und Lebensdauer zu halten. Bei einem geringen Bedarf an Kühl- und Heizleistung kann hierfür Luft zum Einsatz kommen, die durch Kanäle (bei Bedarf mit elektrischen Luftheizelementen) zwischen den Zellen geleitet wird. Eine hohe Kühl- und Heizleistung lässt sich durch Verwendung flüssiger Medien erreichen (bei Bedarf ergänzt um zusätzliche Wärmeleit-elemente). Diese werden ebenfalls in Leitungen zwischen den Zellen hindurchgeführt. Eine Beheizung ohne jegliche Medien ist außerdem mittels elektrischer Heizelemente zwischen den Zellen im Batteriesystem möglich. Je nach Kühl-/Heizbedarf, verwendetem Fluid und der vorgesehenen Kälte-/Wärmequelle gehören zum Batterie-Thermomanagement noch Gebläse, Pumpen oder gar ein kompletter Kühlmittelkreislauf zusätzlich zu dem für die Innenraumklimatisierung [Korthauer (2013)].

-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
Wesentlich geringere Leistungsfähigkeit, besonders schnelle Alterung (bis hin zum Kurzschluss)	Geringere Leistungsfähigkeit	Bestmögliche Leistungsfähigkeit und Lebensdauer	Schnellere Alterung	Besonders schnelle Alterung (bis hin zum Brand)

Abbildung 9: Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batteriezellen bei unterschiedlichen Temperaturen.⁹

⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Korthauer (2013).

2.3 KOMPONENTEN DES ANTRIEBSSTRANGS

2.3.1 Elektrische Maschine

Die elektrische Maschine kann den Verbrennungsmotor als Antriebsquelle erweitern und verbessern (Verbesserung des Wirkungsgrads von Verbrennungskraftmaschinen im Teillastbereich bei Hybriden) oder auch komplett ersetzen (beispielsweise in den Konzepten REEV, BEV, FCEV). Die Verwendung des Begriffs „elektrische Maschine“ ist angebracht, da die meisten Elektroantriebe sowohl als Motor wie auch als Generator zur Energierückgewinnung betrieben werden können.

CHARAKTERISTIKA

Aufgrund seiner Drehmomentcharakteristik eignet sich der Elektromotor hervorragend für einen Einsatz als Antriebsmotor in Fahrzeugen: Das maximale Drehmoment steht bereits ab Drehzahl 0 zur Verfügung, es bleibt bis zu einer gewissen Drehzahl konstant (Ankerstellbereich) und sinkt dann erst ab (Feldschwächebereich). Dies zeigt Abbildung 10. Deshalb kann auf eine Kupplung verzichtet werden und man benötigt nur ein Übersetzungsgetriebe. Weitere Vorteile sind der hohe Wirkungsgrad (bis zu 95 %), problemloser Teillastbereich, Rekuperationsmöglichkeit, Robustheit, hohe Lebensdauer, geringe Wartungskosten, gute Skalierbarkeit und relativ geringe Geräuschentwicklung. Darüber hinaus kann der Motor eine gewisse Zeit auch über der eigentlichen Nennleistung (Überlastbereich) betrieben werden, ohne Schaden zu nehmen [Schröder (2013); Parspour (2014)].

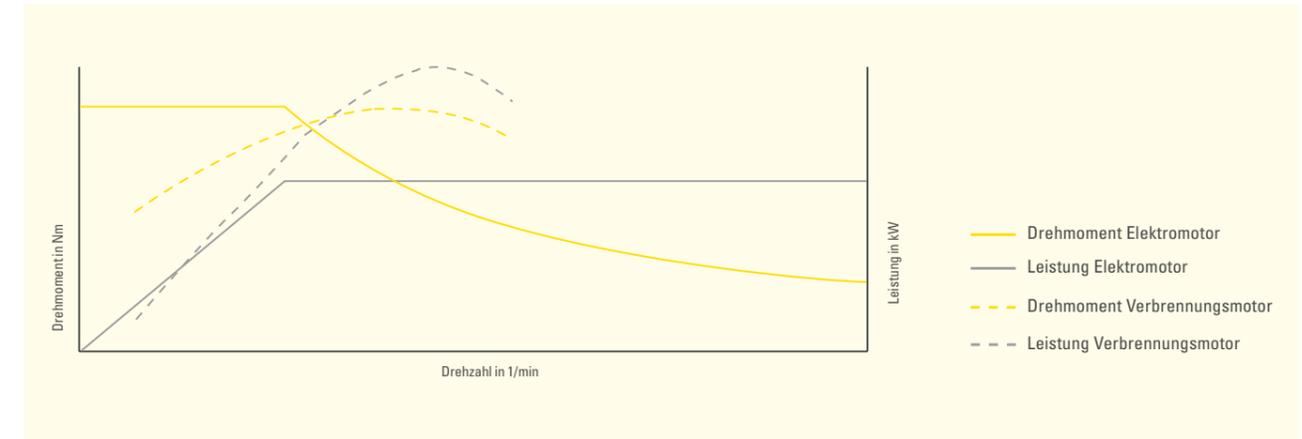


Abbildung 10: Drehmoment- und Leistungskennlinien im Vergleich.¹⁰

DREHSTROMMOTOREN

Drehstrommaschinen sind Wechselstrommaschinen mit einem 3-phasigen Wechselstrom. Die Drehfeldwicklungen befinden sich im Stator (auch Ständer genannt) des Motors. Die drei Wechselspannungen des Drehstroms sind dabei jeweils um 120 Grad versetzt und speisen die Wicklungen mit den nachfolgenden Strömen. Im Fahrzeug muss hierfür der Gleichstrom aus der Batterie in einen 3-phasigen Wechselstrom gewandelt und dann der Elektromotor situationsgerecht angesteuert werden. Hierzu sind sogenannte Inverter (oder Wechselrichter) notwendig. Dadurch entsteht im Motor ein magnetisches Drehfeld, welchem der Rotor (auch Läufer oder Polrad genannt) folgt.

MOTORBAUARTEN

Grundsätzlich lassen sich Drehstrommotoren gemäß der Beziehung zwischen Rotationsgeschwindigkeit von Läufer und Drehfeld in Synchron- und Asynchronmotoren unterteilen. Bei Letzteren dreht sich der Läufer langsamer als das durch die Wicklungen im Stator erzeugte magnetische Feld und damit asynchron. Vorteile dieser Bauart sind die relativ hohe Leistungsdichte, der einfache Aufbau, die einfache Regelung sowie der Umstand, dass sie keine Permanentmagnete benötigen. Synchronmotoren weisen einen besonders hohen Wirkungsgrad und eine besonders hohe spezifische Leistung auf. Hier dreht sich der Rotor mit der gleichen

Geschwindigkeit wie das elektrische Drehfeld im Stator (synchron). Ein wesentlicher Nachteil dieser Bauart sind die hohen damit verbundenen Kosten. Die Ausführung des Rotors kann mit teuren Permanentmagneten (vergrabene oder Oberflächen-Magnete) erfolgen. Alternativ lässt sich eine günstigere, aber immer noch kostenintensive Strom- bzw. Fremderregung in Spulen (Aufbau eines Magnetfelds durch stromdurchflossene Spulen) zulasten des Wirkungsgrads einsetzen. Eine Sonderbauform der Synchronmaschine stellt die geschaltete Reluktanzmaschine dar. Je nach Motorbauart ergeben sich spezifische Rotor- und Statorkonstruktionen. Diese sind in Abbildung 11 dargestellt.

¹⁰ Eigene Darstellung.

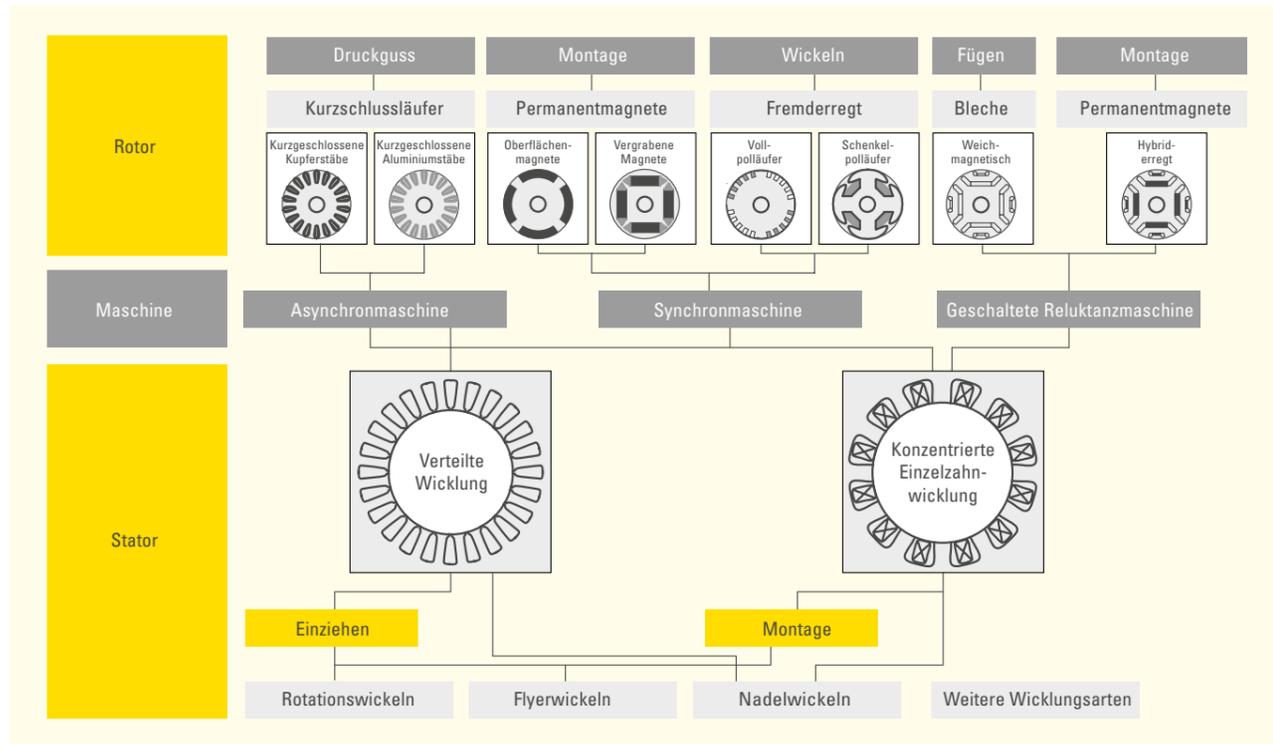


Abbildung 11: Bauarten elektrischer Maschinen.¹¹

AUSFÜHRUNGSFORMEN

Nachfolgend werden die verschiedenen Ausführungsformen von Drehstrommotoren skizziert [vgl. u.a. Mathoy (2010); Wallentowitz (2011); Hofmann (2014)].

Asynchronmaschine (ASM): Ein Merkmal der Asynchronmaschine, auch Induktionsmaschine genannt, ist die Kurzschlusswicklung im Rotor. Der aus Blechen aufgebaute Rotor besitzt meist eine Stabwicklung, in der die Stäbe durch zwei Kurzschlussringe verbunden sind. Hierdurch kommt es zu teils sehr hohen Strömen im Rotor. Der bei dieser Motorbauart vorliegende Unterschied zwischen der Umfangsgeschwindigkeit von Rotor und Drehfeld wird durch den sogenannten Schlupf beschrieben. Je höher das Lastmoment ist, das die ASM aufbringen soll, desto größer wird der Schlupf und desto geringer wird die Drehzahl des Läufers ge-

genüber der des Drehfelds. Die Maschine besitzt einen großen Drehzahlbereich konstanter Leistungsabgabe bei gleichbleibender Umrichterbelastung und hohem Gesamtwirkungsgrad. Dabei kommt die ASM ohne Schleifkontakte zum Rotor aus (im Gegensatz zur Gleichstrommaschine oder der strom- bzw. fremderregten Synchronmaschine). Die Asynchronmaschine hat einen sehr einfachen und preiswerten Aufbau bei geringem Volumen und Gewicht. Ebenfalls wird nur eine relativ kostengünstige Steuerung benötigt. Die ASM ist eine sogenannte High-Speed-Maschine (im Gegensatz zur High-Power-Maschine) und erfordert damit ein Getriebe. Bei höheren Drehzahlen zeigt sie einen quadratisch abnehmenden Drehmomentverlauf. Auch führen die Rotorverluste bei tiefen Drehzahlen und hohen Drehmomenten zu hohen Rotortemperaturen. Insbesondere hochpolige Motoren erfordern des Weiteren sehr präzise und kleine Luftspalte, um die magnetischen Widerstände möglichst gering zu halten. Der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine liegt unterhalb des Wirkungsgrads der

Synchronmaschine. Sie gilt als sicher, ökonomisch und eignet sich für urbane Anwendungen. Einsatz findet sie beispielsweise in den Elektrofahrzeugen von Tesla.

Permanenterregte Synchronmaschine (PSM): Der Statoraufbau einer permanenterregten Synchronmaschine ähnelt dem einer Asynchronmaschine. Neben verteilten Wicklungen können hier auch konzentrierte Wicklungen Anwendung finden. Der Rotor ist mit Permanentmagneten versehen. Diese können an der Oberfläche fixiert sein (Oberflächenmagnete) oder sich in Taschen innerhalb des Rotors befinden (vergrabene Magnete). Die PSM weist einen einfachen mechanischen und elektrischen Aufbau auf (keine Bürsten, keine Schleifkontakte). Auch sind hochpolige Motorentypen leicht herstellbar. Die Maschine besitzt einen sehr guten Wirkungsgrad im unteren Drehzahlniveau und Teillastbereich. Sie zählt damit zu den High-Power-Maschinen und ist für den Direktantrieb ohne Getriebe geeignet. Die PSM erreicht eine sehr hohe Drehmoment- und Leistungsdichte. Insbesondere bei der Verwendung von Seltenen Erden (Nd-Fe-B-Magneten) ist eine sehr kompakte Bauart möglich – sogar noch kompakter als bei strom- bzw. fremderregten Synchronmaschinen. Der notwendige Einsatz von Seltenen Erdmetallen führt allerdings zu hohen Materialkosten und zu Abhängigkeiten von Importen. Jeder permanenterregte Motor weist außerdem ein durch seinen Magnetgehalt definiertes Grenzmoment auf. Bei hohen Drehzahlen kommt es des Weiteren zu großen Verlusten und nur moderaten Leistungen. Der Bereich hoher Drehzahlen (Feldschwächebereich) erfordert sehr hohe Blindstromkomponenten vom Umrichter. Im Fehlerfall entwickelt die PSM insbesondere bei einer geringen Fahrgeschwindigkeit ein hohes Bremsmoment. Ebenfalls sind sehr hohe Kurzschlussströme und Leerlaufspannungen bei Umrichterdefekten möglich. Auch in der Serienfertigung ist von einem aufwendigen Fertigungsprozess auszugehen. Die permanenterregte Synchronmaschine ist aktuell die am weitesten verbreitete Maschine bei Hybriden, aber auch als Traktionsmotor findet sie vermehrt Einsatz.

Stromerregte Synchronmaschine (SSM; Fremderregte Synchronmaschine): Die Strom- bzw. Fremderregung kommt insbesondere bei größeren Synchronmotoren zum Einsatz. Während der Stator dieser Ausführungsform den gleichen Aufbau wie eine PSM hat, wird der Rotor mit Erregerwicklungen versehen (anstelle der kostenintensiven Magnete bei der PSM). Hierdurch entstehen entwe-

der Schenkelpolläufer, wenn Polschenkel die Wicklungen tragen, oder Vollpolläufer, wenn die Wicklungen in Nuten im Rotor eingezogen sind. Die Magnetisierung des Rotors erfolgt mittels Stromzufuhr von außen. Dabei werden die Erregerwicklungen über ein Schleifringssystem gespeist. Im Unterschied zu Gleichstrommotoren muss allerdings nur wenig Strom in den Rotor übertragen werden. Bei größeren Maschinen (Durchmesser über 400 mm) lässt sich auch eine berührungslose Stromversorgung realisieren. Die SSM erreicht für etwa 30 Sekunden das 2,5-Fache und für 5 Sekunden das bis zu 4-Fache des Nennwerts. Des Weiteren weist sie keinen Leistungsabfall bei höheren Drehzahlen auf. Ihr Wirkungsgrad und ihre Leistungsdichte sind sehr hoch, die erreichbaren Werte liegen allerdings unter denen der PSM. Außerdem benötigt die SSM eine zusätzliche Stromversorgung zur Bereitstellung des Erregerstroms im Rotor.

Geschaltete Reluktanzmaschine (GRM; Switched Reluctance Machine, SRM): Die Funktionsweise der Reluktanzmaschine basiert auf dem Prinzip, dass sich ein magnetisierbarer (aber selbst nicht magnetischer) Körper nach der Richtung eines von außen angelegten Magnetfelds ausrichtet. Bei dieser Ausführungsform besitzen Rotor und Stator ein zahnförmiges Profil. Die Zähne des Stators sind mit spulenförmigen Erregerwicklungen versehen. Einander gegenüberliegende Wicklungen bilden ein Spulenpaar. Der Rotor besteht aus einem weichmagnetischen Material und trägt keine Wicklungen oder Magnete. Durch Ein- und Ausschalten der Spulenpaare im Stator in einer festgelegten Reihenfolge wird das Magnetfeld erzeugt, dem der Rotor folgt. Die geschaltete Reluktanzmaschine ist kostengünstig aufgebaut und sehr robust trotz der präzise einzuhaltenden kleinen Luftspalte und der komplexen Regelung. Weitere Vorteile sind die hohe spezifische Leistung und die Ungefährlichkeit im Fehlerfall. Ein Nachteil besteht im lauten Betriebsgeräusch. Dieses entsteht infolge von Pulsströmen, die für größere Drehmomente notwendig sind, aber nicht nur momentbildende, sondern auch pulsierende radiale Kräfte hervorrufen. Außerdem schwankt das Drehmoment der GRM bei geringen Drehzahlen. In einer Variation der geschalteten Reluktanzmaschine werden Reluktanzprinzip und permanente Erregung miteinander kombiniert. Dabei ist der weichmagnetische Rotor mit Permanentmagneten bestückt. Diese hybriderregte Maschine (Hybridsynchronmaschine, HSM; permanenterregte Synchronreluktanzmaschine) enthält deutlich weniger Magnetmaterialien als die

¹¹ Eigene Darstellung nach Franke (2011).

Kapitel 2

PSM. Trotzdem erreicht sie über einen großen Drehzahlbereich eine konstante Leistung mit hohem Wirkungsgrad auch bei niedrigen Drehzahlen. Obwohl die Kurzzeit-Überlastbarkeit der HSM nicht an die der PSM heranreicht, findet sie derzeit Anwendung in den batterieelektrischen Fahrzeugen von BMW.

ANFORDERUNGEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Bei der Auswahl eines optimalen Antriebskonzepts für Elektro- und Hybridfahrzeuge liegt das Augenmerk auf der Systemabstimmung von Motor, Leistungselektronik und Getriebe, um so ein Optimum bei Kosten, Gewicht, Leistungsdichte und Wirkungsgrad sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit zu erzielen.

Anzumerken bleibt, dass Industriebereiche, in denen elektrifizierte Antriebe schon lange etabliert sind, und Automobilbau sehr unterschiedliche Anforderungen an die Produktion elektrischer Maschinen stellen. Beispiele sind die im Automobilbau verlangte

höhere Lieferqualität (100 statt 1.000 parts-per-million, d.h. Anzahl fehlerhafte Teile bei 1 Million produzierten Einheiten) und Liefertreue (100 % statt 90 %) sowie die stärkere Automatisierung (Lohnanteil etwa 5 % statt 25 %). Demgegenüber steht eine geringere erwartete Lebensdauer (etwa 4.000 statt 40.000 Stunden) [Franke (2011)]. Durch die unterschiedlichen Motorkonzepte und neuen Anforderungen ergeben sich auch neue Herausforderungen an die Unternehmen und notwendigen Fertigungsverfahren, welche es nun für die automobilen Serienfertigung zu lösen gilt.

Aktuell sind bereits einige Automobilhersteller aktiv, elektrische Maschinen in Eigenregie (Beispiel BMW) oder in Zusammenarbeit mit einem Zulieferer (Beispiel Daimler mit Bosch) zu entwickeln und zu fertigen. Diese unterschiedlichen Herangehensweisen zeigen, dass die Herstellung elektrischer Maschinen durchaus auch zur Kernkompetenz der Automobilhersteller werden könnte. Sie könnten dabei beispielsweise Maschinenkomponenten wie Rotor

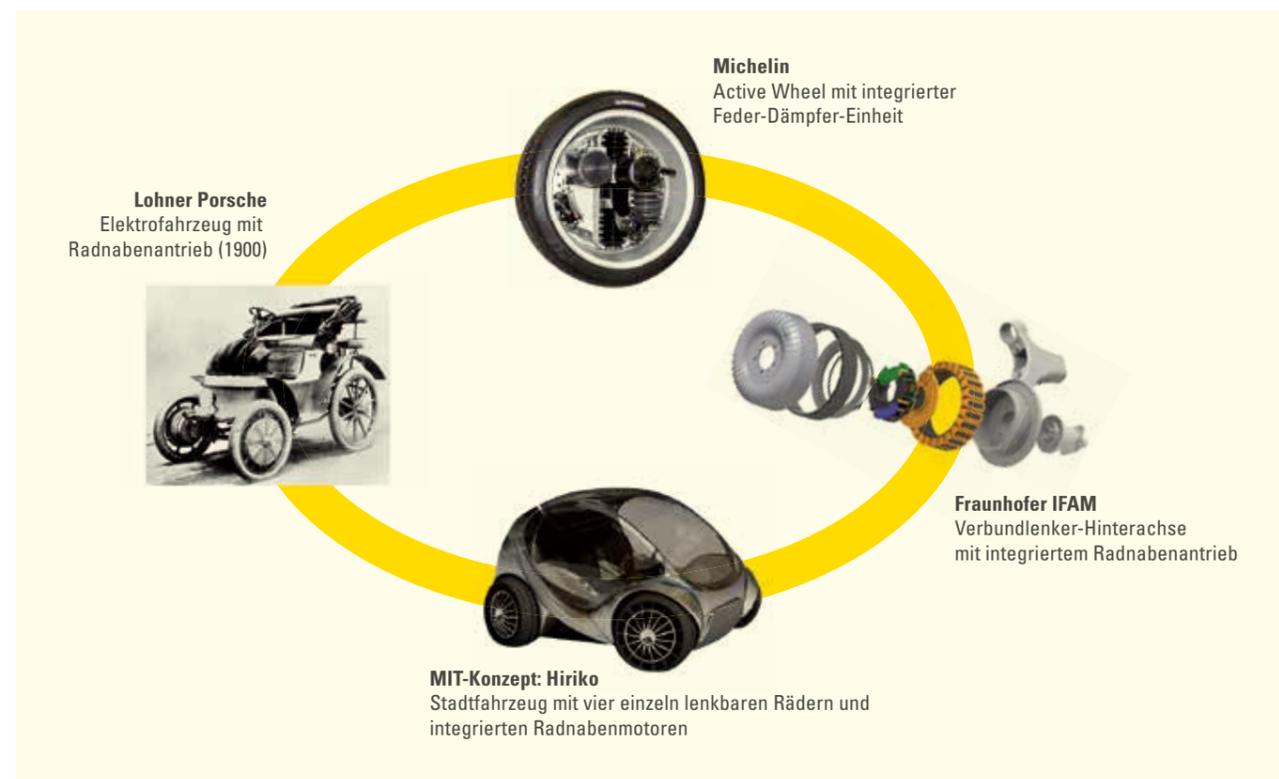


Abbildung 12: Radnabenantriebe: Historischer Rückblick und aktuelle Konzepte.¹²

¹² Eigene Darstellung.

und Stator in Eigenregie fertigen, die Leistungselektronik zukaufen und den Zusammenbau und die Integration in das Fahrzeug übernehmen [Schäfer (2010)].

NEUE KONZEPTE

Die geringe Baugröße und flexibel gestaltbare Anbindung elektrischer Maschinen erlaubt eine Vielzahl neuer Konzepte für die Positionierung des Antriebs im Fahrzeug und damit neue Fahrzeugarchitekturen. So ist beispielsweise eine zentrale Anordnung, vergleichbar mit heutigen Verbrennungsmotoren, genauso möglich wie eine Aufteilung der Antriebsleistung auf zwei kleinere Motoren an Vorder- und Hinterachse. Zur Minderung von Baugröße, Gewicht und Kosten wird außerdem an schnell drehenden Elektromotoren in Kombination mit ein- oder mehrstufigen Getrieben gearbeitet (vgl. Kapitel 2.3.3). Ebenfalls denkbar ist die Verwendung von vier Radnabenmotoren in den Rädern eines Automobils (Beispiele: ZAWheel von ZIEHL-ABEGG, Active Wheel von Michelin, Fraunhofer oder MIT, siehe Abbildung 12).

Radnabenmotoren bieten dabei zahlreiche Vorteile wie eine radselektive Aktivierung von Zusatzfunktionen (ermöglicht z.B. Torque Vectoring oder ESP ohne komplexe Zusatzsysteme), eine gute Gewichtsverteilung, größere Freiheiten beim Package und eine aufgeteilte Bremsenergieerückgewinnung an allen vier Rädern. Für eine größere Verbreitung dieser Antriebsform sind allerdings noch einige Herausforderungen zu lösen, z.B. hinsichtlich der ungefederten Masse insbesondere im höheren Geschwindigkeitsbereich.

Es wird auch erwartet, dass Radnabenmotoren generell teurer sind und einen höheren Aufwand für die Gewährleistung der Sicherheit und Lebensdauer erfordern als im Chassis platzierte elektrische Maschinen. Soweit es heute absehbar ist, bieten Radnabenantriebe im Wesentlichen bei Zweirädern und Nutzfahrzeugen mit geringen Geschwindigkeiten (wie beispielsweise Baumaschinen, Flurförderfahrzeuge, Stadtbusse) ein gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Beide Antriebskonzepte profitieren auch am meisten von den Packagevorteilen, die sich durch eine Verlagerung der elektrischen Maschine in das Rad einstellen [Schäfer (2010)].

2.3.2 LEISTUNGSELEKTRONIK

Die Leistungselektronik steuert den Energiefluss im Antriebsstrang elektromobiler Antriebskonzepte. Zu ihren Aufgaben gehören das Invertieren von Spannungen (Umrichten einer Wechselspannung in eine Gleichspannung und umgekehrt), das Konvertieren von Spannungen (Umwandeln einer hohen in eine niedrigere Spannung und umgekehrt) oder Kombinationen aus beidem. Neben der Versorgung der elektrischen Maschine aus dem Energiespeicher müssen auch umgekehrte Energieflüsse aus Rekuperations- oder Ladevorgängen sowie Anpassungen von Spannungsniveaus innerhalb des Bordnetzes über die Leistungselektronik dargestellt werden (vgl. Abbildung 13). Die Leistungselektronik umfasst damit bedeutende Komponenten mit großem Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Effizienz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

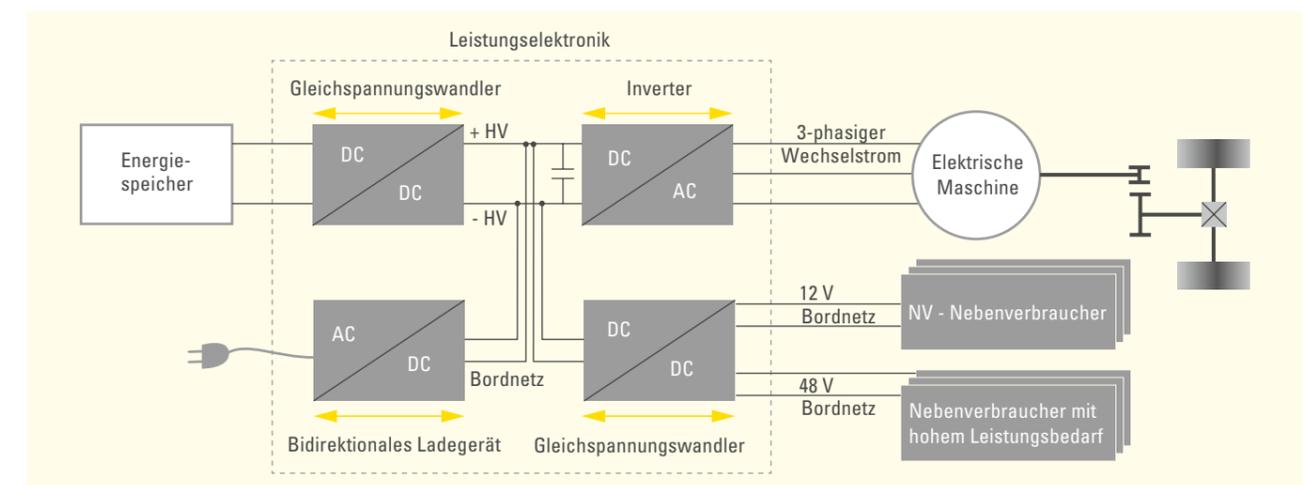


Abbildung 13: Schematische Topologie einer Leistungselektronik mit HV-Batterie und NV-Bordnetz.¹³

¹³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Hofmann (2014).

Kapitel 2

Während elektrische Maschinen kurze Zeit im Überlastbereich betrieben werden können ohne zu überhitzen, muss die Auslegung der Leistungselektronik auf maximale Ströme hin erfolgen. Dies führt zu erhöhten Kosten und größerem Aufwand. Bei der Konzeption der Leistungselektronik müssen die Kosten, Verfügbarkeit, Performance, Gewicht und Package des Systems so gut wie möglich gemeinsam optimiert werden, um zu einem für die jeweiligen Anforderungen optimalen Ergebnis zu kommen.

INVERTER

Im Hybrid- oder Elektrofahrzeug werden wie im vorherigen Kapitel beschrieben fast ausschließlich Drehstrommotoren eingesetzt. Deswegen muss die elektrische Energie aus dem Energiespeicher entsprechend angepasst werden. Die Steuerung der Energie zwischen Batterie und elektrischer Maschine erfordert eine elektronische Stelleinrichtung, den Inverter (auch Wechselrichter oder Pulswechselrichter genannt). Damit wird die Energie der Batterie (Gleichstrom bzw. -spannung) in die für den Betrieb des Elektromotors notwendige Form (mehrphasige Wechselspannung mit veränderlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage) umgewandelt, wodurch sich Motordrehzahl und -drehmoment einstellen lassen.

Der Inverter besteht aus Leistungsmodul, (Zwischenkreis-)Kondensator, einer Elektronik (Controller, Software) zur Steuerung des Leistungsmoduls, elektrischen Anschlüssen, Gehäuse und Kühlung. Das Leistungsmodul umfasst einerseits verschiedene Hochleistungs-Halbleiterelemente. Dabei handelt es sich um Dioden (meist Schottky-Dioden) und Transistoren (MOSFETs bei Spannungen bis ca. 200 V, IGBTs bei höheren Spannungen). Zum anderen zählen Emitter und Kollektoren, Bonddrähte und Keramikplatten (DCB-Layer; tragen die elektronischen Komponenten) zum Leistungsmodul. Die am häufigsten eingesetzte Schaltungs-Topologie zur Umrichtung einer Spannung in elektromobilen Antriebskonzepten ist die B6-Brückenschaltung, die sich aus je 6 Transistoren und Dioden zusammensetzt. Sie wird durch Emitter und Kollektor über einen Zwischenkreis mit dem Energiespeicher des Fahrzeugs verbunden. Im Zwischenkreis kommt ein Kondensator zum Einsatz, der die Eingangsspannung glättet und heute mehrheitlich als Folienkondensator ausgebildet ist. Aufgrund der hohen Spannung und notwendigen Kapazität kann der Zwischenkreiskondensator ein beträchtliches Bauvolumen erreichen. Er hat damit einen hohen

Einfluss auf die Leistungsdichte des gesamten Inverters. Ferner stellt er ein kritisches Bauteil dar, welches neben dem Leistungsmodul die Zuverlässigkeit des Wechselrichters entscheidend mitbestimmt. Zwischenkreiskondensator und Leistungsmodul verursachen auch einen Großteil der Kosten des Inverters [Kampker (2014)]. Abbildung 14 zeigt den Inverter und seine wesentlichen Bestandteile im schematischen Aufbau.

In Leistungsmodulen für elektromobile Antriebskonzepte werden derzeit mehrheitlich Halbleiterelemente aus Silizium verwendet. Hiermit lassen sich allerdings unter anderem aufgrund der relativ geringen Temperaturbeständigkeit des Materials nur Inverter mit begrenzter Leistungsdichte realisieren. Deswegen behandeln aktuelle Entwicklungsarbeiten den Einsatz und die Fertigung von Halbleitern aus höherwertigeren Materialien. Dazu zählen Galliumnitrid (GaN) und Siliziumkarbid (SiC). Diese erlauben neben höheren Anwendungstemperaturen auch kleinere Bauteilabmessungen und höhere Schaltfrequenzen. Insbesondere Halbleiterelemente aus Siliziumkarbid sind heute jedoch noch wesentlich teurer als Standardbauteile. Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Leistungsdichte besteht in der dreidimensionalen Anordnung der Leistungsmodule. Die dafür erforderlichen Produktionstechnologien zählen ebenfalls zu den Entwicklungsaktivitäten bezüglich der Inverter für elektromobile Antriebskonzepte [Hofmann (2014); Peters (2012)].

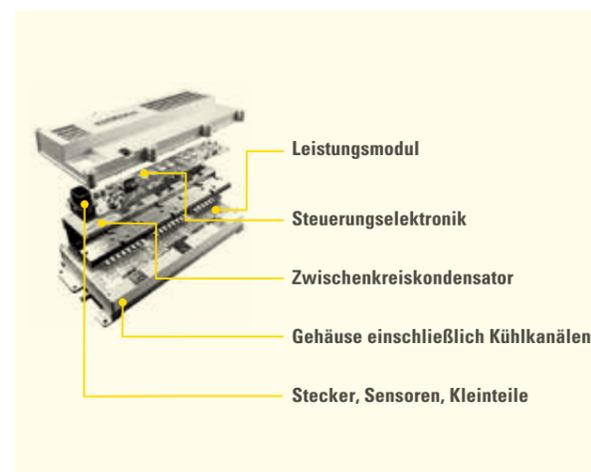


Abbildung 14: Wesentliche Bestandteile eines Inverters.¹⁴

¹⁴ Eigene Darstellung; Bildmaterial: SEMIKRON (2011).

Aktuell befindet sich der Inverter meist in einem separaten Gehäuse. Dies verursacht großen Aufwand bei der Verkabelung und den Verbindungen. Bedingt durch die hohen Ströme sowie Anforderungen an Isolierung und Abschirmung der Kabel ergeben sich hohe Kosten und ein hohes Gewicht. Auch die Steckverbindungen müssen hohen Anforderungen genügen. Es wird daher daran gearbeitet, den Wechselrichter direkt an der elektrischen Maschine anzubringen. Damit könnte auch die Zwischenkreiskapazität reduziert werden und sowohl auf ein separates Gehäuse verzichtet als auch ein gemeinsames Kühlsystem zwischen Wechselrichter und E-Motor ermöglicht werden. Um die Integration der Leistungselektronik in den E-Antrieb allerdings tatsächlich umsetzen zu können, müssen zuerst die Komponenten des Inverters zuverlässig den Forderungen nach Robustheit gegen Vibration und Hitzeeinwirkung entsprechen [Cebulski (2011)].

GLEICHSPANNUNGSWANDLER

Neben dem Inverter zählen auch Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) zur Leistungselektronik. Diese erzeugen aus einer (variablen) Eingangs-Gleichspannung mithilfe von Leistungselektronischen Elementen eine höhere oder niedrigere Ausgangs-Gleichspannung. Für die Schaltungs-Topologie kommen verschiedene Varianten infrage. Wichtigstes Kriterium bei deren Auswahl ist der Betrag und die Güte der verwendeten bzw. zu erzeugenden Spannungen und Ströme [Cebulski (2011)].

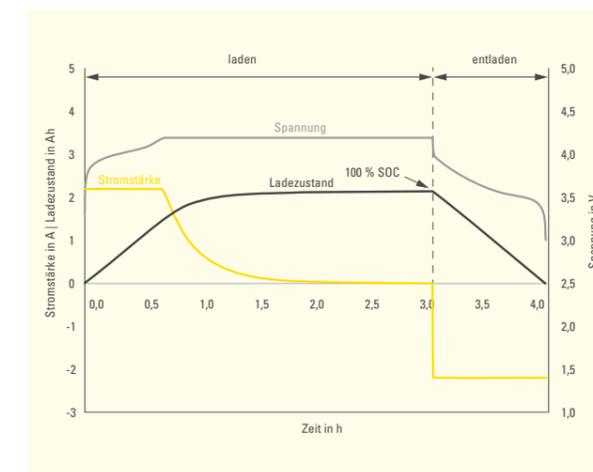


Abbildung 15: Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ionen-Zelle bei Schnellladung.¹⁵

¹⁵ Lutz (2008).

Gleichspannungswandler können etwa dazu eingesetzt werden, einem Inverter eine von der Batteriespannung unabhängige Eingangsspannung zur Verfügung zu stellen. Hierdurch erreicht man eine stets konstante Spannung im Zwischenkreis des Inverters. Dies wirkt sich positiv auf die Größe einer elektrischen Maschine aus, die für eine angestrebte Antriebsleistung erforderlich ist. Außerdem machen Gleichspannungswandler kleinere Antriebsbatterien bei einem gleichbleibenden Spannungsniveau im Antriebsstrang möglich. Sie werden des Weiteren zur Verbindung von Niedervolt-(NV-) und Hochvolt-(HV-)Bordnetz benötigt, wobei hierzu sogenannte galvanisch getrennte Gleichspannungswandler ohne direkte elektrische Leitung zum Einsatz kommen. [Hofmann (2014)].

LADEGERÄT

Um ein Elektrofahrzeug extern laden zu können, beispielsweise über das Stromnetz, ist ein Ladegerät notwendig. Dieses passt den externen Spannungspegel an die zum Laden der Batterie erforderliche Batteriespannung an.

Abbildung 15 zeigt einen typischen Verlauf der Zellspannung (in Volt) sowie die Stromstärke (in Ampere) für den Ladeprozess über die Zeit für eine Lithium-Ionen-Batterie auf. Des Weiteren ist ein beispielhafter Entladeprozess abgebildet. Die Darstellung zeigt den Verlauf des Ladezustands (State of Charge, SoC). Deutlich zu sehen ist hierbei, dass bereits innerhalb kurzer Zeit etwa 70 % SoC erreicht werden. Das Erreichen der 100%-Marke ist allerdings mit zusätzlicher Zeit und abnehmender Ladestromstärke verbunden. Das Ladegerät kann entweder im Fahrzeug (On-board-Charging) installiert oder als externes Gerät in der Ladesäule verbaut sein (Off-board-Charging). Das Off-board-Charging wird meist bei der Schnellladung eingesetzt. Hierbei wird bereits in der Ladestation Gleichstrom für die Batterie erzeugt.

Das Ladegerät besteht in erster Linie aus Gleichrichtern (AC/DC-Wandler) für die Umwandlung von Wechselstrom aus dem Netz in einen Gleichstrom mit hoher Spannung zur Ladung der Batterie. Für die Umwandlung von Drehstrom (3-Phasen-Wechselstrom) können die Ladegeräte aus drei unabhängigen AC/DC- Wandlern bestehen oder aus einem integrierten Drehstromsystem. Soll Strom aus dem Fahrzeug auch zurück in das Netz eingespeist werden, müssen die Wandler bidirektional ausgeführt werden und

Kapitel 2

eine netzkonforme Wechselspannung gemäß Einspeiserichtlinien bereitstellen. Eine interessante Entwicklung sind sogenannte „Integrated Chargers“. Diese nutzen die vorhandene Infrastruktur an Spannungsrichtern und Wandlern im Fahrzeug für den Ladeprozess aus und verursachen somit deutlich geringere Kosten. Neben den Gleichrichtern benötigen Ladegeräte eine Kommunikationseinheit für die Ladesteuerung (Control Pilot, PLC, WLAN...).

Eine Besonderheit bieten Geräte für die induktive Ladung: Hier wird der Ladestrom mit einem elektromagnetischen Wechselfeld im kHz-Bereich über ein Spulenpaar durch die Luft übertragen. Die Leistungselektronik im Fahrzeug muss also einen induzierten Wechselstrom im kHz-Bereich in einen Gleichstrom umwandeln, der zugehörige Teil in der Infrastruktur die Netzspannung in die höherfrequente Übertragungsspannung. Bei hohen Leistungen und niedrigen Frequenzen werden in den Wandlern IGBTs eingesetzt, bei niedrigeren Leistungen und höheren Frequenzen verwendet man MOSFETs. Die Leistungselektronik kann dabei Wirkungsgrade bis zu 98 % ermöglichen [Leuthold (2014)].

2.3.3 GETRIEBE

Aufgrund der Drehmomentcharakteristik eines Verbrennungsmotors benötigen konventionelle Automobile Kupplung und Getriebe. Effizienz- und Komfortoptimierungen haben diese sehr komplex und teuer werden lassen. Dafür können mittlerweile viele verschiedene Fahrzeugcharakteristiken durch entsprechende Getriebe erzielt werden. Die Forderung nach einem besonders hohen Komfort lässt sich etwa durch ein Automatik- oder ein Doppelkupplungsgetriebe erfüllen, die Forderung nach möglichst niedrigen Kosten beispielsweise durch ein automatisiertes Schaltgetriebe.

HYBRIDGETRIEBE

Die Integration eines zusätzlichen Elektromotors bei parallelen Hybriden führt zu einer weiteren Komplexität im Antriebsstrang und des Getriebes. Bei den Automobilherstellern kommen unterschiedliche Lösungsansätze zur Zusammenführung des elektrischen Antriebs und Verbrennungsmotors zum Einsatz: BMW, Daimler und GM verwenden ein System aus mehreren Planetensätzen, Kupplungen und Bremsen mit integrierten elektrischen Maschinen, Toyota hingegen setzt ein einzelnes Planetengetriebe zwischen konventionellem und Drehstrommotor ein. VW, Audi und Porsche

greifen auf ein nur geringfügig modifiziertes Automatikgetriebe zurück und positionieren den Elektromotor zwischen Kupplung und konventionellem Motor [Hofmann (2014)].

GETRIEBE BEI BATTERIEELEKTRISCHEN FAHRZEUGEN

Während hybridelektrische Fahrzeuge meist eine sehr aufwendige und teure Getriebeeinheit erfordern, weisen batterieelektrische Fahrzeuge einfachere und damit kostengünstigere Lösungen auf. Je nach Konzept des Elektromotors wird weder für das Anfahren noch für die Höchstgeschwindigkeit ein Schaltgetriebe benötigt. Der komplette Verzicht auf ein mehrstufiges Getriebe ist nur bei High-Power-Maschinen möglich. Diese Konzepte kommen mit einem einfach gebauten und kostengünstigen Übersetzungsgetriebe aus. Einige Entwicklungsrichtungen mit dem Ziel der Senkung von Motorgröße, -gewicht, und -kosten weisen allerdings zu schnell-drehenden High-Speed-Motoren hin. Diese können in Einzelfällen ebenfalls in Kombination mit einstufigen Getrieben zum Einsatz kommen, erfordern in der Regel aber ein gestuftes Getriebe. Mehrstufige Getriebe werden häufig lediglich zweistufig ausgeführt. Der Verzicht auf die komplexe Getriebekomponente trägt generell zur Kostenreduktion und einer Wirkungsgraderhöhung des gesamten Antriebs bei [Kampker (2014)].

2.3.4 RANGE-EXTENDER

Spätestens durch den Opel Ampera sind sogenannte serielle Hybride (auch Range-Extended Electric Vehicles, REEV) und die dahinterstehende Technik weitläufig bekannt. Auch BMW bietet sein Modell i3 optional mit einem Reichweitenverlängerer in Form eines Zweizylinder-Ottomotors an, der den Energiespeicher des Fahrzeugs bei Bedarf über einen Generator mit Strom versorgt. Generell gilt es in Bezug auf den Range-Extender, insbesondere folgende Anforderungen zu verwirklichen:

- Kompaktes Design
- Optimales NVH-Verhalten (Noise-Vibration-Harshness)
- Hohes Verhältnis der Leistung zum Gewicht
- Zuverlässigkeit (auch nach längerer Zeit der Nichtbenutzung)
- Optimaler Wirkungsgrad in (wenigen) definierten Lastpunkten
- Gute Integrationsmöglichkeit in Fahrzeugarchitektur
- Geringe Kosten, Verbrauch und Emissionen

Aktuell dominiert der klassische Verbrennungsmotor als Antrieb eines Generators zur Stromerzeugung in batterieelektrischen Fahrzeugen. Technisch gesehen ist allerdings eine Vielzahl an Konzepten als Range-Extender-Maschine möglich. Als Beispiele seien genannt: klassische Hubkolbenmaschinen (Otto, Diesel, LPG, PNG, Stirling, 2-Takter, Boxer), Drehkolbenmaschine (Wankelmotor), Gasturbine, Brennstoffzelle und auch weitere exotische Konzepte wie der Freikolbenlinearmotor, Kugelmotor oder Wave-Disc-Generator.

2.3.5 OPTIMIERUNG DES KONVENTIONELLEN ANTRIEBSSTRANGS

Trotz der bereits erzielten Fortschritte und verfügbaren Technologien im Bereich des rein elektrischen Antriebs wird der Verbrennungsmotor auch in den nächsten Jahren eine tragende Rolle spielen. Dies ist einerseits darin begründet, dass sich eine große Nachfrage nach batterieelektrischen Fahrzeugen momentan noch nicht abzeichnet und deren Marktanteil deswegen auf absehbare Zeit hinter dem der konventionellen Automobile zurückbleiben wird. Andererseits bildet der Verbrennungsmotor einen wesentlichen Bestandteil von (Plug-in-)Hybridfahrzeugen und wird daher trotz oder gerade wegen einer Einführung bzw. Verbreitung dieser Antriebskonzepte seine Marktstellung behalten.

Aufgrund der weiterhin großen Bedeutung des Verbrennungsmotors sind bis zum Jahr 2020 allerdings auch erhebliche Anstrengungen zu unternehmen. Denn laut EU-Verordnung dürfen neue PKW ab dem Jahr 2020 bzw. 2021 durchschnittlich nicht mehr als 95 g CO₂/km ausstoßen. Um diesen Grenzwert einhalten zu können, müssen Automobilhersteller die CO₂-Emissionen insbesondere ihrer konventionellen Fahrzeuge teilweise sehr stark reduzieren. Das Potenzial hierfür ist vorhanden. Je nachdem, ob ausschließlich ein (bereits verbrauchsoptimierter) Otto- oder ein Dieselmotor, der vollständige Antriebsstrang oder ein Gesamtfahrzeug bestimmter Größe betrachtet wird, gehen Experten und Untersuchungen davon aus, dass sich auch ohne elektrischen Antriebsmotor und ohne ausgeprägte Leichtbaumaßnahmen noch Emissionen in Höhe von 10 bis über 40 % gegenüber heute einsparen lassen werden [Meszler (2014); Miorini (2013)].

Zusätzliches Potenzial entsteht durch Innovationen, die ursprünglich für elektromobile Antriebskonzepte entwickelt wurden, aber

auch Anwendung in konventionellen Automobilen finden können. Diese revolutionieren die gewohnte Architektur von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und tragen wesentlich zur Senkung von Verbrauch und CO₂-Emissionen unter den von der EU vorgegebenen Grenzwert bei. Nachfolgend werden die aktuellen Technologien zur Optimierung des nicht-hybriden und nicht-batterieelektrischen Antriebsstrangs aufgeführt, beginnend bei Maßnahmen, die direkt am konventionellen Motor ansetzen, bis hin zu solchen, die elektromobilen Fahrzeugkonzepten entstammen.

Ein Mittel zur Senkung des Verbrauchs eines Verbrennungsmotors ist der variable Ventiltrieb. Hierbei unterscheidet man zwischen der zeitlich variablen Ventilsteuerung (Variable Valve Timing, VVT) und der variablen Ventilhubsteuerung (Variable Valve Lift, VVL). Für beide Systeme existieren mittlerweile geeignete Aktuatoren, sodass sie auch rein elektrisch ausgeführt werden können (erwartete Auswirkung auf die CO₂-Emissionen bei Kombination von VVT und VVL: -8 %). Eine entsprechende Anordnung mehrstufiger VVL-Systeme macht des Weiteren eine ebenfalls elektrische Zylinderabschaltung möglich (-5 %). Neue Aufladungskonzepte für konventionelle Motoren erlauben eine zusätzliche Reduktion der CO₂-Emissionen im unteren einstelligen Prozentbereich. Die Aufladung gelingt dabei durch elektrisch unterstützte Turbolader oder Turbolader mit in Reihe geschaltetem, elektrischem Kompressor, jeweils ggf. ergänzt um eine (elektrisch einstellbare) variable Turbinengeometrie des Turboladers (ca. -5 %) [André (2014)]. Alle diese Ansätze zur Verminderung von Verbrauch und Emissionen eines Verbrennungsmotors mittels elektrifizierter Systeme gehen einher mit der Implementierung entsprechender elektrischer Steuerungen.

Ventiltriebsvariabilität und Motoraufladung eröffnen zusammen mit der Einführung der (homogenen) Benzindirekteinspritzung bei Ottomotoren bzw. höheren Einspritzdrücken bei Dieselmotoren das Potenzial zum Downsizing (Erhalt von Leistung und Drehmoment eines Motors bei verringertem Hubraum und kleinerer Zylinderzahl; -5 bis -15 % je nach Ausführung). Nach Anwendung von Aufladung und Downsizing gelingt eine zusätzliche Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch eine Abgasrückführung (AGR), die gegenüber heutigen Verfahren extern gekühlt wird (-4 %) [Korte (2011)]. Weitere Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen eines Verbrennungsmotors bestehen in der Minderung von Reibungs- und thermischen Verlusten (jeweils -2 %) [Backhaus

Kapitel 2

(2014)] sowie in der Einführung der variablen Verdichtung (Variable Compression Ratio, VCR), ggf. samt der zugehörigen elektrischen Steuerung (-5 %), und neuen Brennverfahren wie der homogenen Kompressionszündung (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI, oder Controlled Auto Ignition, CAI, -10 %) [Wallentowitz (2011)].

Neben den zuvor beschriebenen Technologien zur Senkung der Fahrwiderstände und Emissionen konventioneller Antriebsstränge existieren auch Lösungen, die außerhalb des Verbrennungsmotors angesiedelt sind. Im Bereich der Karosserie zählen hierzu steuerbare Kühlluftklappen, die den Luftwiderstand verringern (-2 %) [André (2014)]. Des Weiteren kann die (12-V-)Bordnetzbatterie zur Gewichtsreduktion als Lithium-Ionen- statt als Blei-Säure-Energiespeicher ausgeführt werden. Zusätzliche Maßnahmen bestehen in Start-Stopp-Systemen (-7 %). Diese lassen sich durch konventionelle (Ritzel-)Anlasser/Starter samt der zugehörigen elektrischen Steuerung realisieren. Weiterentwickelte, komfortablere Varianten nutzen riemengetriebene Startergeneratoren (RSG, auch Riemenstartergeneratoren genannt) oder integrierte Startergeneratoren (ISG) bzw. Kurbelwellenstartergeneratoren (KSG). Start-Stopp-Systeme mit Rekuperationsfunktion und zugehörigem Inverter können (vergleichbar mit dem batterieelektrischen Automobil) Energie beim Bremsen in die (12-V-)Bordnetzbatterie einspeisen und damit den Generator entlasten. Durch eine höherwertigere 12-V-Batterie und eine angepasste Motorsteuerung gelingt es, elektrifizierte Nebenaggregate (ebenfalls vergleichbar zum batterieelektrischen Automobil) auch beim Stillstand des Verbrennungsmotors zu betreiben. Die beiden zuvor genannten Konfigurationen werden in verschiedenen Quellen als Micro-Hybrid bezeichnet (-7 %).

Über die Start-Stopp-Funktion hinaus bietet ein zusätzliches Fahrzeug-Bordnetz mit einer höheren Spannung die Vorteile, mehr Bremsenergie zurückzugewinnen und den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen elektrisch zu unterstützen (-10 %). Eine solche Konfiguration wird als Mild-Hybrid bezeichnet. Hierfür kommen nur Startergeneratoren mit entsprechend leistungsfähigen Elektromotoren infrage. Außerdem benötigt das zusätzliche Bordnetz einen eigenen (Lithium-Ionen-)Energiespeicher sowie einen Gleichspannungswandler zur Verbindung mit dem 12-V-Bordnetz [Hofmann (2014); Götte (2014)].

Ein solches zusätzliches Fahrzeug-Bordnetz bietet neben der

Mild-Hybrid-Funktion diverse Potenziale zur Reduktion der CO₂-Emissionen eines konventionellen Antriebsstrangs. So gelingt es, Anwendungen mit hoher Leistungsaufnahme (beispielsweise für Komfortfunktionen) im Automobil umzusetzen und gleichzeitig das Gewicht des Bordnetzes sowie Leistungsverluste in Grenzen zu halten oder sogar zu vermindern. Außerdem lässt sich die Effizienz von Komponenten steigern. Wird etwa ein elektrischer Kompressor, der in Reihe mit einem Turbolader geschaltet ist, mit mehr als 12 V versorgt, verbessert dies die Wirkung der Aufladung [Aymanns (2014)]. Ein höheres Spannungsniveau im Fahrzeug erlaubt des Weiteren, Aggregate nicht mehr mechanisch, sondern elektrisch und damit effizienter zu betreiben. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz eines elektrischen Klimakompressors und einer elektrischen Wasserpumpe im nicht-batterieelektrischen Automobil, was die positiven Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auch auf konventionelle Fahrzeuge deutlich macht. Zukünftig sollen alle Neufahrzeuge deutscher Automobilhersteller über ein zweites Bordnetz mit einer Spannungslage von 48 V verfügen [Vollmer (2011)]. Mit diesem Wert liegt das zweite Bordnetz noch unter dem Berührungsbereich (≥ 60 V), in dem besondere Sicherheits- und Qualifizierungsmaßnahmen zu treffen sind. Trotzdem können mit 48 V bereits Mild-Hybridfahrzeuge realisiert werden (bisherige Mild-Hybridfahrzeuge weisen teilweise deutlich höhere Spannungen auf). Außerdem lassen sich (wie beim batterieelektrischen Antriebsstrang) neben den Komponenten der Klimatisierung auch in konventionellen Automobilen weitere Systeme elektrifizieren, wie die Lenkung und die Bremse. Generell wird erwartet, dass durch eine Umstellung auf elektrische Nebenaggregate eine Senkung der CO₂-Emissionen um 2 % möglich ist [Wallentowitz (2011); Friedrich (2013); Richter (2014)]. In den Beschreibungen der Technologien zur Optimierung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kommt der hohe Anteil elektrischer Funktionen zum Vorschein. Bei Anwendung aller genannter Maßnahmen muss deswegen selbst dann, wenn ein konventioneller Antriebsstrang zugrunde liegt, im Prinzip von einem elektrifizierten Automobil gesprochen werden.

2.4 SONSTIGE FAHRZEUGKOMPONENTEN

2.4.1 NEBENAGGREGATE

Es ist eine Vielzahl von Nebenaggregaten zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Verbrennungsmotors (Schmierölpumpe,

Kühlmittelpumpe, Kraftstofffördersystem, Kühlerventilator, mechanisches Aufladegerät) oder zur Realisierung einer Abgasreinigung (Sekundärluftpumpe, Katalysatorvorheizung) notwendig. In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden die Nebenaggregate nahezu ausschließlich mit konstanter Übersetzung von der Kurbelwelle angetrieben. Die energetische Versorgung dieser Komponenten muss stets gewährleistet sein und bei einer Gesamtbetrachtung ebenfalls Berücksichtigung finden. Auf die Nebenaggregate entfallen bis zu 6 % der Energie, die in einem konventionellen Automobil mittels fossilem Kraftstoff eingesetzt wird. Entsprechend weniger verbleibt von der im Kraftstoff enthaltenen Energie für die Überwindung der Fahrwiderstände. Dies ist umso bedeutender, da ein Verbrennungsmotor im Allgemeinen ohnehin lediglich 20 bis 30 % der im Kraftstoff enthaltenen Energie zur Verfügung stellt (vgl. u.a. Marx (2013); Velji (2010)).

Die Nebenaggregate, die nur für den Betrieb des Verbrennungsmotors bzw. nur für die Abgasreinigung erforderlich sind, werden bei batterieelektrischen Fahrzeugen nicht benötigt. Allerdings werden durch den Verbrennungsmotor auch weitere Aggregate angetrieben, auf die man im batterieelektrischen Fahrzeug nicht verzichten kann bzw. möchte, wie beispielsweise die Lenkhilfpumpe, die Vakuumpumpe für die Bremskraftverstärkung, das ABS, das ASR und die Niveauregulierung. Bei Wegfall des Verbrennungsmotors sind diese Komponenten entweder zu elektrifizieren oder es müssen elektrische Hilfsmotoren eingesetzt werden, welche anforderungsgerecht eingesetzt und verbrauchsoptimiert betrieben werden können. Innovationen sind beispielsweise bei Lenkungssystemen (elektromechanische Lösungen, „Steer-by-Wire“-Konzepte) und Bremssystemen (elektrohydraulische Bremsen, „Brems-Blending“-Ansätze als Kombination aus rekuperierendem Generator und Reibbremse oder elektromechanische Bremsen) gefordert.

Zu berücksichtigen bleibt, dass die gesamte benötigte Energie für die Nebenaggregate über die Hauptbatterie des Fahrzeugs bezogen werden muss. Dies mindert die für die reine Fahrt zur Verfügung stehende Energie und damit die Reichweite in erheblichem Maße. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass eine neue akustische Auslegung der elektrischen Nebenaggregate erfolgen muss. Dies konnte bisher vernachlässigt werden, da der Verbrennungsmotor auch im Leerlauf eine permanente Geräuschkulisse darstellte

und für den Nutzer möglicherweise unangenehme Geräusche der elektrischen Nebenaggregate übertönte. Durch die reduzierte Geräuschemission des batterieelektrischen Antriebsstrangs wird es nun notwendig, bei der Auslegung der Nebenaggregate auch auf einen niedrigen Lärmpegel Wert zu legen.

2.4.2 KLIMATISIERUNG

Fahrzeuge mit einer signifikanten elektrischen Antriebskomponente stellen maßgeblich aus zwei Perspektiven eine große Herausforderung für das Thermomanagement im Innenraum dar: Zum einen entfällt durch den Wegfall oder die Minimierung des Verbrennungsmotors eine „kostenlose“ Wärmequelle und Antriebseinheit für den Klimakompressor. Zum anderen schlägt sich insbesondere beim batterieelektrischen Automobil die für die Klimatisierung des Fahrgastraums aufzuwendende Energie deutlich spürbar auf die für den Antrieb benötigte Batteriekapazität nieder. Wird das Klimasystem eines batterieelektrischen Fahrzeugs gemäß heutiger Verfahren betrieben, nimmt die mit dem Wagen erzielbare Reichweite ab. Dieser Effekt ist, wie in Abbildung 16 als theoretische Abschätzung dargestellt, umso größer, je höher die Leistungsaufnahme der Heiz- bzw. Kühlkomponenten ausfällt.

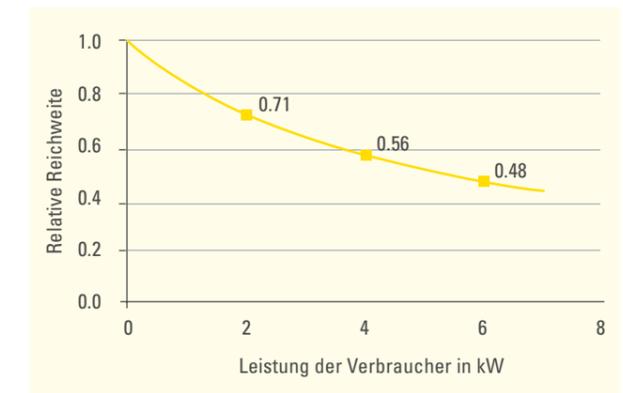


Abbildung 16: Reichweitenabnahme eines batterieelektrischen Fahrzeugs bei steigender Klimasystem-Leistung.¹⁶

¹⁶ Großmann (2013); Annahme: Durchschnittlicher Antriebsenergieverbrauch von 15 kWh/100 km im NEFZ.

Kapitel 2

Im Winter beeinflusst neben der Beheizung des Innenraums auch der temperaturbedingt niedrigere Wirkungsgrad der Antriebsstrangkomponenten den Gesamtenergieverbrauch. Als Folge können batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis bei Temperaturen unter 0°C teilweise nur sehr kurze Strecken zurücklegen, wie mehrere Vergleichstests zeigen. Dort nimmt die Reichweite einiger batterieelektrischer Automobile gegenüber den Werksangaben und Erfahrungswerten um weit über 50 % ab und beträgt wesentlich weniger als 100 km [Autobild (2014); AMS (2014); E-Auto.TV (2014)].

Da in Elektrofahrzeugen keine mechanische Antriebseinheit für die Klimatisierung vorhanden ist, müssen sie mit elektrischen Heiz- und Kühlsystemen ausgerüstet werden. Hierfür kommen Luft- oder Wasserheizer auf Basis des PTC (Positive Temperature Coefficient), Hochvoltheizer mit Schichttechnik (auch Schichtheizer genannt), Brennstoffheizer, Infrarot-Heizelemente oder Wärmepumpen sowie (ergänzend) elektrische Wasserpumpen und Klimakompressoren infrage. Diese sind in Abbildung 17 exemplarisch dargestellt. Alle Technologien zeichnen sich durch unterschiedliche Vor- und Nachteile aus und sind entsprechend der jeweiligen

Anforderungen der unterschiedlichen Konzepte vom Hybrid bis zum reinen Batterieantrieb unterschiedlich zu bewerten.

Der Effizienzsteigerung des Klimasystems ebenfalls zuträglich ist es, mit einem dezentralen System die Temperatur gezielt nahe am Körper der Insassen einzustellen, statt mit einem zentralen System den gesamten Fahrzeuginnenraum zu temperieren. Hierfür können etwa die oben genannten Infrarot-Heizelemente oder Widerstands-Heizfolien in die Berührungsflächen (Kopfstützen sowie Arm- und Beinauflagen) und die Flächen des Nahbereichs (Türseitenverkleidung und Instrumententafel) eingebracht werden. Ergänzend sind eine elektrische Sitzheizung, wie sie auch in konventionellen Automobilen zum Einsatz kommt, eine Scheibenheizung oder eine Lenkradheizung als weitere Bestandteile eines dezentralen Klimasystems zur Temperierung des Fahrzeuginnenraums nutzbar [Ackermann (2013)]. Weitere positive Effekte auf den Energieverbrauch zur Beheizung und Kühlung des Fahrzeuginnenraums ergeben sich durch passive Maßnahmen. Dazu zählen z.B. die thermische Dämmung der Karosseriefächen, der Einsatz von Beschattungssystemen, infrarotreflektierenden Scheiben und

weiteren infrarotreflektierenden Materialien (beispielsweise auf der Instrumententafel), die Reduktion von Wärmekapazitäten sowie die thermische Dämmung des Energiespeichers [Großmann (2013); Suck (2014); VW (2014)].

Zusätzlich zur Verwendung geeigneter Technologien im Fahrzeug führt das Vorkonditionieren der Fahrzeuggabine vor Antritt einer Fahrt über die Stromversorgung aus dem Netz oder über eine Ladestation auf Parkplätzen zu einem geringeren Energiebedarf während der Fahrt. Bei der Anwendung dieser Maßnahme hat die Klimatisierung einen geringeren Einfluss auf die erzielbare Reichweite. Denn die Energie aus der Traktionsbatterie wird nur zum Halten der Temperatur im Innenraum benötigt, was relativ wenig Leistung erfordert. Das leistungsintensive Einstellen der gewünschten Temperatur erfolgt, solange das Automobil mit dem Stromnetz verbunden ist.

2.5 KONDUKTIVE UND INDUKTIVE LADESYSTEME

Ladesysteme für Elektrofahrzeuge setzen sich fahrzeugseitig allgemein aus der Leistungselektronik mit Laderegulierung, den Schnittstellen zur Stromversorgung sowie optional den Bauteilen für die Kommunikationsmöglichkeiten zur Infrastruktur zusammen. Grundsätzlich unterscheidet man konduktive, also kabelgebundene, und induktive Ladeschnittstellen, bei denen Ladeströme und Kommunikationssignale kontaktlos über die Luft übertragen werden.

2.5.1 KONDUKTIVE LADESYSTEME

Bei konduktiven Ladesystemen wird der Strom von der Infrastruktur per Kabel über Steckverbinder in das Fahrzeug übertragen. Man unterscheidet hierbei zwischen Wechselstrom- und Gleichstromladung, für die jeweils verschiedene Stecksysteme entwickelt wurden. Weiterhin gibt es ungesteuerte und gesteuerte Ladeverfahren, für die verschiedene Kommunikationstechnologien und -protokolle zur Anwendung kommen. Damit die Fahrzeugladung europaweit einheitlich und überregional kompatibel wird, werden internationale Normen und Standards entwickelt.

LADEVERFAHREN

Wechselstromladung (AC-Ladung): Grundsätzlich sind in Europa vertriebene Elektrofahrzeuge heute mit einem Ladeanschluss an das hier bestehende Drehstromnetz (3-Phasen-Wechselspan-

nung) ausgestattet. Das Ladegerät, also die Leistungselektronik und die Ladesteuerung, befindet sich dabei im Fahrzeug und unterstützt die Ladung über ein bis drei stromführende Leiter (Phasen). Standard ist in Deutschland die Ladung über eine Phase mit bis zu 3,7 kW (Normalladung, 230 V, 16 A) oder über drei Phasen mit bis zu 22 kW (AC-Schnellladung, 400 V, 3 x 32 A). Letztere wird heute noch selten angeboten.

Gleichstromladung (DC-Ladung): Zusätzlich zur Wechselstromladung werden häufig optional Schnittstellen für das schnelle Laden mit Gleichstrom angeboten. Hier befindet sich das Ladegerät in der Ladestation. Dort wird also die Wechselspannung aus dem Netz in eine Gleichspannung mit mehreren Hundert Volt umgewandelt. Das Ladekabel ist dabei fest mit der Ladestation verbunden. Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass höhere Leistungen übertragen werden können, ohne erhöhte Anforderungen an die Fahrzeuge hinsichtlich Bauraum und Kühlung der Leistungselektronik zu stellen. In der Praxis gibt es heute mehrere konkurrierende Systeme: das Combined Charging System (CCS), CHAdeMO (beide i.d.R. bis zu 50 kW) und die firmenspezifischen Tesla Supercharger (bis zu 120 kW).

PHYSISCHE SCHNITTSTELLE

Für die Ladung von Elektrofahrzeugen wurden spezielle Schnittstellen entwickelt, die den hohen, länger anhaltenden elektrischen Leistungen beim Laden und den physischen Belastungen durch häufiges Stecken gewachsen sind. Außerdem wurden Kommunikations- und Sicherheitskontakte integriert, um die Sicherheit beim Laden durch zugehörige Steuerungen zu erhöhen.

Typ 2 und CCS (Combo 2): Für den europäischen Markt wurde ein einheitliches Schnittstellensystem für die Ladung von Elektroautos entwickelt, das sogenannte Typ-2-Stecksystem für AC-Ladung mit ein bis drei Phasen und dessen Erweiterung mit zwei zusätzlichen Leistungskontakten für die DC-Ladung (Abbildung 18). Fahrzeugseitig kann hierbei ein Inlay ausschließlich für AC-Ladung oder optional ein kombiniertes Inlay für AC- und DC-Ladung angeboten werden. Neben den jeweiligen Leistungskontakten werden für beide Ladearten die gleichen Kommunikations- und Sicherheitskontakte genutzt. Der Standard nennt sich deshalb auch Combined Charging System (CCS).



Abbildung 17: Beispiele für Komponenten zur Klimatisierung des Innenraums elektromobiler Antriebskonzepte.¹⁷

¹⁷ Eigene Darstellung; Bildmaterial: DENSO (2014); Eberspächer (2014); Elstein (2014); ixetic (2014); Webasto (2012); VDO (2014).

Kapitel 2

Das Typ-2/CCS-Stecksystem beinhaltet zwei Signalkontakte für die Ladesteuerung, einen Schutzleiteranschluss sowie für AC-Ladung drei Leistungskontakte und einen Rückleiter (Nullleiter) bzw. für DC-Ladung zwei Leistungskontakte (plus, minus). Das Stecksystem kann während der Ladung elektromechanisch verriegelt werden, um eine Unterbrechung der Verbindung unter Last zu vermeiden.

Typ 1 und CCS (Combo 1): Im amerikanischen und japanischen Raum gibt es im Gegensatz zu Europa nur einphasige Netzstrukturen. Für diese Regionen wurde deshalb ein eigenes Stecksystem entwickelt, die sogenannte Typ-1-Schnittstelle. Diese ist für die AC-Ladung ausgelegt und beinhaltet ebenfalls optional zwei zusätzliche Kontakte für die DC-Ladung, analog dem europäischen CCS. Bei einphasig ladenden Fahrzeugen findet man fahrzeugseitig die AC-Variante der Typ-1-Schnittstelle heute auch noch in Europa (z.B. Renault, Nissan, Mitsubishi).

Schuko: Neben den speziell für Elektrofahrzeuge entwickelten Stecksystemen ist es auch möglich, die Batterien einphasig mit Wechselstrom über eine normale, länderspezifische Haushaltssteckdose zu laden. In Deutschland entspricht dieser der Schutz-

kontaktsteckdose (kurz Schuko) mit bis zu 3,7 kW Anschlussleistung (230 V, 16 A). Aus Sicherheitsgründen wird bei aktuellen Fahrzeugen die Ladeleistung jedoch meist in den Bereich um 2 kW gedrosselt, da Steckdosen und gerade ältere Hausinstallationen nicht für die Übertragung hoher Leistungen über mehrere Stunden ausgelegt sind. Fahrzeugseitig kann bei der Schuko-Ladung unter Verwendung eines geeigneten Ladekabels mit zusätzlichen Kommunikations- und Sicherheitsfunktionen (Überstromschutz, FI-Schutzschalter...) die normale Typ-2- oder Typ-1-Schnittstelle genutzt werden.

CHAdeMO: Neben dem CCS-System gibt es für die DC-Schnellladung vor allem bei Fahrzeugen japanischer Hersteller Schnittstellen nach dem Standard CHAdeMO (z.B. Nissan, Mitsubishi). Dieses vor allem in Japan weit verbreitete System definiert einen eigenen Stecker und erfordert ein separates Inlay im Fahrzeug für die DC-Ladung sowie ein eigenes Ladeprotokoll, unabhängig und zusätzlich zum Anschluss für die AC-Ladung über Typ-2- oder Typ-1-Systeme. Das CHAdeMO-Stecksystem beinhaltet mehrere Signalkontakte, zwei Leistungskontakte (plus, minus) und eine Steckerverriegelung.



Abbildung 18: Typ-2-Stecker (oben) und CCS-Kupplung (unten) (Fahrzeugseite).¹⁸



Abbildung 19: Typ-1-Stecker (Fahrzeugseite).¹⁹

KOMMUNIKATION

Heutige Elektrofahrzeuge haben für das Aufladen eine Ladesteuerung, die in der Regel auch mit der Ladeinfrastruktur kommuniziert. Das ungesteuerte Laden ohne Kommunikation ist zwar technisch möglich und wurde bei älteren Fahrzeugen auch praktiziert, wird aber aus Sicherheitsgründen bei modernen Fahrzeugen nicht mehr weiter verfolgt. Die Ladesteuerung bzw. die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur folgt einem festgelegten Protokoll, das sich aus dem jeweils verwendeten Standard definiert.

Typ 2 und CCS (Combo 2): Für die Kommunikation werden zwei Signalkontakte verwendet: Control Pilot (CP) und Proximity Pilot (PP). In erster Instanz kommunizieren Fahrzeug und Infrastruktur über einfache, analoge Signalkleinspannungen zwischen dem CP-Kontakt und dem Schutzleiter (Protective Earth, PE). Die vorliegende Gleich- bzw. Rechteckspannung kann zur Signalisierung in Spannung und Pulsweite variiert werden. Der Kontakt dient zum Test der korrekten Schutzleiterverbindung, zur Information über die maximal verfügbare Ladeleistung und zum Initiieren bzw. Beenden der Ladung einschließlich Steckerverriegelung und Spannungsfreigabe. Über den PP-Kontakt kann die Ladestation mittels einer Signalspannung die maximale Strombelastbarkeit des Ladekabels abfragen. Diese ist in Form eines bestimmten elektrischen Widerstands zwischen PP und PE im Stecker kodiert.

Haben sich Ladestation und Fahrzeug über die Control-Pilot-Kommunikation erkannt, kann optional eine höhere, digitale Kommunikation initiiert werden (smart charge). Signale können hierbei über Powerlinekommunikation (PLC) auf Basis von Internetprotokollen übertragen werden. Die Datenverbindung kann neben der Ladesteuerung für Identifikations- und Abrechnungszwecke oder zukünftig auch zur Abwicklung von Smart-Grid-Anwendungen wie Lastreduzierung oder Stromrückspeisung verwendet werden [Mültin (2014); ITWissen (2014)].

Typ 1 und CCS (Combo 1): Die Ladesteuerung über den Control Pilot ist kompatibel mit der Steuerung beim Typ-2-System. Das heißt, ein gesteuertes Laden über eine Typ-1-Schnittstelle am Fahrzeug und eine Typ-2-Schnittstelle an der Ladestation ist mit einem entsprechenden Kabel möglich, allerdings nur einphasig.

Schuko: Über eine Schuko-Steckverbindung ist keine direkte

Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur möglich. Über eine sogenannte In Cable Control Box (ICCB), die unterhalb des Schuko-Steckers im Ladekabel integriert ist, wird jedoch die Control-Pilot-Kommunikation, analog dem CCS-System, zumindest zwischen ICCB und Fahrzeug ermöglicht. Die Schuko-Steckverbindung selbst ist somit nicht in die Ladesteuerung eingebunden, was z.B. ein verschleißintensives Abziehen des Schuko-Steckers unter Last ermöglicht. Höhere Kommunikationsmöglichkeiten können über Haushaltssteckdosen nicht abgewickelt werden.

CHAdeMO: Der Standard definiert ein eigenes, zum CCS-System nicht kompatibles Ladeprotokoll. Es beinhaltet eine Control-Pilot-Funktionalität und die höhere, digitale Kommunikation über CAN-Bus [CHAdeMO (2014); CHAdeMO (2014a)].

NORMEN

Das Laden von Elektrofahrzeugen wird in der Normenreihe IEC 61851 definiert. Hier werden unterschiedliche Lademodi für die AC- und DC-Ladung sowie Kommunikationsanforderungen und Sicherheitsrichtlinien definiert. In der Normenreihe IEC 62196 werden die zugehörigen Ladestecksysteme spezifiziert.

In diesen Normen, die sich teilweise noch in Bearbeitung befinden, sind die Anforderungen für Ladeverfahren mit Typ-1- und Typ-2-Steckern einschließlich ihrer CCS-Erweiterungen für die DC-Schnellladung erfasst [NPE (2013); DKE (2014)]. Darüber hinaus wird auch der japanische Schnellladestandard CHAdeMO behandelt [AW (2014)]. Weitere spezifizierte Systeme sind der Typ-3-Stecker für AC-Ladung und der chinesische GB-Standard für AC- und DC-Ladung [Herron (2014)].

Neben den grundsätzlichen Kommunikationsanforderungen in der Normenreihe IEC 61851 wird die höhere, digitale Kommunikation über PLC (HomePlug Green PHY) im Standard ISO/IEC 15118 behandelt. Die Normenreihe beschreibt nicht nur die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation, sondern erfasst auch dahinter liegende Systeme (Backend), z.B. Abrechnungsstellen oder „Smart Grid“-Steuerungen [Mültin (2014)].

VERBREITUNG

AC-Ladung: Das europäische Parlament hat sich 2014 auf eine einheitliche Schnittstelle für die Ladung von Elektroautos für

¹⁸ Phoenix Contact GmbH & Co. KG.

¹⁹ Phoenix Contact GmbH & Co. KG.

Kapitel 2

den europäischen Markt verständigt: das Typ-2-Stecksystem [EU (2014); NPE (2014)]. Angetrieben wurde dies nicht zuletzt durch ein breites Bündnis der meisten großen Fahrzeughersteller (ACEA, [ACEA (2012)]). Alle Elektrofahrzeuge sollen spätestens ab 2017 in Europa mit einem Typ-2-Stecksystem auf der Infrastruktur- und Fahrzeugseite ausgeliefert werden. Ab 2018 soll das Stecksystem auch im deutschen Recht verankert werden. Zusätzlich wird heute häufig ein Ladekabel mit Schuko-Stecker angeboten, das aber aus Sicherheitsgründen nur als Notladekabel Verwendung finden soll, wenn keine passende Ladestation mit Typ-2-Anschluss verfügbar ist. Öffentliche Ladestationen sollen mindestens den Typ-2-Standard unterstützen und für die Ladung zu Hause werden kompatible Heimpladestationen empfohlen.

DC-Ladung: Für die DC-Ladung präferiert ACEA für Europa das CCS-System auf Basis der Typ-2-Steckverbindung. Der Aufbau von CCS-Ladestationen wird deshalb aktuell auch im Rahmen öffentlicher Förderprojekte vorangetrieben [SLAM (2014)].

Der CHAdeMO-Standard ist bereits seit einigen Jahren im Markt und kompatible Fahrzeuge und Ladestationen wurden bereits ausgeliefert. Ob der Aufbau von CHAdeMO-Ladestationen deshalb weiter verfolgt werden soll, ist umstritten [Electrify (2014)]. Kritiker bemängeln eine eingeschränkte, für zukünftige Anwendungen nicht ausreichende Funktionalität des Protokolls, höhere Kosten und einen schlechteren Bedienkomfort.

Tesla treibt den Aufbau eigener Schnellladestationen (Supercharger) in allen Ländern, in denen ihr Model S vertrieben wird, massiv voran. Diese Entwicklung wird ebenfalls kritisch gesehen, da durch diese firmenspezifische Lösung das Ziel einer normkonformen, einheitlichen Ladeinfrastruktur für alle Elektrofahrzeuge konterkariert wird.

2.5.2 INDUKTIVE LADESYSTEME

Bei induktiven Ladesystemen wird die Ladeenergie kontaktlos über einen Luftspalt mittels eines elektromagnetischen Wechselstromfelds von einer Primärspule auf der Infrastrukturseite auf eine Sekundärspule im Fahrzeug übertragen. Die Primärspule wird dabei über eine zugehörige Leistungselektronik ein- oder dreiphasig an das normale Stromnetz angeschlossen.

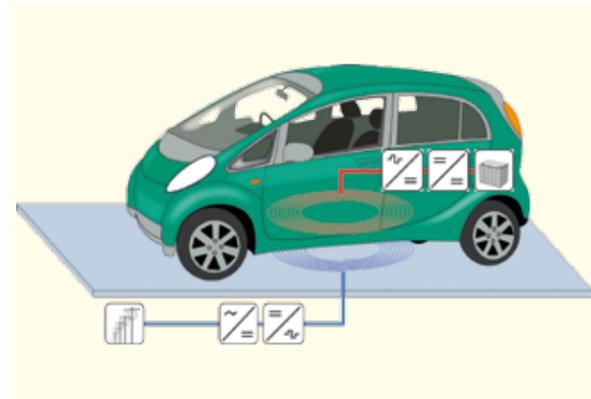


Abbildung 20: Aufbau eines induktiven Ladesystems.²⁰

AUFBAU

Die Primärspule wird entweder fest am Aufstellungsort installiert oder in einem flachen Gehäuse (ggf. in Form einer Matte) auf die Parkfläche gelegt. Neben der Variante mit dem Spulenpaar unterhalb des Fahrzeugs werden auch Systeme erprobt, bei denen sich die Spulen an der Fahrzeugfront befinden [Fraunhofer IISB (2014); Vahle (2014)]. Die Leistungselektronik und Netzanschlüsse befinden sich infrastrukturseitig entweder im Boden (Schachtsystem) oder in einer separaten Wallbox. Mittlerweile wurden auch vollintegrierte Systeme vorgestellt, bei denen sich die Leistungselektronik komplett im Spulengehäuse befindet und nur noch eine Zuleitung zum Netzanschluss erforderlich ist [BRUSA (2014)].

FUNKTIONSPRINZIP

Für die Energieübertragung formt die infrastrukturseitige Leistungselektronik die Netzspannung mit einer Frequenz von 50 Hz in Europa in eine höherfrequente Wechselspannung im kHz-Bereich um. An der angeschlossenen Primärspule wird daraufhin ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt, das in der Sekundärspule eine Wechselspannung gleicher Frequenz induziert. Die Leistungselektronik im Fahrzeug wandelt die induzierte Spannung dann in eine Gleichspannung um, mit der die Batterie geladen werden kann. Für mobile Anwendungen kommen heute zwei technologische Varianten zum Einsatz: Inductive Power Transfer (IPT) und Magnetic Resonance Coupling (MRC) [Leuthold (2014)].

CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN

Die Spulen müssen ideal aufeinander abgestimmt und möglichst deckungsgleich und nah aneinander positioniert werden, um hohe Wirkungsgrade zu erreichen und Streufelder in die Umgebung zu minimieren. Für Systeme unterhalb des Fahrzeugs liegt der Spulenabstand in einer Größenordnung von 10 bis 20 cm (PKW), für höher liegende Fahrzeuge (Bus, LKW) wird teilweise mit mechanisch absenkbareren Sekundärspulen gearbeitet. Für die deckungsgleiche Positionierung der Spulen werden Parkassistenten entwickelt, zukünftig ist sogar eine vollautomatische Positionierung denkbar. Erprobt werden beispielsweise Positionsbestimmungen mit Kameras, auf Basis des Felds aus der Leistungsspule oder mithilfe von GPS und WLAN. Versatztoleranzen zwischen den Spulen liegen heute im Bereich von 10 cm, was auch durch etwas größere Primärspulen im Vergleich zur Fahrzeugseite ermöglicht werden kann. Von mechanischen Positionierungssystemen der Primärspulen wird aufgrund des erforderlichen Wartungsaufwandes eher abgesehen. Heutige Systeme erreichen Wirkungsgrade für die Übertragungsstrecke und Leistungselektronik von über 90 % und liegen somit nahe der Wirkungsgrade konduktiver Systeme, welche im Bereich von 95 % liegen [Fraunhofer ISI (2010)].

Aktuelle Normungsbestrebungen zielen auf ein einheitliches Frequenzband um 85 kHz bzw. alternativ 140 kHz ab. Tendenziell werden 85 kHz festgelegt. Hohe Übertragungsfrequenzen ermöglichen kleinere und leichtere Bauteile bzw. minimieren die Feldstärken bei gleicher Spulengröße. Sie stellen dagegen aber auch höhere Anforderungen an die Leistungselektronik und können zu Störungen anderer elektronischer Komponenten führen.

KOMMUNIKATION UND LADESTEUERUNG

Zusätzlich zur Leistungsübertragung ist für die Ladesteuerung eine drahtlose Kommunikationsmöglichkeit erforderlich. Diese kann beispielsweise über zusätzliche Kommunikationsspulen, RFID-Technologien oder über separate Funkübertragungsschnittstellen (z.B. WLAN) erfolgen. Wichtig ist hierbei, dass ein Fahrzeug dem jeweils richtigen Parkplatz zugeordnet wird.

SICHERHEIT

In Bezug auf die Sicherheit gibt es drei Schwerpunkte, mit denen sich Hersteller und Normungsorganisationen auseinandersetzen müssen:

- Was passiert, wenn Personen oder Tiere sich zwischen den Spulen aufhalten?
- Was passiert, wenn sich metallische Gegenstände zwischen den Spulen befinden?
- Wie wirken sich Streustrahlungen auf Personen und elektronische Geräte in der Umgebung aus, z.B. auf Herzschrittmacher?

Die Relevanz dieser Fragestellungen hängt im Wesentlichen von den elektromagnetischen Feldstärken zwischen den Spulen und im Umfeld ab, die neben der Frequenz und der zu übertragenden Leistung von den Spulenflächen, dem Spulenabstand, dem Versatz und dem individuellen Design der Spulen (Form, Materialien, Abschirmungen) abhängen. In der Erprobung befindliche Systeme werden laut Herstellern so konstruiert, dass keine Beeinträchtigungen der Gesundheit bestehen, selbst wenn sich Lebewesen direkt zwischen den Spulen aufhalten. Die Streuemissionen sind allein schon physikalisch bedingt bei den verwendeten Frequenzen relativ niedrig und beschränken sich im Wesentlichen auf das nahe Umfeld der Spulen [Leuthold (2014)]. Diese werden deshalb in der Regel fahrzeugmittig am Unterboden installiert und sind somit im Normalfall für Personen unzugänglich. Allgemeine Richtlinien bezüglich elektromagnetischer Felder werden im Umfeld eingehalten (z.B. ICNIRP). Metallische Gegenstände werden sich durch induzierte Wirbelströme im Strahlengang in der Regel nur leicht erwärmen. Problematisch sind dagegen vor allem metallisch beschichtete Papiere (z.B. Kaugummiverpackung), die sich ggf. entzünden können [Fraunhofer IISB (2014)]. Zur Sicherheit werden für seriennahe Systeme technische Lösungen zur Fremdobjekt-, Lebewesen- und Temperaturerkennung entwickelt, sodass im Problemfall der Energiefluss unterbrochen werden kann [JustPark (2013)].

NORMEN UND STANDARDS

Einheitliche, internationale Normen werden angestrebt, um die sicherheitsrelevanten Fragestellungen zu adressieren und um eine Interoperabilität verschiedener Systeme zu gewährleisten.

Für induktive Ladesysteme im niedrigen Leistungsbereich bis 3,6 kW gibt es seit 2011 die Anwendungsregel VDE-AR-E 2122-4-2. Sie definiert technische Anforderungen und Mindestanforderungen in Bezug auf Sicherheit und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Die auftretenden Feldstärken sind demnach so niedrig zu

²⁰ Fraunhofer ISE (2013).

Kapitel 2

halten, dass selbst bei einer mehrstündigen Ganzkörperexposition keine der derzeit weltweit anerkannten Grenzwertempfehlungen (z.B. ICNIRP) überschritten wird oder eine gesundheitliche Beeinträchtigung für Lebewesen besteht. Temperaturobergrenzen für sich erwärmende Gegenstände im Strahlengang werden ebenfalls definiert. Der Ladewirkungsgrad soll über 90 % liegen. Bewegliche Teile (z.B. zur Absenkung der Spulen) sind nicht vorgesehen [VDE (2011); NPE (2013)].

International befindet sich die Normenreihe IEC 61980 in der Entwicklung, in der auch die Festlegung des Frequenzbands erfolgt. Ein Entwurf des ersten Teils ist seit Mitte 2013 erhältlich. Basierend auf der VDE-Anwendungsregel werden neben technischen Spezifikationen der Schutz vor Emissionen für Mensch und Tier sowie die EMV für technische Geräte behandelt. Zusätzlich geht es darum, die Messverfahren für Emissionen genauer zu definieren. Kommunikationsanforderungen und Anforderungen an das Ladeprotokoll werden ebenfalls betrachtet.

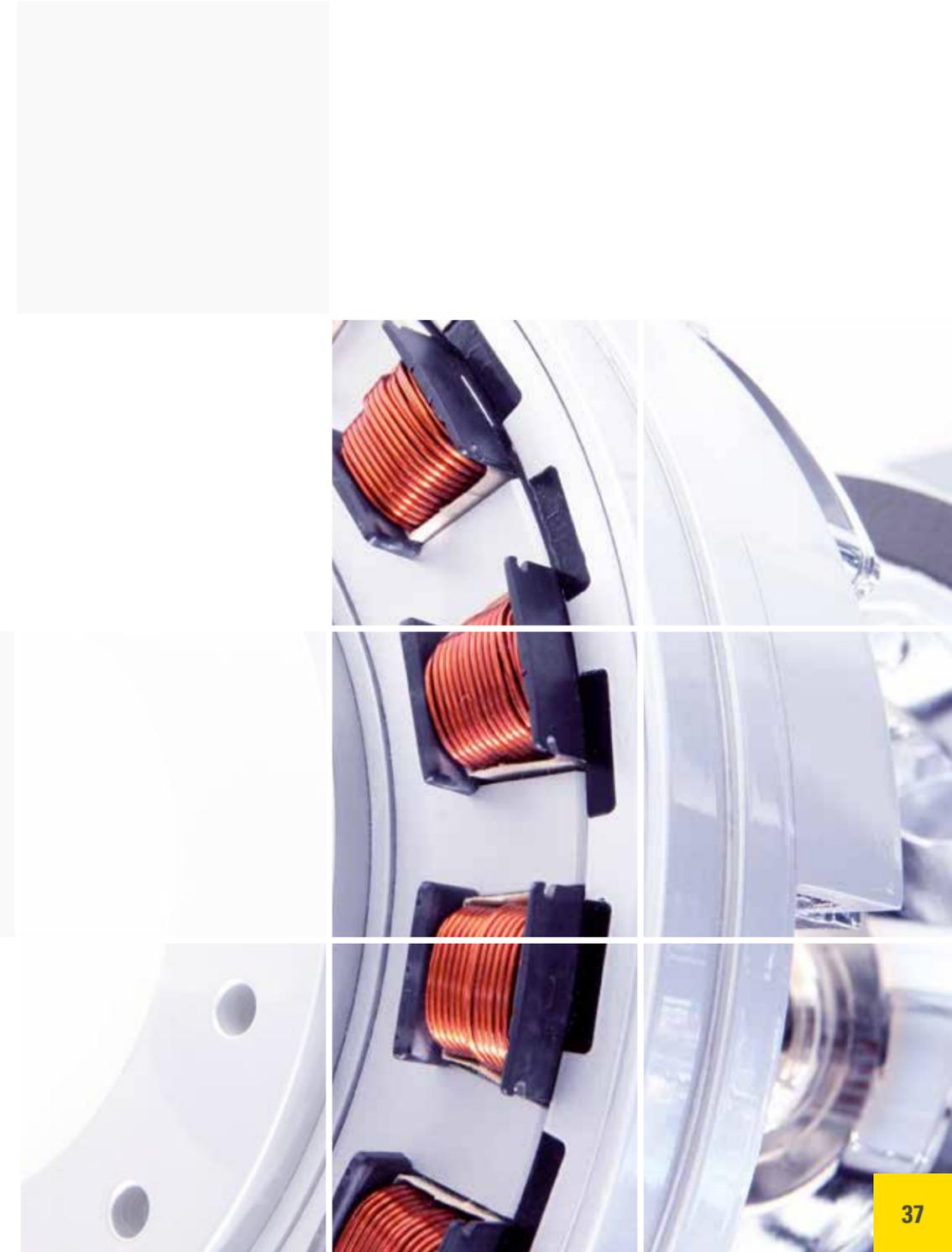
Im Rahmen der Normenreihe ISO/IEC 15118 (smart charge) wird die induktive Ladung ebenfalls berücksichtigt. Die Spezifikationen befinden sich noch in Bearbeitung und bauen auf den Vorarbeiten zum konduktiven Laden auf. Diese werden um die spezifischen Anwendungsfälle und technischen Anforderungen der drahtlosen Energieübertragung erweitert [Mültin (2014); ISO (2014)].

VORTEILE

Die Vorteile der induktiven Ladung sind im Vergleich zu kabelgebundenen Systemen äußerst vielfältig. Sie verbessert die Sicherheit: Es gibt keine Stolperfallen durch gespannte Ladekabel und es besteht keine Gefahr durch defekte Kabel und Stecker oder durch sogenannte Kriechströme bei Feuchtigkeit und Schnee. Sie verbessert den Bedienkomfort: Die Ladung kann jederzeit, auch automatisiert, nach dem Parken initiiert werden und verschmutzte Kabel gehören der Vergangenheit an. Die Fahrzeuge werden häufiger mit dem Netz verbunden. Somit haben Lademanagementsysteme und sonstige Dienste (z.B. Smart-Grid-Anwendungen) flexibleren Zugriff auf die Fahrzeuge. Nicht zuletzt können durch integrierte Systeme Ladestationen aus dem Stadtbild verschwinden und die Vandalismusgefahr kann minimiert werden.

VERBREITUNG

Heute befinden sich induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge zahlreicher Hersteller und Forschungsinstitute im Prototypenstadium oder bereits in der praktischen Erprobung. In Baden-Württemberg gibt es Systeme von Conductix-Wampfler/IPT-Technology, SEW-Eurodrive, Bombardier, Bosch, Audi oder auch dem Fraunhofer ISE [IPT (2014); SEW (2012); Bombardier (2014); Insider (2014); Fraunhofer ISE (2013)]. Im niedrigen Leistungsbereich bis 3,6 kW sind die Entwicklungen und Normungen am weitesten fortgeschritten, aber für LKW und Busse werden bereits auch Systeme mit weit über 100 kW Leistung erprobt [Conductix (2012)]. So wird in Mannheim aktuell eine vollelektrische Buslinie mit induktiven Ladestationen an den Haltestellen in Betrieb genommen [Bombardier (2014a)]. Während die Ladetechnik für Flurförderfahrzeuge in Fabrikhallen schon breite Anwendung findet, ist im Bereich der Straßenfahrzeuge aktuell nur eine Lösung kommerziell als Nachrüstatz erhältlich: das PLUGLESS-System von Evatran und Bosch, vertrieben ausschließlich in den USA [Golem (2013)]. Ein Serieneinsatz induktiver Systeme ist jedoch in den kommenden Jahren bei mehreren Fahrzeugherstellern zu erwarten. So stellen beispielsweise Daimler, BMW und Volkswagen aktuell Serienstarts ab 2017 in Aussicht [Express (2014); BMW (2014); JustPark (2014)].



MARKT UND WERTSCHÖPFUNG

3.1 DIE BEDEUTUNG DES AUTOMOBILS FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Baden-Württemberg gilt als bedeutender Automobilstandort in Deutschland und genießt sowohl national als auch international einen hervorragenden Ruf als Produktionsstandort für Premiumautomobile. Die einzigartige Ballung von Fahrzeugherstellern, Automobilzulieferern, Forschungsinstituten und Hochschulen mit spezialisierten Studiengängen bietet dem Fahrzeugbau gute Standortbedingungen.

Baden-Württemberg ist zudem ein wichtiger Absatzmarkt für die Automobilindustrie. Der PKW-Bestand in Baden-Württemberg liegt bei knapp 6 Millionen Fahrzeugen und hat sich seit 1970 verdreifacht. Mit einer PKW-Dichte von knapp 570 Fahrzeugen pro 1.000 Einwohner weist Baden-Württemberg hinter Luxemburg, Italien, Malta und Litauen die fünfthöchste PKW-Dichte in der Europäischen Union auf [Statistisches Landesamt (2013)].

3.1.1 AUTOMOBILSTANDORT BADEN-WÜRTTEMBERG

Mit der Daimler AG und der Porsche AG haben zwei der renommiertesten Automobilhersteller ihren Hauptsitz in Baden-Württemberg, darüber hinaus ist die Audi AG mit einem bedeutenden Produktions- und Entwicklungsstandort im Land vertreten. Neben

Unternehmen im Nutzfahrzeugbereich (wie beispielsweise Daimler Trucks, EvoBus oder Kässbohrer Geländefahrzeug AG) verfügt der Standort Baden-Württemberg außerdem über eine Vielzahl von bedeutenden Zulieferunternehmen.

Die Firmen Bosch, ZF Friedrichshafen, MAHLE, Getrag, KSPG, Eberspächer, Freudenberg, Mann+Hummel zählen alle zu den 100 größten Automobilzulieferern weltweit und haben ihren Hauptsitz in Baden-Württemberg [Automobil Industrie (2014)].²¹ Seinen Hauptsitz in Baden-Württemberg hat auch car2go, der zweitgrößte Carsharing-Betreiber Deutschlands hinsichtlich der Fahrzeuganzahl.

Zudem haben viele der 100 weltgrößten Automobilzulieferer, die ihren Hauptsitz außerhalb Baden-Württembergs haben, (Produktions-)Standorte in Baden-Württemberg. Hierzu zählen Continental, Schaeffler, Hella, Brose, Leoni, Dräxlmaier, Evonik Industries und Knorr-Bremse [Automobil Industrie (2014)].

In Summe sind in Baden-Württemberg mehr als 20 Automobilzulieferer angesiedelt bzw. mit Produktionsbetrieben vertreten, die 1.000 oder mehr Mitarbeiter beschäftigen.

Abbildung 21 zeigt die regionale Verteilung der wichtigsten Zulieferer in Baden-Württemberg sowie deren Hauptbetätigungsfelder.

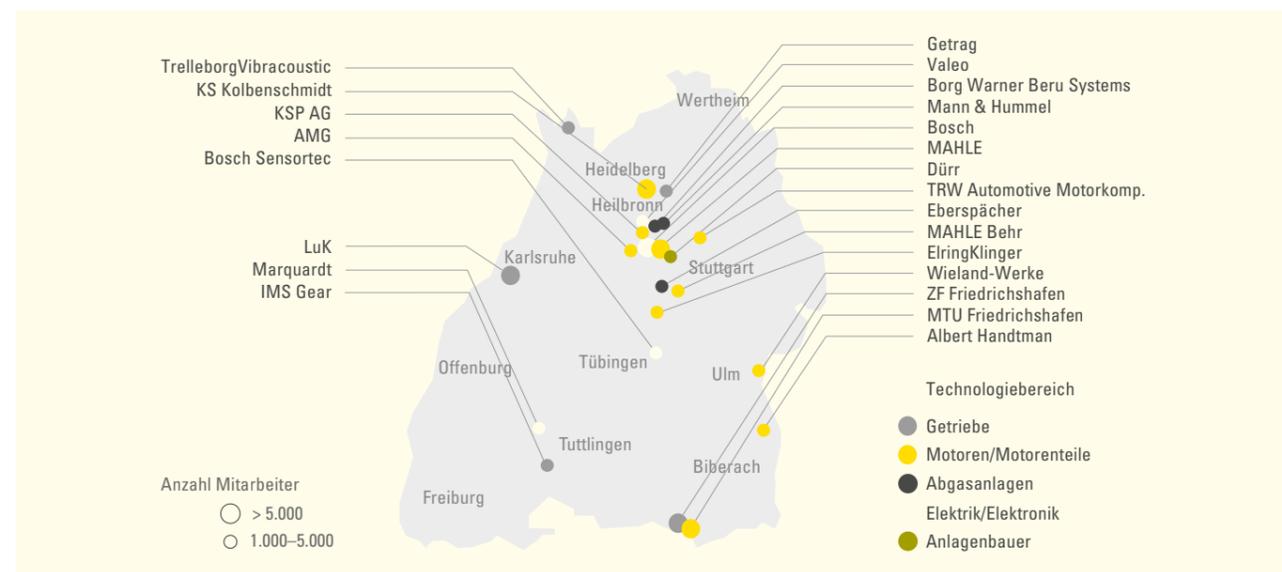


Abbildung 21: Landkarte von wichtigen Automobilzulieferunternehmen in Baden-Württemberg.²²

²¹ Die Unternehmen Behr und Peguform wurden 2013 bzw. 2011 übernommen und heißen nun MAHLE Behr und Samvardhana Motherson Peguform. Sie erscheinen nun implizit in ihren Muttergesellschaften in der Liste der weltgrößten Automobilzulieferer [Automobil Industrie (2014)].

²² Eigene Darstellung.

3.1.2 AKTUELLE ENTWICKLUNG BEI NEUZULASSUNGEN

Im Jahr 2014 wurden im gesamten Bundesgebiet rund 3,04 Millionen Personenkraftwagen zugelassen, bei einem Bestand von insgesamt ca. 44 Millionen PKW. Auf das Bundesland Baden-Württemberg entfielen dabei ca. 416.000 Neuzulassungen bei einem Bestand von knapp 6 Millionen PKW. Im Bereich der Elektro- und Hybridfahrzeuge²³ stieg die Anzahl neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland auf 35.957 Fahrzeuge [Kraftfahrtbundesamt (2015)]. Bei den Neuzulassungen von Elektro- und Hybridfahrzeugen nimmt Baden-Württemberg jeweils Rang drei im Bundesländervergleich ein [Kraftfahrtbundesamt (2014)].

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung „elektrifizierter Fahrzeugkonzepte“, bezogen auf die Neuzulassungen der vergangenen Jahre.

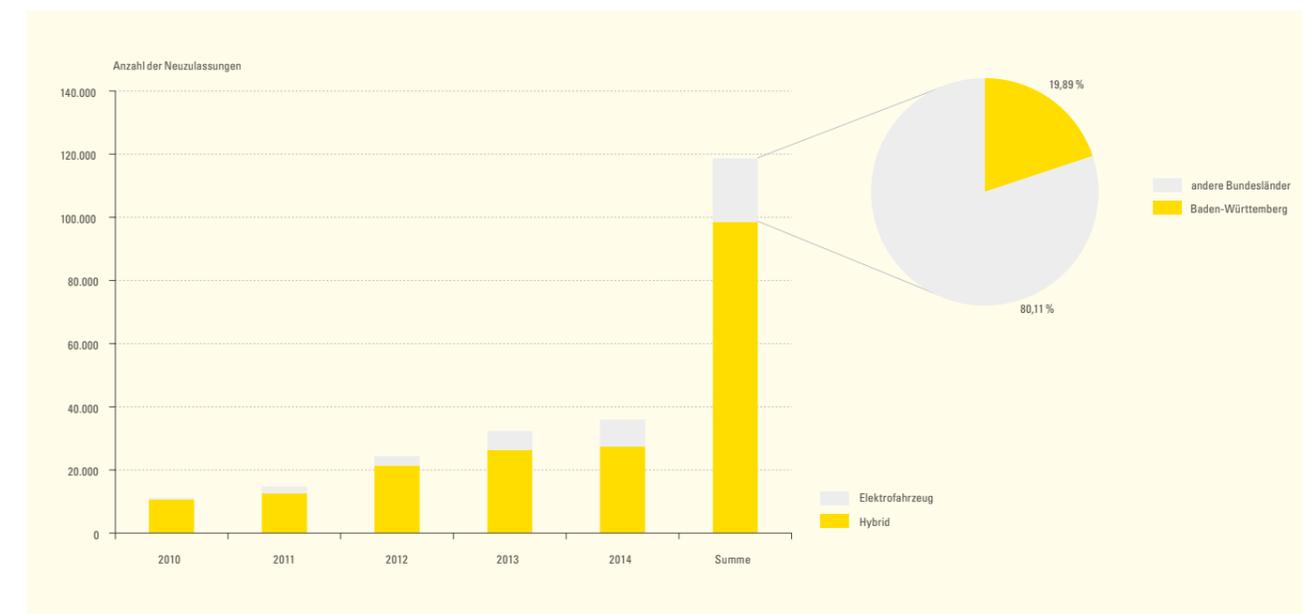


Abbildung 22: Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-PKW in Deutschland.²⁴

²³ Laut Nationalem Entwicklungsplan Elektromobilität zählen zu den Elektrofahrzeugen batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-in-Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung [Bundesregierung (2009)]. Das Kraftfahrtbundesamt folgt dieser Definition mittlerweile. Vor 2012 wurden jedoch aufgrund der bis dahin geltenden Typgenehmigungen Plug-in-Hybridfahrzeuge als Hybridfahrzeuge ausgewiesen [Kraftfahrtbundesamt (2014)].

²⁴ Eigene Darstellung auf Basis von [Kraftfahrtbundesamt (2014)].



3.1.3 STRUKTUR DER AUTOMOBILINDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Die Automobilindustrie mit ihren Zulieferern nimmt in Baden-Württemberg eine Schlüsselfunktion ein. Im Jahr 2013 waren hier nahezu 212.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in über 300 Unternehmen im Fahrzeugbau tätig, mit einem Branchen-Jahresumsatz von knapp 88 Milliarden Euro [Statistisches Landesamt (2014a)]. Eine Beschränkung des Automobilsektors auf die gemäß der Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE Rev. 2) vorgenommene Klassifizierung führt jedoch zu einer Unterbewertung der eigentlichen wirtschaftlichen Bedeutung der Automobilwirtschaft [Kinkel (2007)]. Neben den Unternehmen, die direkt dem Fahrzeugbau als „Hersteller von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ (WZ-Nummer 29) zuzuordnen sind, müssen weitere Unternehmen aus anderen Branchen des verarbeitenden Gewerbes, wie beispielsweise

der chemischen Industrie, aus der Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren oder dem Maschinenbau berücksichtigt werden. Als wichtige Zulieferer (über alle Vorleistungsstufen) oder Ausrüster für den Fahrzeugbau haben sie wesentlichen Anteil an der Herstellung des Automobils.

Eine Analyse des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI (Erhebung „Modernisierung der Produktion 2009“) ergab, dass rund 13 % aller Beschäftigten der chemischen Industrie, rund 20 % der Mitarbeiter innerhalb der gummi- und kunststoffverarbeitenden Industrie und 32 % aller Beschäftigten in Betrieben, welche Metallerzeugnisse herstellen, im weiteren Sinne ebenfalls zum Kreis der Automobilzulieferer gehören [Kinkel (2007); Jäger (2009); IHK (2011)]. Bezogen auf Baden-Württemberg zählen bei dieser Betrachtungsweise rund 600 Betriebe zum Kreis der Automobilzulieferer [Zanker et al. (2011)]. Zusätzlich beschäftigen das Kfz-Handwerk sowie zahlreiche au-

tomobilbezogene Dienstleistungsunternehmen (F&E, Ingenieurbüros, Hard- und Softwarehäuser) eine große Zahl an Menschen in Baden-Württemberg. Unter Berücksichtigung aller aufgezeigten Bereiche tragen insgesamt im Land Baden-Württemberg über 440.000 direkt oder indirekt Beschäftigte ihren Teil zur automobilen Wertschöpfung bei. Gemessen an der Gesamtbeschäftigungszahl des Landes in Höhe von 4,134 Millionen ist das rund jeder Zehnte [Statistisches Landesamt (2014b)].

Fasst man diese Daten zusammen, so lässt sich die Automobilwirtschaft, wie in Abbildung 23 dargestellt, als Konstrukt mehrerer Ebenen verstehen. Im Clusterkern findet sich der gemäß der NACE-Systematik erfasste Wirtschaftszweig „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ (NACE-Klasse 29), der als direkter Automobilbau verstanden werden kann, wieder. Im Produktions-Cluster lassen sich zusätzlich zu den Herstellern und Zulieferern aus dem Clusterkern Beschäftigte aus anderen

Branchen des verarbeitenden Gewerbes summieren, welche bei weiteren Zulieferunternehmen oder Ausrüstern tätig sind. Das gesamte Automotive-Cluster setzt sich letztlich aus der Gesamtheit der Beschäftigten aus dem Clusterkern, dem Produktions-Cluster sowie den Angestellten des Kfz-Handwerks und Mitarbeitern von automobilbezogenen Dienstleistungsunternehmen zusammen.

3.2 MARKTENTWICKLUNG

Der globale Automobilmarkt befindet sich insbesondere aufgrund der Wachstumsmärkte in Asien in einer Phase starken Absatzwachstums. Der globale Absatz von Personenkraftwagen hat sich zwischen 2011 und 2013 mit einer Wachstumsrate von durchschnittlich 5,9 % gesteigert. Im Jahr 2013 lag er bei 73,8 Millionen Fahrzeugen. Abbildung 24 zeigt die Entwicklung des globalen PKW-Absatzes auf Basis verschiedener Studien.

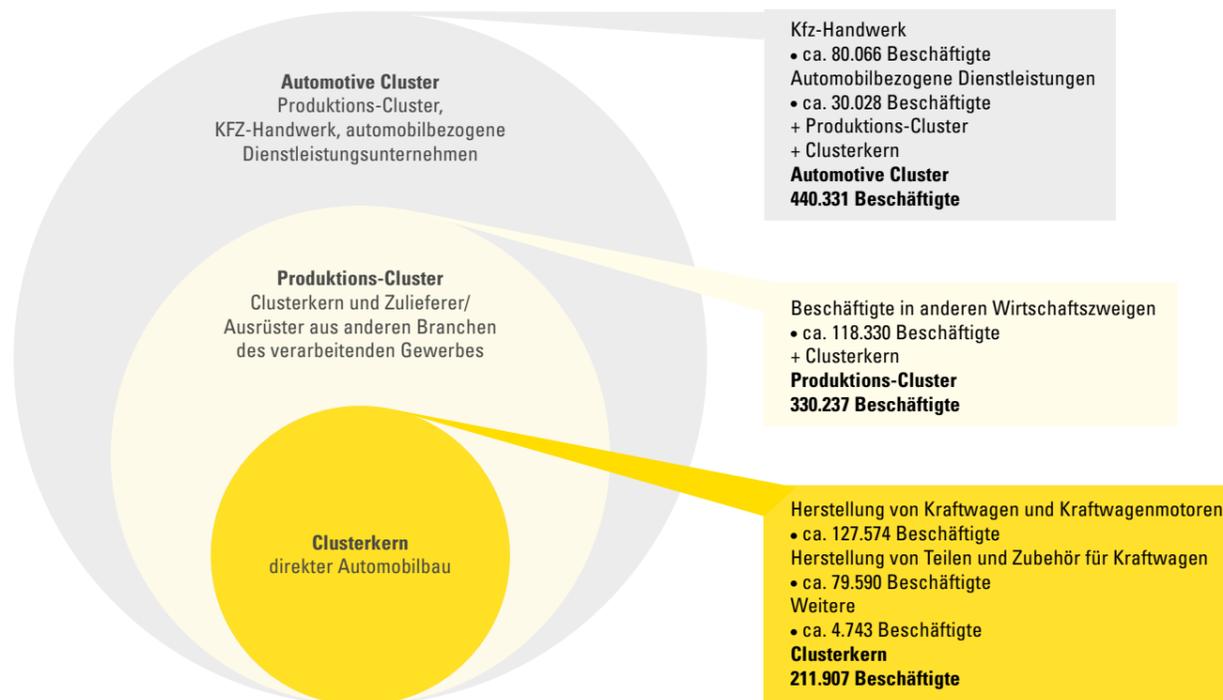


Abbildung 23: Struktur der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg im Jahr 2013.²⁶

²⁶ Eigene Darstellung auf Basis von [Statistisches Landesamt (2014a); Statistisches Landesamt (2014b)]. Es wurde angenommen, dass automobilbezogene Dienstleistungen analog zum Wachstum im Clusterkern gewachsen sind.

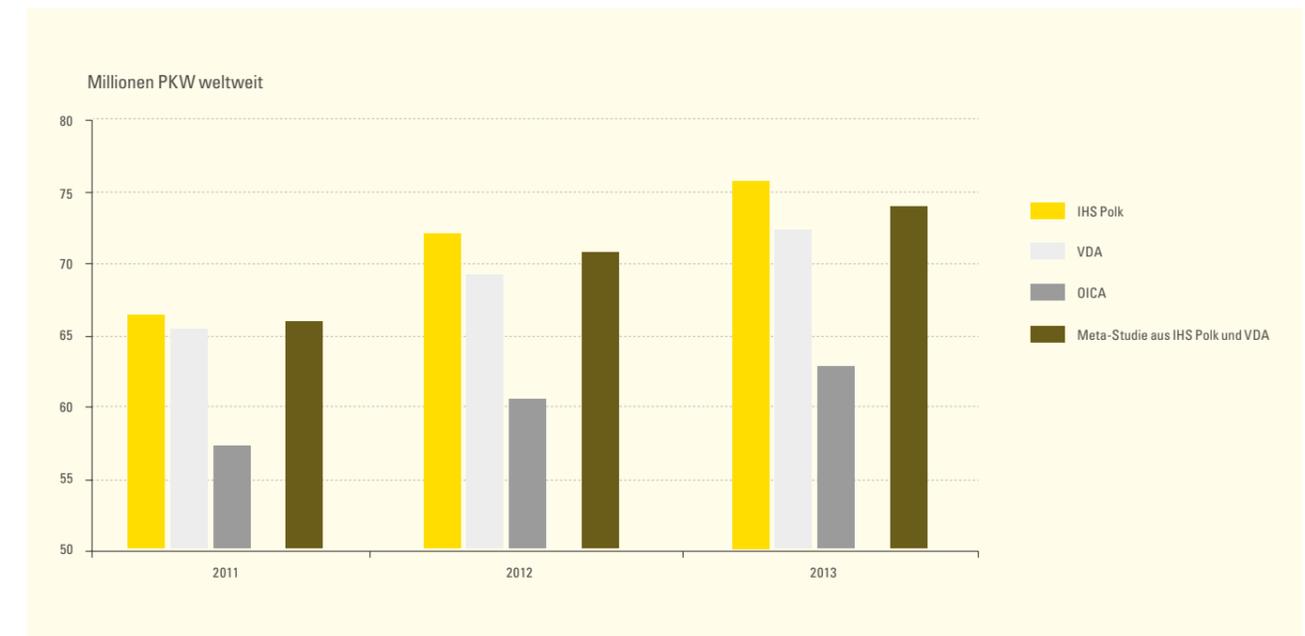


Abbildung 24: Globale PKW-Marktentwicklung 2011–2013.^{26,27}

²⁶ Eigene Berechnung auf Basis von [OICA (2014); IHS (2014); VDA (2013)].

²⁷ Während sich die Daten der Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA) auf die nach der jeweiligen Landeshomologation zugelassenen Fahrzeuge beziehen, beziehen sich die Daten des VDA und der Marktforschungseinrichtung IHS Polk auf Fahrzeuge, die überwiegend zum Personentransport genutzt werden. Durch diese Definition ergibt sich ein Aufschlag von ca. 16,5 % gegenüber den OICA-Daten.

Kapitel 3

Die Anzahl an Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen hat sich zwischen 2011 und 2013 verdreifacht. Abbildung 25 zeigt die Absatzentwicklung von Elektrofahrzeugen zwischen 2011 und 2013.

Insgesamt gibt es derzeit weltweit einen Fahrzeugbestand von über 1 Milliarde PKW.²⁸ Hiervon sind ca. 9,5 Millionen Fahrzeuge Mild- und Full-Hybridfahrzeuge und über 500.000 Fahrzeuge Elektrofahrzeuge.²⁹ Unter anderem aufgrund des Markteintritts und Rollouts von Joint Ventures zwischen Automobilherstellern und Autovermietungen (car2go, DriveNow) weist der Carsharing-Markt in den letzten Jahren hohe zweistellige Wachstumsraten auf. Abbildung 26 zeigt die Entwicklung der Anzahl globaler Carsharing-Kunden und -Fahrzeuge seit 2006.

Die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen wird von den Total Cost of Ownership im Verhältnis zum wahrgenommen Kundennutzen geprägt. Abbildung 27 zeigt die wesentlichen Kosten- und Nutzenfaktoren eines batterieelektrischen Fahrzeugs im Vergleich zu einem Verbrennungsfahrzeug.

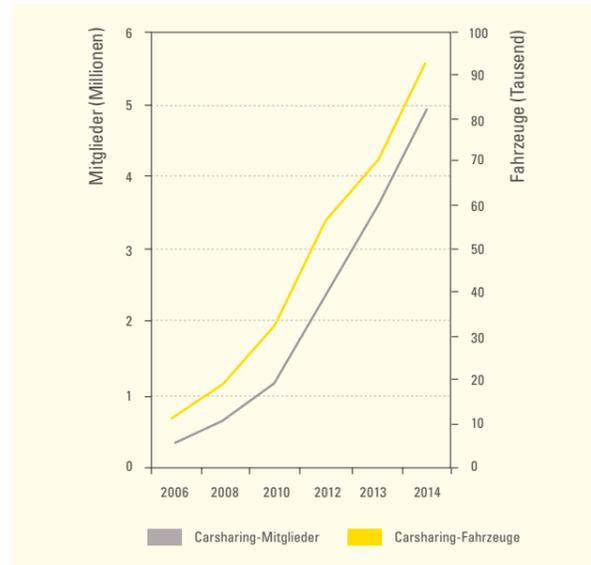


Abbildung 26: Globale Carsharing-Marktentwicklung 2011 bis 2014.³¹

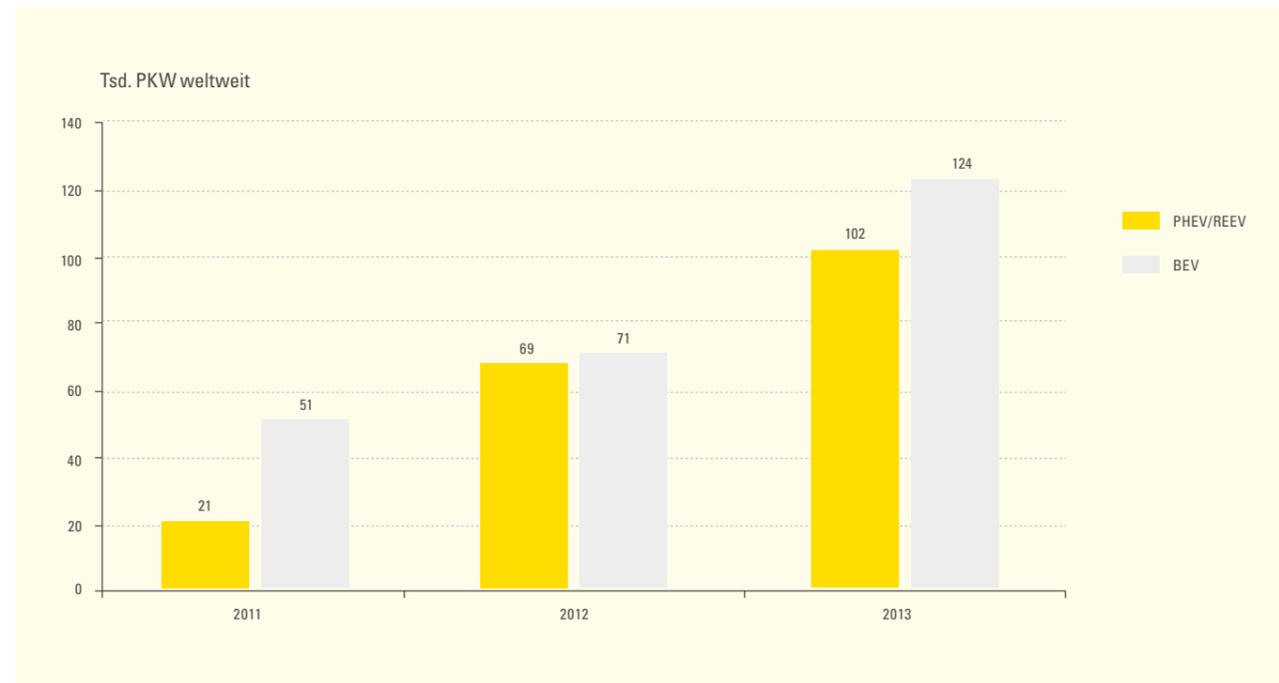


Abbildung 25: Globaler Absatz von Elektrofahrzeugen 2011–2013.³⁰

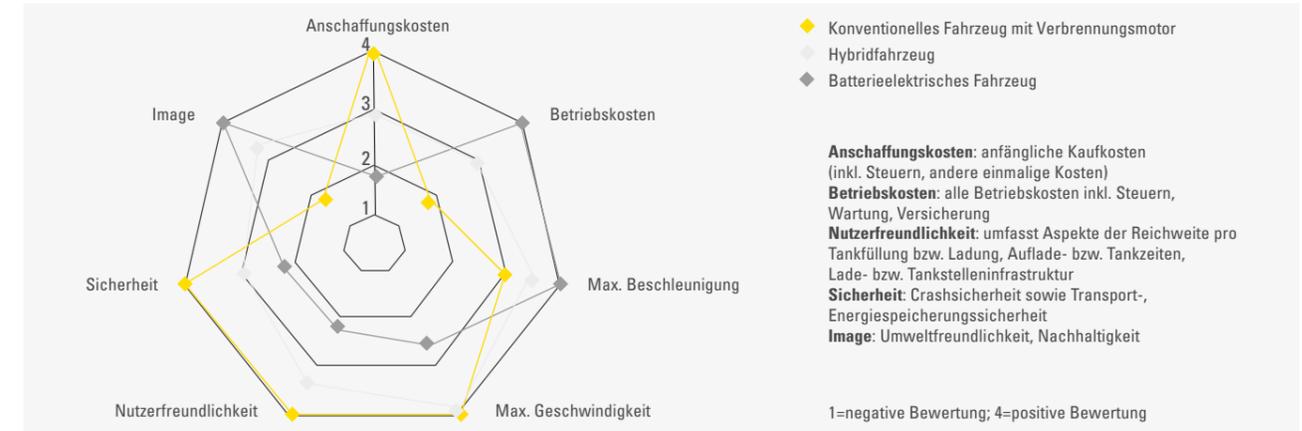


Abbildung 27: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebskonzepte.³²

Die Anschaffungs- und Betriebskosten lassen sich zu Gesamtkosten (Total Cost of Ownership, TCO) zusammenfassen. Für die meisten Nutzungsprofile liegen die TCO von Elektrofahrzeugen über denen von Verbrennungsfahrzeugen (sogenannte „TCO-Lücke“). Abbildung 28 zeigt die Total-Cost-of-Ownership-Lücken für kleine, mittelgroße und große Fahrzeuge sowie für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) in 2013 und 2020 differenziert nach Privatfahrzeugen, gewerblichen Fahrzeugen und Dienstwagen.

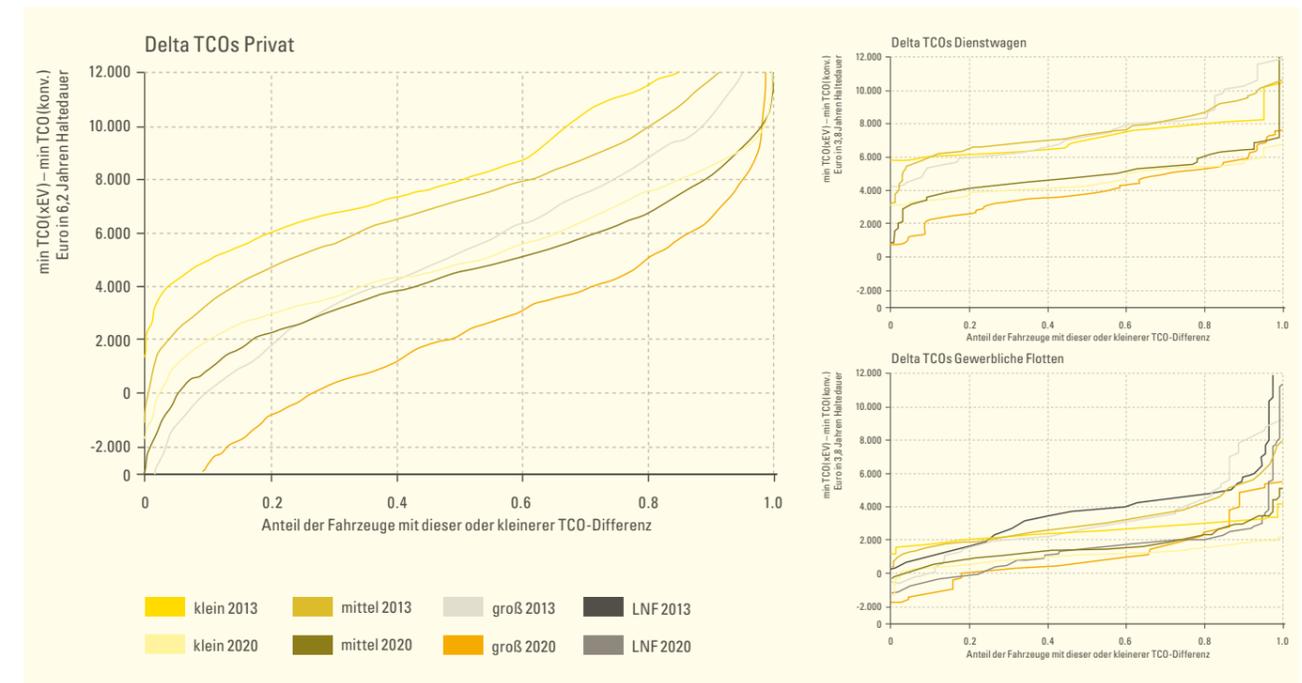


Abbildung 28: Total-Cost-of-Ownership-Vergleich von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen verschiedener Fahrzeugsegmente bei unterschiedlichen Einsatzzwecken.³³

²⁸ Zum 28.2.2012 gab es laut OICA über 833 Millionen PKW. Legt man eine nutzungsgerechte Definition von PKW zugrunde, ergeben sich daraus über 980 Millionen PKW. Aufgrund des weiteren Marktwachstums seit Februar 2012 kann mittlerweile von über 1 Milliarde PKW ausgegangen werden [OICA (2014a)].

²⁹ Eigene Berechnung auf Basis von [Toyota (2014); Frost & Sullivan (2012a); ZSW (2014)]. Stand der Aussagen ist Herbst 2014. Laut ZSW gab es Anfang 2014 bereits über 400.000 Elektrofahrzeuge, sodass im Herbst 2014 von über 500.000 Elektrofahrzeugen ausgegangen werden kann.

³⁰ Eigene Berechnung auf Basis einer Metastudie unter Berücksichtigung von [IHS (2014); IEA (2013); EVsroll (2014)].

³¹ Eigene Darstellung auf Basis von [Frost & Sullivan (2014)].

³² Eigene Darstellung.

³³ Plötz (2013).

Kapitel 3

Abbildung 28 zeigt, dass bei 20 % der Nutzer von Kleinwagen die TCO-Lücke im Jahr 2013 insgesamt 6.000 Euro oder weniger beträgt. Bis 2020 reduziert sich diese TCO-Lücke auf ca. 3.000 Euro oder weniger. Zusätzlich erkennt man in Abbildung 28, dass ein Teil der Nutzer im Jahr 2020 über eine TCO-Lücke kleiner oder gleich Null verfügt, sodass für einen Teil der Nutzer ein Elektrofahrzeug insgesamt günstiger sein wird. Zudem zeigen die Abbildungen die hohe Bandbreite an TCO-Differenzen. Die Kurven verlaufen bei den privaten Nutzern am steilsten und bei den gewerblichen Nutzern am flachsten. Gründe dafür sind der Mehrwertsteuereffekt, regelmäßige Fahrprofile mit wenigen langen Fahrten bei den gewerblichen Nutzern und die Möglichkeit der Abschreibung, wodurch die TCO-Lücken der gewerblichen Halter kleiner werden. 2013 besteht nur ein geringes wirtschaftliches Potenzial für Elektrofahrzeuge, dieses nimmt jedoch bis 2020 zu.³⁴

3.3 MARKTSZENARIEN

3.3.1 ENTWICKLUNG DES GLOBALEN AUTOMOBILMARKTS

Die Mehrzahl der Marktstudien geht bis zum Jahr 2020 von einem Wachstum des globalen Automobilmarkts zwischen 2,8 und 4,3 % aus [Bosch (2013); A.T. Kearney (2012); Roland Berger (2013); Polk (2013); AlixPartners (2014)].

Im Vergleich zur Situation von 2011 wird aufgrund der nach wie vor guten volkswirtschaftlichen Fundamentaldaten zwar weiterhin von einer dynamischen Entwicklung des Automobilmarkts ausgegangen, allerdings deuten sich 2014 und 2015 bereits erste Abschwächungen der optimistischen Prognosen an. Die Ratingagentur Moody's erwartet für 2015 nur noch eine Absatzsteigerung in Höhe von 3 % [Moody's (2014)]. Zudem zeigen die Verwerfungen an den Finanzmärkten um die Jahrtausendwende und in den Jahren 2007–2009, dass im Betrachtungszeitraum bis 2030 weitere Krisen mit entsprechendem Wachstumseinbruch des Automobilmarkts nicht ausgeschlossen werden können. Daher wurde im hier betrachteten Referenzszenario von einer jährlichen Wachstumsrate bis 2030 in Höhe von 2,7 % ausgegangen. Insgesamt wird auf Basis der Metastudie eine weltweite Steigerung der PKW-Verkäufe von 2013 mit ca. 73,8 Millionen auf ca. 89 Millionen in 2020 und 116,2 Millionen in 2030 erwartet.

Parallel zur Wachstumsphase des Automobilmarkts werden wei-

terhin hohe zweistellige Wachstumsraten für Carsharing erwartet. Frost & Sullivan prognostiziert bis 2020 ein weiteres Wachstum der globalen Mitgliederzahlen im Carsharing in Höhe von 34,5 % [Frost & Sullivan (2014)]. Aufgrund des Substitutionspotenzials von Carsharing für den PKW-Absatz könnte die Marktentwicklung im Bereich Carsharing zukünftig erheblichen Einfluss auf den PKW-Markt haben. Die Gründe für eine Substitution privater PKW durch Carsharing-Fahrzeuge liegen vor allem in steigenden Kosten des Fahrzeugbesitzes, Parkplatzknappheit und zunehmender Qualität und Vielfalt der Carsharing-Angebote. London und Frankfurt/Main zählen zu den Städten mit dem größten Substitutionseffekt durch Carsharing. Abbildung 29 zeigt die Substitution konventionell genutzter Fahrzeuge durch stationäre Carsharing-Systeme in Europa im Jahr 2011.

Stadt	Ersetzte Privat-PKW pro Carsharing-Fahrzeug	Summe aller ersetzten Privat-PKW
Frankfurt/Main	10–14	25.000
Bremen	13	2.200
London	10	33.000
Paris	10–14	3.500
Brüssel	17	3.400
Flandern	16	2.100
Wallonien	15	690
Dublin	10	100
Cork	16	60
Rom	14	1.500
Mailand	25	2.400
Turin	16	1.900
Zürich	10–14	18.000
Europa	ca. 12–14	287.000

Tabelle 29: Substitution von Privatfahrzeugen durch Carsharing.³⁵

Für Free-Floating-Konzepte, die mittlerweile in Deutschland einen größeren Marktanteil einnehmen als stationäre Carsharing-Konzepte, liegen zwar noch keine aussagekräftigen Auswirkungen zur Substitution vor, allerdings kann auch hierbei ein Substitutionseffekt erwartet werden [Firnborn (2011)]. Im Rahmen eines Marktmodells wurden sechs Szenarien definiert, basierend auf zwei Dimensionen. Die erste Dimension ist der globale PKW-Absatz, die zweite Dimension ist die Entwicklung des globalen Carsharing-Markts. Für die erste Dimension wurden drei Ausprägungen bestimmt:

- 1) Die Ausprägung „Weltwirtschaftswunder“ mit einer jährlichen Wachstumsrate von 5 %.
- 2) Die Ausprägung „Referenz“ mit einer jährlichen Wachstumsrate von 2,7 %.
- 3) Die Ausprägung „Depression“ mit einer Wachstumsrate von 1 %.

Bezüglich des Carsharing-Markts wurde im Business-as-Usual-Szenario von einer jährlichen Wachstumsrate in Höhe von 20 %, im Sharing-Szenario von einer jährlichen Wachstumsrate von 35 % ausgegangen. Zudem wurde in den Sharing-Szenarien ein moderater Substitutionseffekt von 6 Privatfahrzeugen durch ein Carsharing-Fahrzeug angenommen. Abbildung 30 zeigt die Entwicklung der Stückzahlen in jedem der sechs Szenarien.

Für die Wertschöpfungsberechnungen in den folgenden Kapiteln wurde das Referenzszenario zugrunde gelegt. Dabei wurde keine Substitution des PKW-Absatzes durch Carsharing-Fahrzeuge unterstellt.

Der globale Fahrzeugbestand wird laut einer Prognose von derzeit ca. 1,05 Milliarden bis zum Jahr 2030 auf ca. 1,32 Milliarden anwachsen [Frost & Sullivan (2014a)].

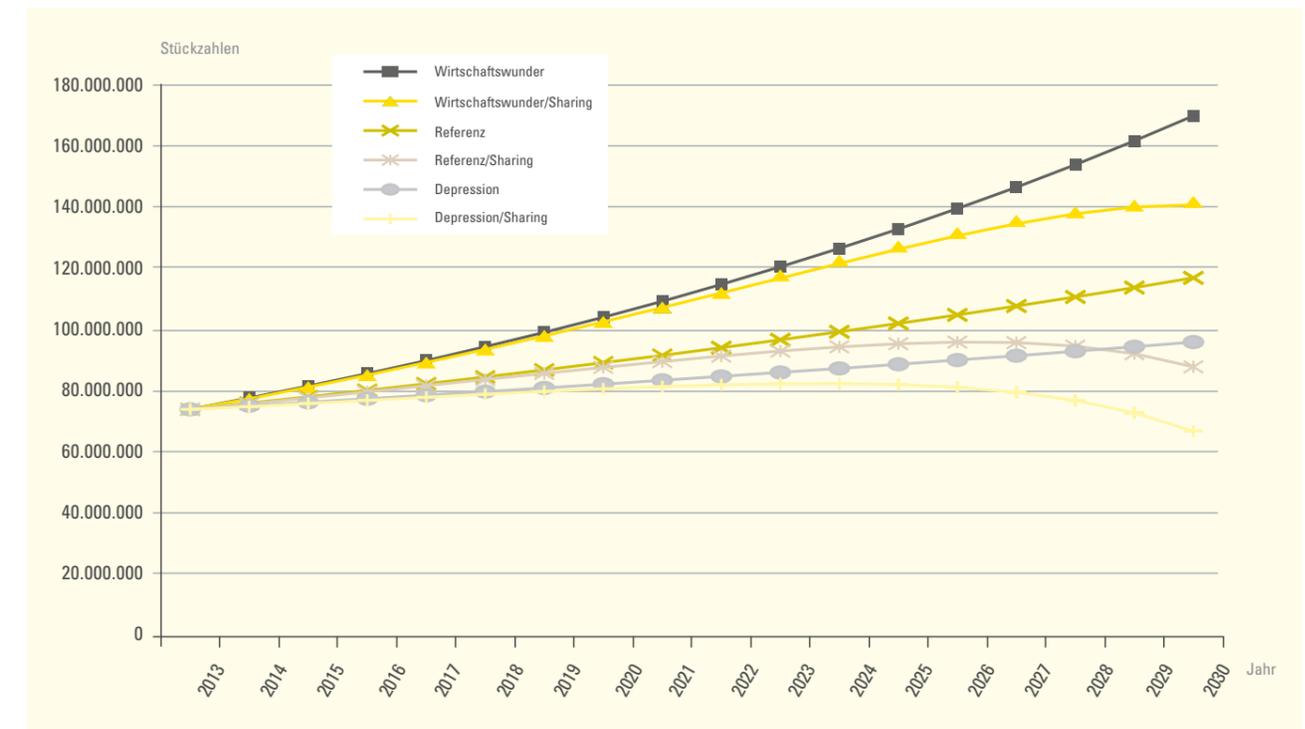


Abbildung 30: Entwicklung der Stückzahlen auf dem globalen Automobilmarkt.³⁶

³⁴ Die Berechnung erfolgte auf Basis des jeweils günstigsten konventionellen und günstigsten elektrischen Antriebs für jedes Fahrprofil. Die TCO inkludieren die Infrastrukturkosten und eine angenommene Mehrpreisbereitschaft. Folgende Annahmen liegen den Berechnungen zugrunde: Haltedauer von privaten Nutzern: 6,2 Jahre; Haltedauer von gewerblichen Nutzern (Flotte und Dienstwagen): 3,8 Jahre; Parameterwerte für Bestandsmodellierung: $t = 14,1$ Jahre; Segmente: klein (Minis, Kleinwagen), mittel (Kompaktklasse, Mittelklasse), groß (Oberklasse, Geländewagen); Benzinpreis 2020: 165 ct/l; Dieselpreis 2020: 158 ct/l; Strompreis 2020: Haushalte: 29 ct/kWh, Handel/Gewerbe: 21,5 ct/kWh, Industrie: 14,7 ct/kWh; 55 % der gewerblichen Nutzer haben keine Mehrpreisbereitschaft; Anzahl Neuzulassungen pro Jahr: 3,1 Millionen [PIötz (2013)].

³⁵ Frost & Sullivan (2012).

³⁶ Eigene Darstellung.

Kapitel 3

3.3.2 MARKTENTWICKLUNG ALTERNATIVER ANTRIEBE GLOBAL

Um die Marktentwicklung abzuschätzen, wurden zunächst die angekündigten Produktionsstarts der nächsten Jahre betrachtet (vgl. Abbildung 31). Es zeigt sich einerseits, dass in den Jahren 2014 bis 2016 pro Jahr mehr Produktionsstarts angekündigt sind als in den Jahren 2010 bis 2012 zusammengekommen, zum anderen zeigt sich die wichtige Rolle von Plug-in-Hybriden in den nächsten Jahren.

Zudem wurde eine Metastudie durchgeführt, in der die Ergebnisse vorhandener Studien analysiert und aggregiert wurden. Diese Studien gehen nicht vom Fahrzeugbestand, sondern von Absätzen pro Jahr aus. Die Nutzung einer Metastudie hat den Vorteil, dass sich etwaige Fehleinschätzungen in den untersuchten Studien ausgleichen können. Außerdem kann der Datenbestand um Extremszenarien bereinigt werden.

Gegenüber 2011 hat sich die kurzfristige Euphorie hinsichtlich der Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen reduziert. Insbesondere

hat sich die Einschätzung der Zukunftsfähigkeit von Fahrzeugen mit Reichweitenverlängerung eingetrübt. Überschätzt wurden dabei vor allem die optimistischen Aussagen bezüglich der Marktrelevanz von Elektrofahrzeugen in China.

Im Jahr 2020 werden auf Basis der Metastudie 5,5 Millionen Plug-in-Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung und 5,3 Millionen batterieelektrische Fahrzeuge erwartet. Bis zum Jahr 2030 steigt die Anzahl an Elektro- und Hybridfahrzeugen auf 51,8 Millionen. Gegenüber 2011 werden nun für das Jahr 2020 ca. 12 % und nicht mehr ca. 33 % Elektro- und Hybridfahrzeuge angenommen. Allerdings wird im Gegensatz zur vorherigen Strukturstudie aus dem Jahr 2011 dem Konzept des elektrifizierten konventionellen Verbrennungsfahrzeugs („optimiertes Verbrennungsfahrzeug“) eine eigene Antriebsklasse zugewiesen, die bis zum Jahr 2030 maßgebliche Weltmarktanteile erreicht. Ausgehend von einem Referenzwert des optimierten Verbrennungsfahrzeugs von ca. 10 Millionen Einheiten im Jahr 2013 [Lux (2012)]³⁸ erhöht sich der Absatz dieses Fahrzeugkonzepts bis zum Jahr 2025 auf insgesamt über 27 Millionen Einheiten. Einige Studien verweisen

sogar auf eine deutlich höhere Marktdurchdringung dieses Fahrzeugkonzepts in den kommenden Jahren [Lux (2012)].³⁹ Aufgrund der Annahme, dass dieses Fahrzeugkonzept mit weiteren Effizienztechnologien ausgestattet ist (Downsizing, Turboaufladung, Elektrifizierung von Nebenaggregaten etc.), wird im Rahmen der Szenario-Analyse ein leicht reduzierter Markthochlauf definiert.

Abbildung 32 zeigt den Marktanteil der verschiedenen Antriebssysteme am globalen Absatz im Zeitablauf.

Zwar sind die Batteriepreise in den letzten Jahren erheblich gefallen (vgl. Abbildung 34 in Kapitel 3.4.2), jedoch besteht nach wie vor eine Total-Cost-of-Ownership-Lücke zwischen Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen. Zudem erreichen optimierte Verbrennungsfahrzeuge sehr niedrige Verbrauchswerte zu günstigeren Kosten als ursprünglich erwartet. Obwohl in den letzten Jahren deutliche Effizienzverbesserungen erreicht wurden, sind die Fahrzeuge nicht teurer geworden [VCD (2012); TNO (2011)]. Daher kann die Automobilindustrie die Regulierungsziele bis 2020 auch mit einer geringen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen erreichen.

Zwar gibt es in derzeitigen Studien kaum Aussagen zu Antriebsverteilungen nach 2020, allerdings ist zu erwarten, dass die CO₂-Regulierung nach 2020 global deutlich verschärft wird und dies zu einer sehr starken Elektrifizierung der Fahrzeuge führen wird. In den europäischen Planungen wird eine Emissionsreduktion von 80 bis 95 % bis 2050 zum Ziel gesetzt. Der Verkehrssektor soll dabei eine Reduktion von 60 % gegenüber 1990 erreichen [European Commission (2012)]. In den USA wurde das Ziel definiert, die Treibhausgase bis zum Jahr 2050 um 80 % gegenüber 2005 zu reduzieren. Während zwischen 2005 und 2020 eine durchschnittliche jährliche Reduktion von 1,2 % angenommen wird, sollen die Emissionen zwischen 2020 und 2025 um 2,8 % jährlich fallen [White House (2014)].

Zum Ziel der Treibhausgasemissionsreduktion kommen die nationalen Rohstoffstrategien hinzu, die unter anderem eine Reduktion der Abhängigkeit von Ölimporten anstreben. Während dieses Ziel in den USA durch Fracking im eigenen Land erreicht wird, besteht in Japan und China ein sehr starker Anreiz, die Elektromobilität zu fördern [VDI/VDE (2014); Kurz et al (2014)].

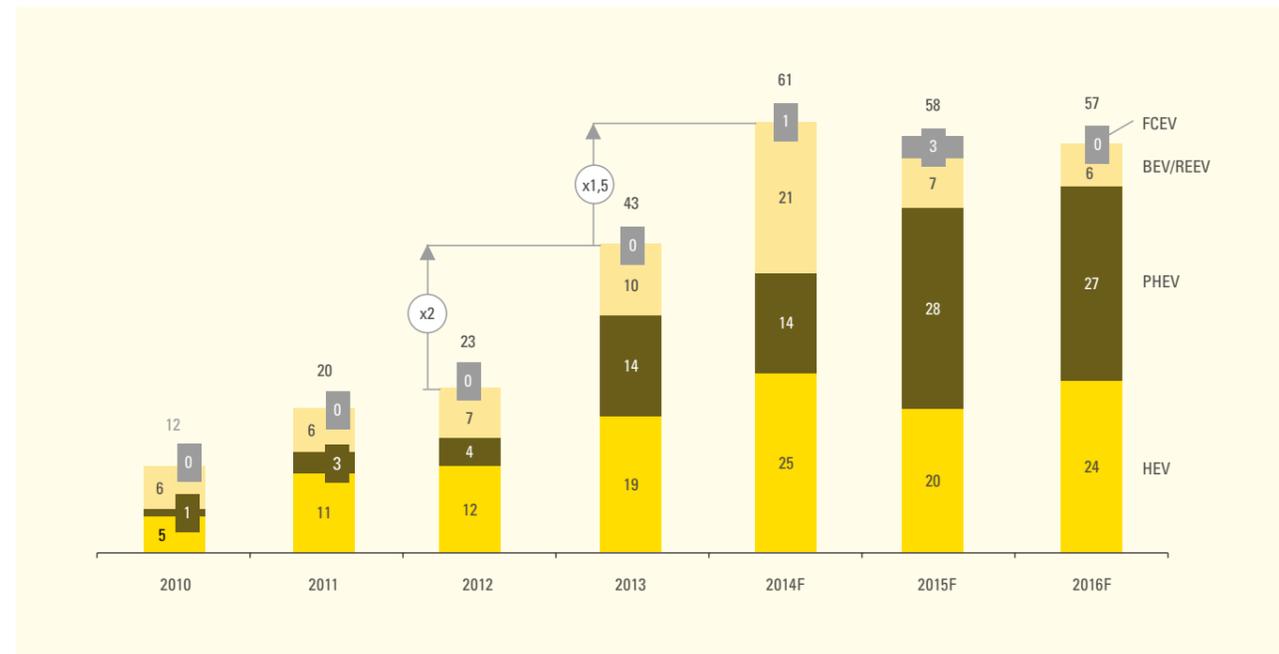


Abbildung 31: Produktionsstarts von Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen.³⁷

³⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an McKinsey (2014).

³⁸ Die hier ausgewiesene Zahl bezieht sich auf die Summe verschiedener Micro-Hybrid-Fahrzeugkonzepte. Dabei wird zwischen verschiedenen Elektrifizierungsgraden unterschieden. Vgl. Lux (2012).

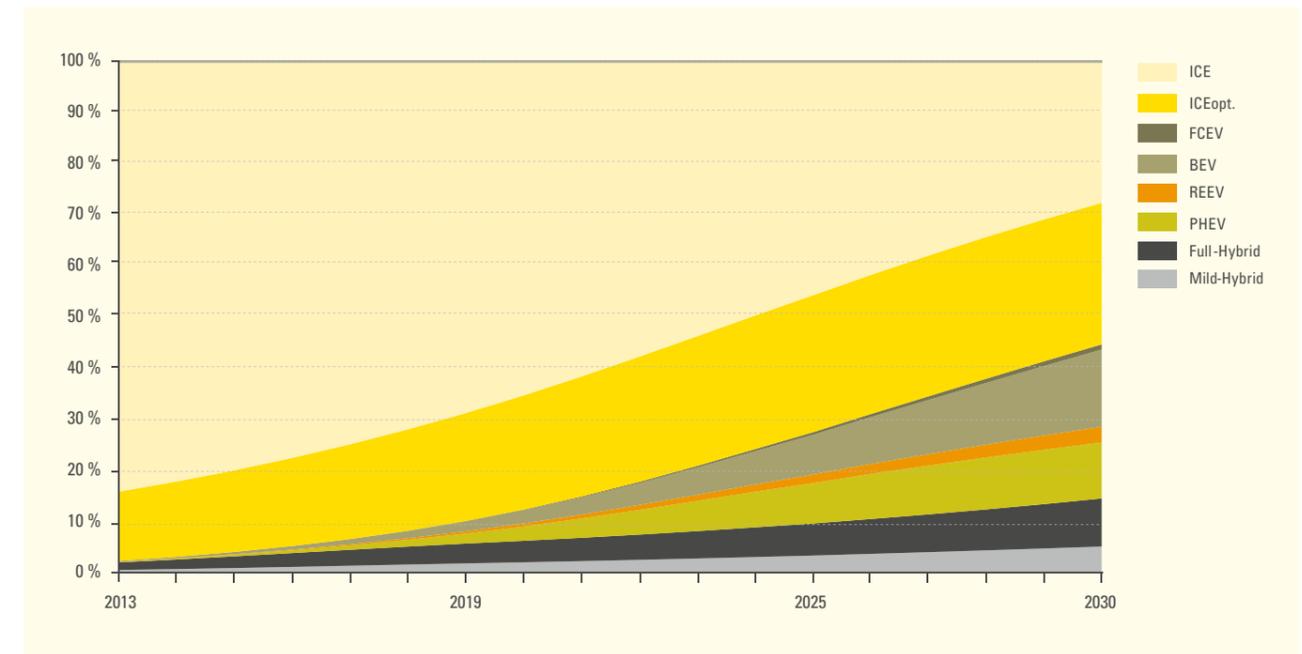


Abbildung 32: Marktentwicklung der verschiedenen Antriebssysteme.⁴⁰

³⁹ Lux (2012).

⁴⁰ Eigene Darstellung.

Kapitel 3

3.3.3 MARKTENTWICKLUNG ALTERNATIVER ANTRIEBE IN DEUTSCHLAND

Das im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität 2009 definierte politische Ziel, bis zum Jahr 2020 einen Fahrzeugbestand von 1 Million Elektrofahrzeugen (inklusive batterieelektrischer Fahrzeuge, Plug-in-Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung) auf deutsche Straßen zu bringen, gilt auch weiterhin [NPE (2014a)]. Auch für die Zeit nach 2020 hat die Bundesregierung Ziele für die Verbreitung von Elektromobilität in Deutschland definiert: bis zum Jahr 2030 sollen 6 Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren. Dies ist Teil der übergeordneten Klimaschutzstrategie für Deutschland, die bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 1990 vorsieht [Bundesregierung (2010)].

Abbildung 33 zeigt verschiedene Hochlaufsznarien des Bestands an Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2020.

Die Szenarien zeigen, dass das Ziel der Bundesregierung und der NPE von 1 Million Elektrofahrzeugen bis 2020 unter günstigen Rahmenbedingungen auch ohne Förderung erreicht werden kann. Selbst unter ungünstigen Rahmenbedingungen kann ein „Sockel“-Markthochlauf von 150.000 bis 200.000 Fahrzeugen erzielt werden.

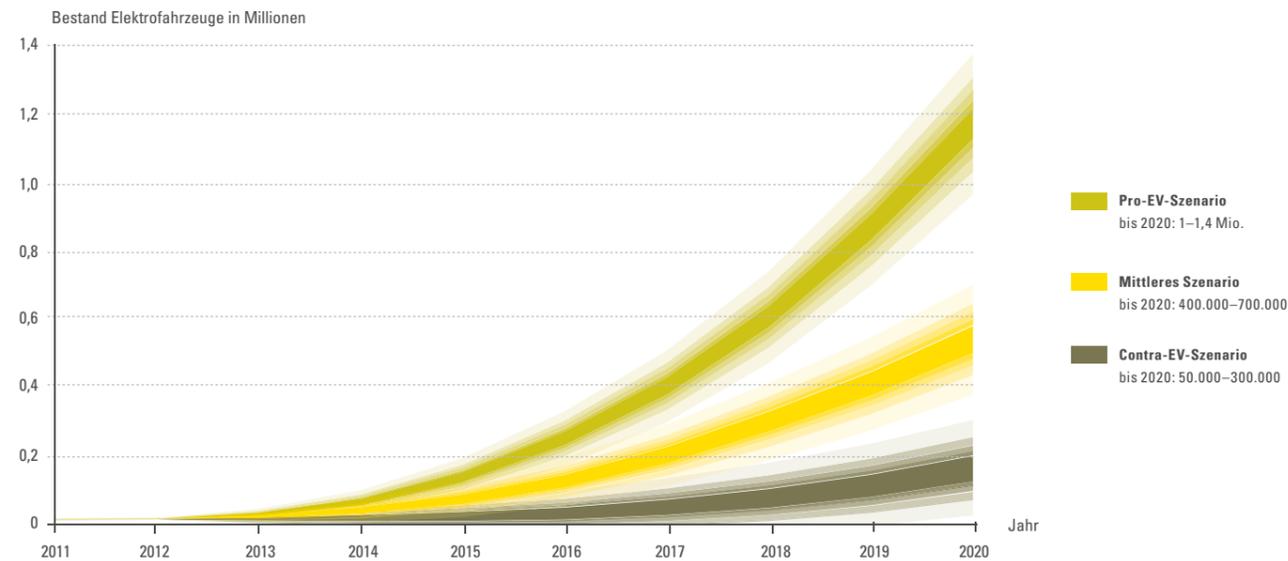


Abbildung 33: Markthochlauf von Elektrofahrzeugen in Deutschland.⁴¹

⁴¹ Eigene Darstellung auf Basis von NPE (2013a).

3.4 VERÄNDERUNGEN DER WERTSCHÖPFUNGSARCHITEKTUR

Die wertschöpfungsseitigen Veränderungen durch die Elektromobilität sind von vielfältigem Charakter und reichen von der Entwicklung und Herstellung neuer Antriebsstrangkomponenten und -systeme über die Auslegung innovativer Fertigungs- und Montageprozesse inklusive derer Anlagentechnik bis zu Themen im Bereich des Ladeinfrastrukturaufbaus, des Service und des Aftersales.

Im Fokus der vorliegenden Analyse stehen die durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedingten „fahrzeugseitigen“ Wertschöpfungsveränderungen. Weitere aktuelle Entwicklungen wie beispielsweise die zunehmende Vernetzung zwischen Fahrzeugen (Car2Car) sowie dem Umfeld (Car2X), der Aufbau erforderlicher Energieinfrastruktur sowie der Energiebereitstellung und -nutzung und der Themenkomplex des Leichtbaus und damit verbundene Veränderungen in Bezug auf zukünftige Fahrzeugkonzepte und -designs werden, bedingt durch deren umfassenden Charakter, nicht weiter untersucht. Es sei an dieser Stelle auf bestehende Studien wie beispielsweise die „Systemanalyse BMW mobil 2013“, „Leichtbau in Mobilität und Fertigung“ oder „Entwicklung der Beschäftigung im After Sales“ verwiesen.

3.4.1 REFERENZMODELL UND ANNAHMEN DER WERTSCHÖPFUNGSBESTIMMUNG

Um den Einfluss des Technologiewandels zur Elektromobilität auf die Wertschöpfung zu quantifizieren und letztlich die Auswirkungen auf die Beschäftigungsstruktur analysieren zu können, wurde im Rahmen dieser Studie ein umfassendes Referenzmodell entwickelt. Dieses bildet die Antriebslandschaft ausgehend von den klassischen verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen über verschiedene Hybridkonzepte bis hin zum batterieelektrischen Fahrzeug sowie dem Brennstoffzellenfahrzeug ab. Hierbei wurden bis zum heutigen Zeitpunkt bekannte Fahrzeuge zur Referenzbildung herangezogen sowie zukünftige Entwicklungen der Systeme berücksichtigt.⁴² Darüber hinaus wurden verschiedene Aspekte hinsichtlich der Marktentwicklung, wie beispielsweise die Entwicklung des globalen PKW-Markts oder die Verteilung verschiedener Antriebsarten über den Zeitverlauf, durch die Bildung verschiedener Marktszenarien modelliert (vgl. Kapitel 3.2). Für die Bestimmung resultierender Wertschöpfungseffekte wurde ein Zeitraum zwischen heute und dem Jahr 2030 gewählt. Darüber hinaus wurden, neben technologischen Fortschritten in der Entwicklung, auch Skalen und Lernkurveneffekte, welche durch eine Steigerung der Produktionsvolumina elektrifizierter Fahrzeuge zustande kommen, berücksichtigt.

EXKURS: METHODISCHE HERANGEHENSWEISE UM PROZESS-DIMENSION ERWEITERT

Im Vergleich zur Strukturstudie von 2011 wurde die klassisch komponentenbasierte Wertschöpfungsbewertung um eine prozessuale Dimension erweitert. Bezogen auf die im jeweiligen Fahrzeugkonzept verbauten Komponenten wurden die Prozesse der Leistungserstellung näher untersucht und in handhabbare Prozesseinheiten gegliedert. Hierdurch ist es möglich, wertschöpfungsbezogene Aussagen zu Schlüsselprozessen in der Herstellung elektrofahrzeugspezifischer Komponenten zu generieren sowie dem damit verbundenen Wertschöpfungssegment des Maschinen- und Anlagenbaus Rechnung zu tragen. Die Abschätzungen der Marktpreise sowie potenzieller Kostenreduktionen einzelner Komponenten und damit verbundener Herstellprozesse basiert auf einer Metaanalyse veröffentlichter Studien. Die Ergebnisse wurden durch Experteninterviews validiert und für den Zeitraum zwischen der letzten Veröffentlichung (2011) und dem heutigen Zeitpunkt (2014/2015) aktualisiert.

⁴² Vgl. hierzu auch Spath et al. (2012).

⁴³ Dabei wird darauf verwiesen, dass sich je nach Quelle die Annahmen beispielsweise hinsichtlich der Betrachtungsebene (Zelle oder System), der Zellgeometrie (prismatisch, Pouch, rund), des Zelltyps (Hochvolt- oder Hochenergie-Zellen) oder bei der Zusammensetzung der eigentlichen Zellchemie unterscheiden und somit eine Vergleichbarkeit zwischen den Angaben erschwert wird.

⁴⁴ Vgl. u.a.: Argonne National Laboratory (2013); IEA (2013); Navigant Research (2014); Fraunhofer IAO (eigene Berechnungen).

3.4.2 KOSTENTREIBER UND -ENTWICKLUNGEN IN DER HERSTELLUNG VON ANTRIEBSKOMPONENTEN

Als wesentliche Kostenfaktoren elektrifizierter Fahrzeuge aus Komponentensicht lassen sich die elektrische Maschine, die Leistungselektronik sowie das Batteriesystem identifizieren. Gegenüber dem vergangenen Bearbeitungszeitraum der Strukturstudie konnten bei diesen Komponenten bereits deutliche Kostenreduktionen beobachtet werden. Lagen die Herstellkosten beim Lithium-Ionen-Batteriesystem auf Systemebene im Jahr 2010 noch zwischen 600 und 900 Euro/kWh (abhängig vom Zelltyp), so werden derzeit (2014) bereits Herstellkosten zwischen 200 und 450 Euro/kWh ausgewiesen.⁴³ Nachfolgende Abbildungen 34 und 35 verdeutlichen die bereits eingetretene sowie weiter zu erwartende Entwicklung der Herstellkosten von Lithium-Ionen-Batterien für automobiler Anwendungen im Zeitverlauf.

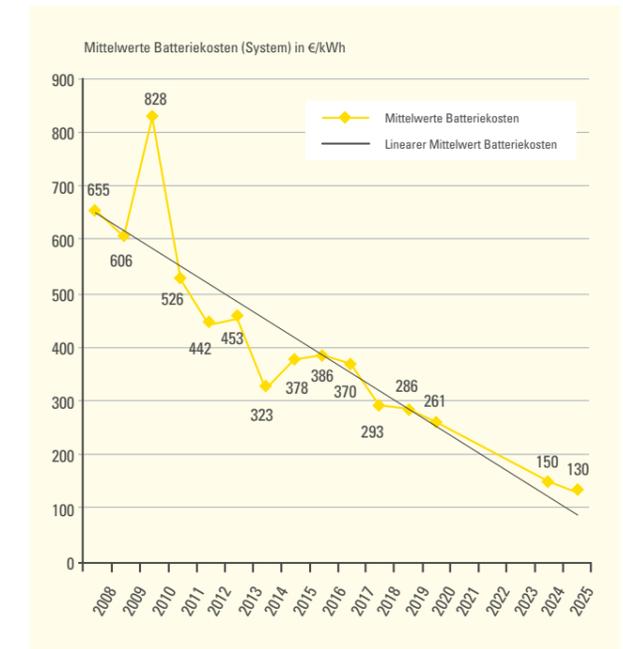


Abbildung 34: Kostenverlauf beim Li-Ionen-Batteriesystem.⁴⁴

Kapitel 3

Basierend auf dem heutigen Stand wird von Experten weiteres Potenzial zur Senkung der Herstellkosten des Lithium-Ionen-Batteriesystems gesehen. Ein realistisches Kostenziel für das Jahr 2020 liegt hier bei rund 250 Euro auf Gesamtsystemebene im Industrieschnitt [VDMA (2014)].⁴⁵ Die Nationale Plattform Elektromobilität weist für das Jahr 2025 Zielkosten von weniger als 200 Euro/kWh aus [NPE (2014a)].⁴⁶

Im Rahmen der „Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030“ des VDMA in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Elektromobilitätsproduktion der RWTH Aachen sowie dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI wurden insgesamt 15 Handlungsfelder (sogenannte Red Brick Walls) innerhalb der Batterieherstellung identifiziert, bei denen zukünftig weitere Technologiedurchbrüche hin zu einer wirtschaftlichen und wettbewerbsfähigen Herstellung erforderlich sind. Hierbei wurden aktuelle

Herausforderungen sowie Grundlagen beschrieben und darauf aufbauend Lösungsansätze formuliert. Die Handlungsbedarfe erstrecken sich über nahezu sämtliche Prozesse der Zellfertigung. Als Beispiele können erforderliche Prozessoptimierungen beim Mischvorgang der Zellmaterialien, beim Beschichten der Folien, beim Stapeln der Folien bzw. der Zellkomponenten und bei der Zellassemblierung (Tiefziehen der Aluminiumverpackungsfolie oder Versiegeln der Zellen) genannt werden. Darüber hinaus werden Lösungsbedarfe im Bereich der Packmontage (Gehäuseherstellung und Werkstoff), dem Recycling von Batterien sowie bei der Entwicklung erforderlicher Standards innerhalb der gesamten Wertkette beschrieben [VDMA (2014)].

Neben dem elektrochemischen Energiespeicher stellt die Antriebseinheit der elektrischen Maschine einen weiteren Kostentreiber elektrifizierter Fahrzeuge dar. Dabei werden derzeit nahezu

ausschließlich die Ausführungsformen der Asynchronmaschine sowie die der fremd- und permanenterregten Synchronmaschine in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt (vgl. Kapitel 2). Die hierbei am häufigsten verwendete Variante bis dato stellt die permanenterregte Synchronmaschine dar [Kampker (2014); Hofmann (2014)].⁴⁷ Die Herstellkosten für die Einheiten variieren je nach Motorausführung und Stückzahlenszenario sehr stark. Ein Kostenvergleich des Lehrstuhls für Produktionsmanagement des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen verdeutlicht die Herstellkostensituation von elektrischen Maschinen am Beispiel der Nennleistungsklasse 30 kW.⁴⁸ Liegen die Herstellkosten bei einer Prototypenherstellung der Einheiten noch deutlich außerhalb des von der Industrie geforderten Kostenbands, so können durch eine Steigerung der Produktionsmenge Herstellkosten zwischen 15 und 25 Euro/kW angestrebt werden. Dabei kann der Anteil der Materialkosten an den gesamten Produktionskosten, je nach Ausführungsform und Stückzahlenszenario, 15 % (Prototypenherstellung) bis 69 % (Massenfertigung) ausmachen [Kampker (2014)]. Neben zahlreichen Optimierungspotenzialen bei einzelnen Prozessschritten stellen skalierbare und modulare Fertigungs- und Montageeinrichtungen einen vielversprechenden Ansatz zur Erlangung einer wirtschaftlichen Herstellung unter dem Aspekt zunehmender Stückzahlen in den kommenden Jahren dar [Butov et al. (2014)].

Die Leistungselektronik umfasst je nach Definition und Antriebskonzept das eigentliche Leistungsteil, einen Gleichstromsteller, benötigte passive Komponenten (Spulen, Kondensatoren etc.), die Motorkontrolleinheit sowie weitere Komponenten wie das Gehäuse inklusive Temperierungskonzept [Kampker (2014)]. Weiterhin können ein Niedervolt-Gleichstromsteller (Bordnetz) sowie das Onboard-Ladegerät im weitesten Sinne der Leistungselektronik zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2). Aus Herstellsicht entfallen rund 30 % der Gesamtkosten auf das Leistungsteil. Für das Jahr 2015 werden für diese Komponente Zielkosten von rund 5 Dollar/kW angegeben. Die Kostensenkungspotenziale durch eine Steigerung der Produktionsmengen werden hierbei auf rund 30 % geschätzt [Kampker (2014); VDE (2010)].

Analog zur Komponente des Leistungsteils werden auch für das Ladegerät die Herstellkosten in Abhängigkeit der Ladeleistung angegeben. Der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informati-

onstechnik e.V. gibt für das Ladegerät Zielkosten von 50 Dollar/kW für das Jahr 2015 sowie 25 Dollar/kW für das Jahr 2020 an [VDE (2010)]. Aufgrund von Verbesserungen in der Batterie- und Ladetechnologie sowie durch den Ausbau einer Schnellladeinfrastruktur ist in den kommenden Jahren mit einer Erhöhung der Ladeleistungen insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen zu rechnen [A.T. Kearney/TU Wien (2012)].⁴⁹

Neben den bereits diskutierten Komponenten stellt das Brennstoffzellensystem einen weiteren interessanten Betrachtungsgegenstand im Kontext einer zunehmenden Elektrifizierung dar. Bedingt durch dessen Komplexität hinsichtlich Funktion, Aufbau und Produzierbarkeit sowie durch die eingesetzten Rohstoffe und Materialien gehen mit dem System ein hoher Herstellungsaufwand und damit ein großer Wertschöpfungsumfang einher [Spath et al. (2012)]. Die Herstellkosten bei bekannten Kleinserien liegen auf einem sehr hohen Niveau. Eine Studie von Roland Berger Strategy Consultants verweist hierbei auf deutliche Kostensenkungspotenziale um bis zu 80 % bei Aufnahme einer Großproduktion. Unter Annahme einer Produktionsmenge von 300.000 Einheiten (90 kW Systemleistung) pro Jahr könnte laut der Studie ein Herstellkostenniveau von rund 9.000 Euro/Einheit (100 Euro/kW) erzielt werden [Bernhart et al. (2013)].⁵⁰ Das von Toyota im November 2014 vorgestellte Brennstoffzellenfahrzeug „Mirai“ kann als erstes (Groß-) Serienfahrzeug seiner Art gesehen werden. Der deutsche Verkaufspreis liegt laut einer Recherche der Wirtschaftswoche bei 78.540 Euro bei einem geplanten Verkaufsstart im September 2015. Die Markteinführung einiger weiterer Modelle anderer Hersteller wird in den kommenden Jahren erwartet. Eine große Herausforderung stellt dabei insbesondere der Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur dar [WiWo (2014)].

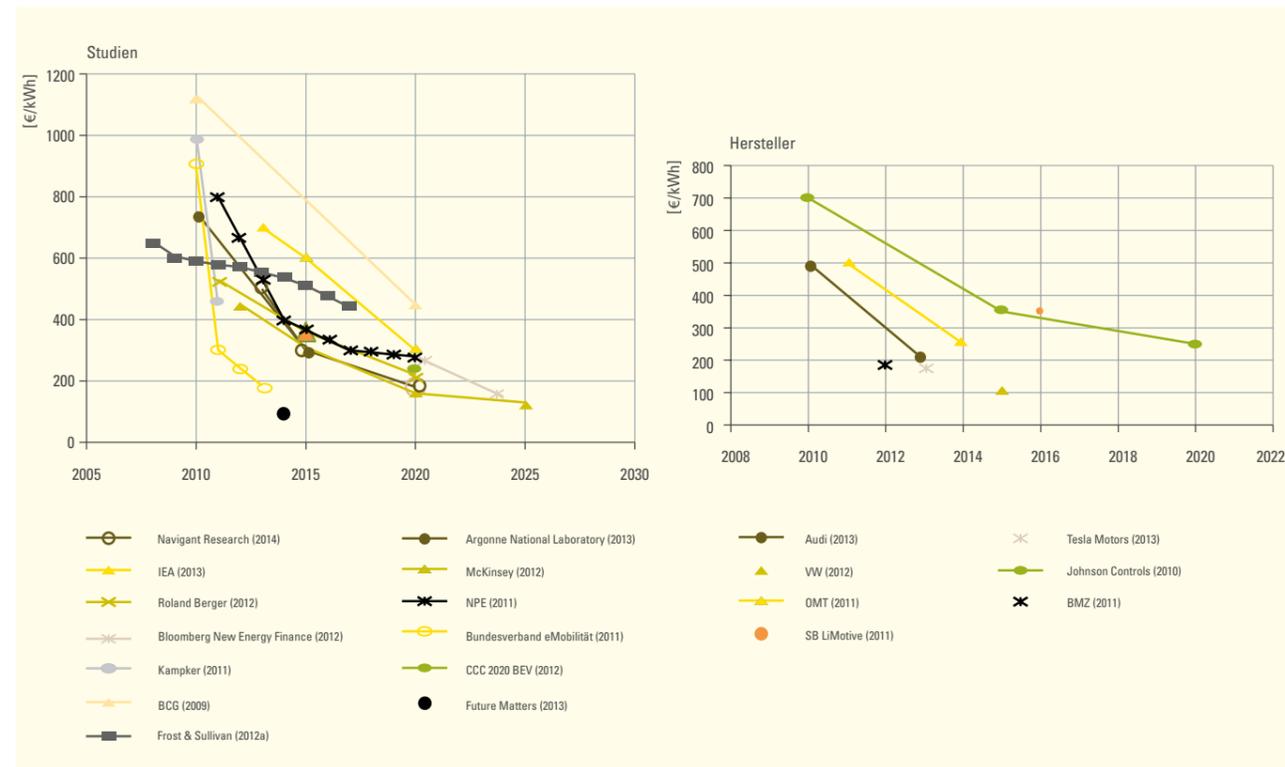


Abbildung 35: Übersicht zu Kostenverläufen beim Li-Ionen-Batteriesystem.

⁴⁵ Einige Marktakteure weisen bereits heute deutlich niedrigere Herstellkosten für Traktionsbatterien aus (vgl. u.a. VW (2012) oder Tesla Motors (2013)). Hierbei gilt es allerdings zu beachten, dass die punktuellen Aussagen oftmals nicht zwischen Zell- und Systemebene unterscheiden. Des Weiteren ist die wirtschaftliche Grundlage für die Akteure innerhalb der Wertkette auf Basis dieser niedrigen Kostenannahmen (Einkaufspreis des Abnehmers liegt in manchen Fällen unter den Herstellkosten/Deckungsbeiträgen des Herstellers) fraglich.

⁴⁶ Neben dem Einsatz des bekannten Lithium-Ionen-Systems wird zu diesem Zeitraum auch der Einsatz von Lithium-Schwefel-Systemen diskutiert [NPE (2014a)].

⁴⁷ Die in der permanenterregten Synchronmaschine verwendeten Magnete besitzen einen hohen Anteil des Rohstoffs Neodym. Wallentowitz verweist hierbei auf die Rohstoffproblematik im Falle einer deutlich ansteigenden Elektromotorenproduktion dieser Einheiten und stellt somit deren zukünftige Dominanz gegenüber den Asynchronmaschinen infrage [Wallentowitz et al. (2010)].

⁴⁸ Die hier untersuchten Einheiten eignen sich für den Einsatz in vollelektrifizierten Kleinwagen. Das angestrebte Kostenziel liegt hier bei 570 Euro pro Motor [Schuh et al. (2013)].

⁴⁹ Derzeitige Hybrid- und batterieelektrische Fahrzeuge unterscheiden sich vielfach hinsichtlich der eingesetzten Ladetechnik. Während bei Hybridkonzepten in der Regel die Ladeleistung bei klassischen 3,3 kW liegt, besitzen batterieelektrische Fahrzeuge teilweise eine Option zur Schnellladung. Hierbei werden Ladeleistungen von bis zu 50 kW oder mehr erzielt, was wiederum deutlichen Einfluss auf die Kosten der Ladeeinheit hat.

⁵⁰ Untersuchungsgegenstand der Studie sind Brennstoffzellensysteme, welche erst ab dem Jahr 2015 auf dem Markt angeboten werden können (next-generation fuel cell systems). Für eine breite Marktdurchdringung muss neben der Reduzierung der Herstellkosten auch die erforderliche Ladeinfrastruktur weiter ausgebaut werden.

Kapitel 3

3.4.3 KOSTENSTRUKTUREN/-ENTWICKLUNGEN VERSCHIEDENER ANTRIEBSKONZEPTE

Summiert man die einzelnen Kostenblöcke der verschiedenen Fahrzeuge zu ausgewählten Referenzzeitpunkten, so kann, wie in Abbildung 36 dargestellt, ein monetärer Vergleich zwischen den Konzepten vorgenommen werden.⁵¹ In der Abbildung sind exemplarisch die unterschiedlichen Preisentwicklungen von einem konventionellen verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug (ICE) hin zu einem optimierten verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug (ICEopt.), einem Plug-in-Hybridfahrzeug (PHEV) sowie einem batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) abgebildet. Die gewählten Betrachtungszeitpunkte sind das Jahr 2015 sowie das Jahr 2025.

Dem konventionellen sowie dem optimierten Verbrennerfahrzeug wurde eine Systemleistung von 100 kW zugewiesen. Während das konventionelle Konzept nur einen geringfügigen Einsatz von Effizienztechnologien (Downsizing Stufe 1) vorsieht, wird dem optimierten Fahrzeug eine deutliche Steigerung im Einsatz dieser Techniken unterstellt. Diese reichen von den Techniken des Downsizings höherer Stufe über eine optimierte Aufladung, Start-Stopp-Funktionalität bis hin zur Reduzierung von Reibungsverlusten bei mechanischen Antriebskomponenten. Die konventionellen Komponenten des Anlassers und der Lichtmaschine werden durch einen integrierten Starter-Generator ersetzt. In Kombination mit einer größer dimensionierten „Starterbatterie“ besitzt das Fahrzeug die Möglichkeit, Bremsenergie zurückzugewinnen und in den Energiespeicher zu speisen (vgl. hierzu auch Kapitel 2). Darüber hinaus sieht das Konzept des optimierten Verbrenners eine Elektrifizierung von ausgewählten Nebenaggregaten vor. Dem im Rahmen der Studie definierten Konzept des optimierten Verbrennerfahrzeugs wurde durch den verstärkten Einsatz dieser Technologien ein maximales CO₂-Einsparpotenzial zwischen 25 und 30 %, allerdings bei deutlichen Mehrkosten, zugewiesen [Ika (2012)].⁵²

Der Plug-in-Hybrid ist mit einem 75 kW Elektromotor sowie einem 80 kW starken Verbrennungsmotor ausgestattet. Die Motorleistung des batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) beträgt 90 kW. Die Größe des Batteriepacks beträgt beim PHEV 7,5 kWh und beim BEV 25 kWh.

Während die elektrifizierten Fahrzeugkonzepte zum heutigen Stand gegenüber dem konventionellen Fahrzeug noch deutlich höhere Herstellkosten aufweisen, so wird unter Berücksichtigung der zu erwartenden Kostenentwicklungen eine Annäherung der Kostenbasis zwischen den skizzierten Konzepten erkennbar.⁵³

Neben den Kostensenkungspotenzialen bei neuen Antriebsstrangkomponenten (Batteriesystem, elektrische Maschine sowie Leistungselektronik inklusive Ladegerät) trägt auch der zu erwartende Kostenmehraufwand bei konventionellen Verbrennerfahrzeugen zur Einhaltung der gesetzten CO₂-Ziele und den geforderten Abgasvorgaben zu dieser Entwicklung bei. Das Hybrid- wie auch das Elektrofahrzeugkonzept hingegen erfordern neben den neuen Antriebsstrangkomponenten die Mehraufwände im Bereich der Klimatisierung der Fahrerkabine und des Thermomanagements. Ein ganzheitliches thermisches Management auf Systemebene wird hierbei für die optimale Temperierung der neuen Antriebsstrangkomponenten benötigt. Darüber hinaus sieht das Konzept des Plug-in-Hybrids eine Kraftstoff- sowie eine Abgasanlage, ähnlich der im konventionellen Verbrennerfahrzeug, vor.

Im Zeitraum der vergangenen fünf Jahre konnte das batterieelektrische Fahrzeug die deutlichsten Kostensenkungen vorweisen (vgl. Abbildung 37). Betrag der Marktpreis des im Rahmen der Studie definierten Referenzfahrzeugs im Jahr 2010 noch 36.600 Euro, so konnte dieser Wert im Jahr 2015 um rund ein Drittel auf 24.300 Euro gesenkt werden. Als größter Stellhebel kann hierbei die Entwicklung der Batteriepreise in den vergangenen Jahren genannt werden. Bis zum Jahr 2025 werden weitere Kostensenkungspotenziale erwartet. Zu diesem Zeitpunkt wird das batterieelektrische Fahrzeug nur noch moderate Mehrkosten gegenüber konventionellen Modellen aufweisen.

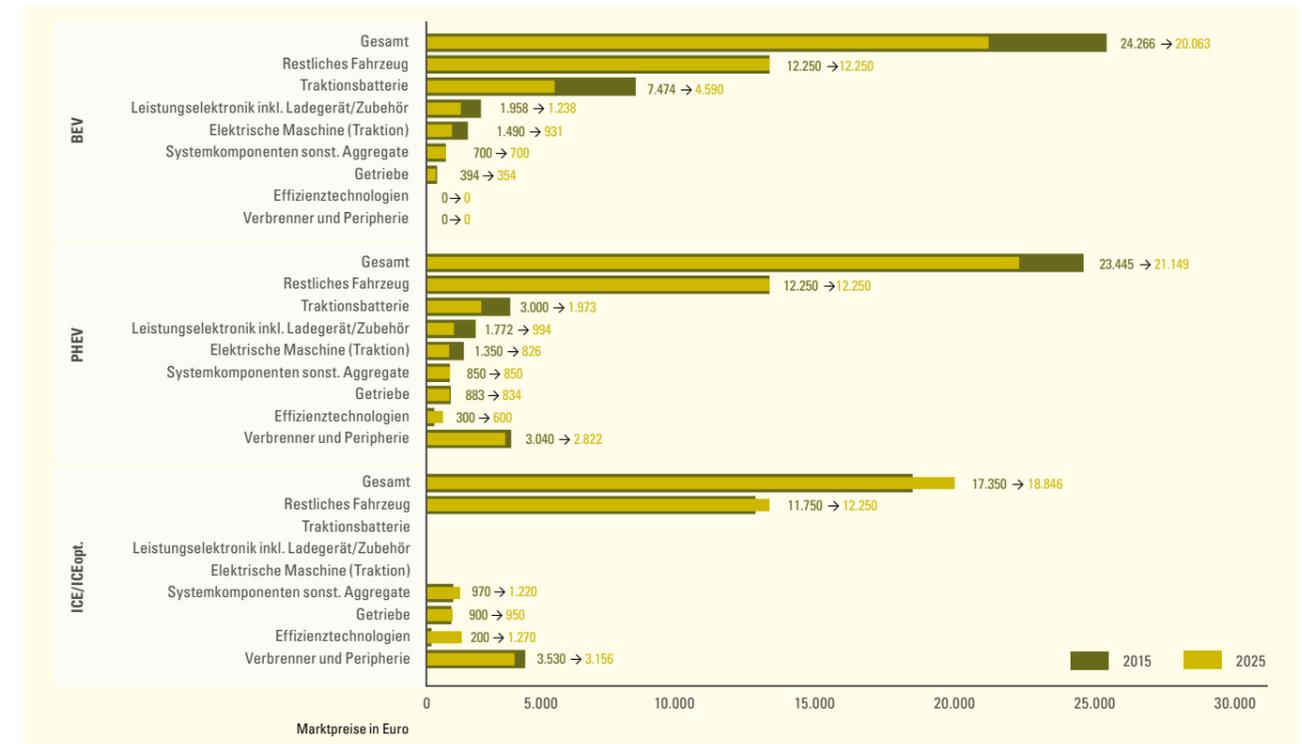


Abbildung 36: Exemplarische Kostenentwicklungen verschiedener Fahrzeugkonzepte bis 2025 (in Euro).⁵⁴



Abbildung 37: Preisentwicklung am batterieelektrischen Fahrzeug von 2010–2025.⁵⁵

⁵¹ Die hier abgebildeten Werte stellen Marktpreise dar (Nettopreise ohne MwSt.).

⁵² Die dem Referenzkonzept des optimierten Verbrenners zugewiesenen Effizienztechnologien stellen eine mögliche idealtypische Ausstattung dar und decken hierdurch nur eine repräsentative Auswahl möglicher Techniken ab.

⁵³ Für weitere Informationen zu Kostenentwicklungen verschiedener Antriebskonzepte vgl. Bauer (2014).

⁵⁴ Im Bereich ICE zeigt die Abbildung die zu erwartende Kostensteigerung durch die Elektrifizierung und Verbrauchsoptimierung des konventionellen Fahrzeugs (entspricht Übergang von ICE zu ICEopt.).

⁵⁵ Im Bereich „Rest“ wurde kein Produktionsfortschritt über den Zeitverlauf berücksichtigt.

Kapitel 3

3.5 ZUKÜNFTIGE AUSWIRKUNGEN AUS SICHT DER WERTSCHÖPFUNG

Die in den vorangegangenen Kapiteln untersuchten Teilaspekte werden im Folgenden für die Bestimmung potenzieller Wertschöpfungsveränderungen herangezogen und miteinander verknüpft. Aufbauend auf den im Referenzmodell definierten Antriebskonzepten stellen die Parameter der Marktszenarien (globale Marktentwicklung, Verteilung der Antriebsarten) sowie die komponenten- bzw. prozessorientierte Kosten- bzw. Marktpreisbewertung über den Zeitverlauf wesentliche Eingangsgrößen der Analyse dar.

Wurde im Rahmen der letzten Veröffentlichung der Strukturstudie ein sehr positives Bild bezüglich der zukünftigen Absatzentwicklung elektrifizierter Fahrzeuge dargestellt, so konnte in den vergangenen Monaten ein deutlich langsamerer Markthochlauf als zuvor angenommen beobachtet werden. Dieser Effekt in Kombination mit der vorliegenden Herstellkostensituation und -entwicklung der Schlüsselkomponenten haben wesentlichen Einfluss auf die nachfolgenden Wertschöpfungsergebnisse.

Für die Bestimmung der Wertschöpfungseffekte wurde das in Kapitel 3.2 beschriebene Referenz-Marktszenario herangezogen. Dieses geht im Zeitraum von 2013 bis 2030 von einem jährlichen Marktwachstum im Automobilssektor von 2,7 % aus. Die Antriebsverteilung setzt sich hierbei im Jahr 2025 aus 72,6 % ICE (inklusive optimierten Verbrennern), 9,6 % HEV, 9,6 % PHEV und REEV sowie 7,7 % BEV und im Jahr 2030 aus 55,5 % ICE (inklusive optimierten Verbrennern), 14,4 % HEV, 14,1 % PHEV und REEV sowie 15 % BEV zusammen.⁵⁶ Die nachfolgend ausgewiesenen Wertschöpfungspotenziale stellen die Differenz zwischen dem globalen Marktvolumen des Referenzjahres 2013 und den Betrachtungszeitpunkten 2025 und 2030 dar.

3.5.1 WERTSCHÖPFUNGSENTWICKLUNGEN BEI KONVENTIONELLEN ANTRIEBEN/KOMPONENTEN

VERBRENNER UND PERIPHERIE

Bei der konventionellen Technologie des Verbrennungsmotors (inklusive Kraftstoffsystem) kann über die kommenden Jahre noch mit einem globalen Marktzuwachs von +13,48 Milliarden

Euro (2025) bzw. +8,66 Milliarden Euro (2030) gegenüber dem Referenzjahr 2013 gerechnet werden (vgl. Abbildung 39). Zurückzuführen ist dieser Zuwachs insbesondere auf den relativ hohen Anteil reiner Verbrennerfahrzeuge sowie den zusätzlichen Einsatz von Verbrennungsmotoren in den zahlreichen Hybridkonzepten in den kommenden Jahren. Bedingt durch den Einsatz von Motoren kleinerer Leistungsklassen in den Hybridfahrzeugen und dem gleichzeitigen Anstieg der Marktanteile elektrifizierter Fahrzeuge wird allerdings zwischen den Jahren 2025 und 2030 mit keiner weiteren Steigerung des Marktwachstums (gegenüber 2025) in diesem Segment gerechnet. Darüber hinaus führt auch der Trend zum weiteren Downsizing der Verbrennungskraftmaschine in den Fahrzeugen zu einer Reduzierung des Wertschöpfungsumfanges bezogen auf den Grundmotor.⁵⁷

Im Zusammenhang mit dem Verbrennungsmotor kann das Abgassystem einen Zuwachs im Marktvolumen generieren. Als Richtwerte für die Ermittlung wurden Mehraufwände von 50 Euro (Benziner) und 210 Euro (Diesel) für eine Einhaltung der Emissionsgrenzen der aktuellen Euro-6-Norm, welche in diesem Jahr (2015) für PKW-Hersteller verbindlich wird, angenommen [Mock (2010)]. Die Notwendigkeit einer Abgasanlage in sämtlichen Hybridkonzepten führt zudem zu einem deutlichen Zuwachs im Marktvolumen. Insgesamt ergibt sich bei dieser Komponente eine positive Veränderung von +14,45 Milliarden Euro im Jahr 2025 sowie +18,49 Milliarden Euro im Jahr 2030 gegenüber dem Referenzzeitpunkt 2013.

GETRIEBE

Getriebe werden weiterhin eine starke Position im globalen Markt einnehmen. Das durch die prognostizierte Marktentwicklung ermittelte Wertschöpfungspotenzial beträgt im Jahr 2025 gegenüber dem Referenzzeitpunkt 2013 der Studie +19,56 Milliarden Euro. Für das Jahr 2030 wird ein weiterer Anstieg auf +25,34 Milliarden Euro gegenüber dem Jahr 2013 erwartet. Gründe liegen hierbei in der Nachfrage nach (effizienzoptimierten) Getrieben für Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor sowie dem Einsatz teils sehr aufwendiger Hybridgetriebe. Insbesondere die Hybridgetriebe nehmen aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen derzeit zwar eine bisher noch untergeordnete Position am Markt ein, stellen in den kommenden Jahren allerdings ein enorm wichtiges Wertschöpfungssegment dar. Getriebe für

batterieelektrische Fahrzeuge hingegen sind deutlich weniger komplex und bieten hierdurch auch ein deutlich geringeres Wertschöpfungspotenzial für die kommenden Jahre.

EFFIZIENZTECHNOLOGIEN UND ELEKTRIFIZIERUNG DER NEBENAGGREGATE

Durch die Bestrebungen, eine erhöhte Kraftstoffeffizienz zu erzielen und den Anforderungen nach schadstoffärmeren Antrieben gerecht zu werden, können Optimierungen im Antriebsstrang mittels sogenannter Effizienztechnologien in den kommenden Jahren einen deutlichen Marktzuwachs generieren. Optimierungspotenzial bei den sogenannten Effizienztechnologien bieten hierbei Ansätze wie Direkteinspritzung und Turboaufladung (Mehrkosten von 150 bis 700 Euro), Motor-Downsizing (Mehrkosten je Stufe von 150 bis 700 Euro), Minimierung der Reibungsverluste bei mechanischen Bauteilen (Mehrkosten von 50 bis 90 Euro) oder variable Ventilsteuerung (Mehrkosten von 150 bis 350 Euro). Zusätzlich können durch moderne Start-Stopp-Systeme (Mehrkosten von 200 bis 600 Euro) oder eine verbesserte Auslegung des Kühlkreislaufs weitere Einsparungen erreicht werden [Mock (2010); ika (2012)]. Weiterhin wurden dem Bereich der Effizienztechnologien die Komponenten zur Unterstützung der Lenkung des Fahrzeugs (elektrische Servopumpe für elektrohydraulische und Komponenten für elektromechanische Lenkung) zugerechnet. Hierbei wird deutlich, dass Nebenaggregate weiter elektrifiziert werden, um bessere Verbrauchswerte bei reinen Verbrennungsfahrzeugen oder Hybriden zu erzielen.⁵⁸ Diese Entwicklungen führen dazu, dass in diesen Bereichen im Jahr 2025 ein Wertschöpfungspotenzial von +30,7 Milliarden Euro und im Jahr 2030 ein Wertschöpfungspotenzial von +43,86 Milliarden Euro gegenüber dem Jahr 2013 besteht.

In der Gruppe der Nebenaggregate wurden die Komponenten Ölpumpe, Lichtmaschine und Anlasser sowie erforderliche Komponenten für die Klimatisierung von Fahrgastzelle und Antriebsstrang berücksichtigt. Hierunter fallen unter anderem zusätzliche Zuheizsysteme, Pumpen, Ventile oder Behälter für Temperierungsmedien, welche bei Hybrid- wie auch Elektrofahrzeugen, aufgrund geringerer bzw. keiner Abwärme des Verbrenners, erforderlich sind. Die Lichtmaschine wird bei den Hybridkonzepten durch die vorhandene elektrische Maschine ersetzt. Bei dem Konzept des optimierten Verbrenners wird hingegen ein kombi-

nierter Starter-Generator eingesetzt. Bedingt durch die Entwicklungen im Zuge der Elektrifizierung von Nebenverbrauchern und der Energierückgewinnung (Rekuperation) ist in den optimierten Verbrennerfahrzeugen zukünftig eine Vergrößerung der (Starter-)Batterie erforderlich. Die Summe dieser Entwicklungen führt zu Mehraufwänden in der Herstellung und damit zu einem steigenden Marktvolumen. Insgesamt ergibt sich im Bereich der Nebenaggregate eine positive Veränderung im Marktvolumen von +27,23 Milliarden Euro (2025) bzw. +38,51 Milliarden Euro (2030).

3.5.2 WERTSCHÖPFUNGSENTWICKLUNGEN BEI NEUEN ANTRIEBEN/KOMPONENTEN

ELEKTRISCHE MASCHINE

Die elektrische Maschine als Kernstück des elektrifizierten Antriebsstrangs kann in den kommenden Jahren ein starkes Marktvolumen generieren. Der Zuwachs gegenüber dem Jahr 2013 beläuft sich hierbei auf rund +20,96 Milliarden Euro (2025) bzw. +37,70 Milliarden Euro (2030), was zum einen auf die zunehmende Hybridisierung und zum anderen auf den prognostizierten Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge (PHEV, REEV und BEV) von insgesamt 17,3 % (2025) bzw. 29,1 % (2030) am globalen Absatz im jeweiligen Jahr zurückzuführen ist. Besonders relevante Wertschöpfungsinhalte stellen hierbei die Herstellung des Rotors sowie des Stators und damit verbundene Montagetätigkeiten dar. Die hierfür erforderlichen Fertigungs- und Montagekonzepte können als interessantes Segment für den Maschinen- und Anlagenbau gesehen werden, da insbesondere in der Automatisierung (beispielsweise Magnetbestückung) oder im Bereich der Qualitätssicherung noch Bedarf an Lösungen zur Sicherstellung einer effizienten und wirtschaftlichen Produktion bestehen. Insbesondere durch den sehr hohen Anteil der Materialkosten in der Herstellung elektrischer Maschinen müssen sich Produzenten auf die zentralen wertschöpfenden Aufgabeninhalte konzentrieren und weiterhin durch einen Ausbau der Kompetenzen innovative Lösungsangebote generieren, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben.

LEISTUNGSELEKTRONIK

Bei den Komponenten der Leistungselektronik (inklusive Ladegerät) und des notwendigen Elektronikzubehörs kann im Zuge der Elektrifizierung ein deutliches Wertschöpfungspotenzial von

⁵⁶ Im zugrunde liegenden Szenario wird nur ein geringer Anteil von 0,5 % (2025) bzw. 1 % (2030) Brennstoffzellen-Fahrzeugen unterstellt. Das Verhältnis zwischen konventionellem und optimiertem Verbrenner über den Betrachtungshorizont wurde durch eine Metastudie ermittelt.

⁵⁷ Je nach Antriebskonzept wurde im Rahmen der Studie – ausgehend von einem klassischen Grundmotor – bis zum Jahr 2030 eine 10- bis 20-%ige Wertreduzierung angenommen. Als Gründe hierfür können, je nach Motorgröße und -ausführung, eine weitere Abnahme der Teile- und Prozesskomplexität und hierdurch eine Verringerung der Aufwände im Rahmen der Herstellung genannt werden (vgl. hierzu Spath et al. (2012)).

⁵⁸ Diesem Wert liegt die Annahme zugrunde, dass die Elektrifizierung von Nebenaggregaten nicht nur in dem Konzept des optimierten Verbrenners, sondern auch in den elektrifizierten Konzepten breiten Einsatz findet.

Kapitel 3

+24,44 Milliarden Euro (2025) bzw. +43,98 Milliarden Euro (2030) gegenüber dem Referenzjahr 2013 ausgewiesen werden. Hier von entfallen auf die Herstellung des Leistungsteils und der passiven Komponenten 7,45 Milliarden Euro (2025) bzw. 13,26 Milliarden Euro (2030). Auch die Montage der Leistungselektronik stellt ein zentrales Wertschöpfungsmodul dar. Mit einem Wertschöpfungspotenzial von 2,98 Milliarden Euro im Jahr 2025 und 5,30 Milliarden Euro im Jahr 2030 trägt die Montage einen erheblichen Anteil zum entstehenden Gesamtvolumen bei.⁵⁹ Für das Ladegerät wird ein Wertschöpfungspotenzial von 4,60 Milliarden Euro (2025) bzw. 8,71 Milliarden Euro (2030) erwartet.

TRAKTIONSBATTERIE/BATTERIESYSTEM

Die Herstellung der Traktionsbatterie als Schlüsselkomponente elektrifizierter Fahrzeuge besitzt ein enormes Wertschöpfungspotenzial für die kommenden Jahre. Unter Annahme heutiger Marktpreise von 325 Euro/kWh beim batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) und einem gemittelten Marktpreis von 420 Euro/kWh bei den verschiedenen Hybridkonzepten (Mild-Hybrid, Full-Hybrid, PHEV, REEV) sowie erwarteten Kostendegressionen zwischen 30 und 50 % bis zum Jahr 2030 resultiert ein globales Wertschöpfungspotenzial für diese Komponente

von +60,32 Milliarden Euro (2025) und +113,13 Milliarden Euro (2030) gegenüber dem Referenzjahr 2013. Wie in Abbildung 38 ersichtlich, entfallen hierbei ca. 24,1 Milliarden Euro bzw. 45,25 Milliarden Euro (2025/2030) auf die Gewinnung bzw. Herstellung der Vorleistungen (Rohstoffe) und der Herstellung der Zellmaterialien bzw. -komponenten. Das Wertschöpfungspotenzial im Rahmen der Zellfertigung liegt bei rund 18,1 Milliarden Euro bzw. 33,94 Milliarden Euro (2025/2030). Die Herstellung von erforderlichen Komponenten für die Batteriemodule bzw. für das System (Batteriemanagement, Leistungselektronik/Hochvolt-Modul, Gehäuse- und Temperierungskomponenten etc.) beläuft sich auf rund 12,06 Milliarden Euro bzw. 22,63 Milliarden Euro (2025/2030). Unter Annahme eines 10 %-igen Kostenanteils der Modul- und Systemmontage an den Gesamtkosten der Batterieherstellung resultiert aus diesen Montagetätigkeiten für das Jahr 2025 ein Wertschöpfungspotenzial von 6,03 Milliarden Euro sowie im Jahr 2030 ein Potenzial von 11,31 Milliarden Euro. Ein wesentlicher Anteil hiervon entfällt auf die Herstellung erforderlicher Anlagen und Betriebsmittel. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die resultierenden Wertschöpfungspotenziale innerhalb der vorgestellten Wertschöpfungsmodule.

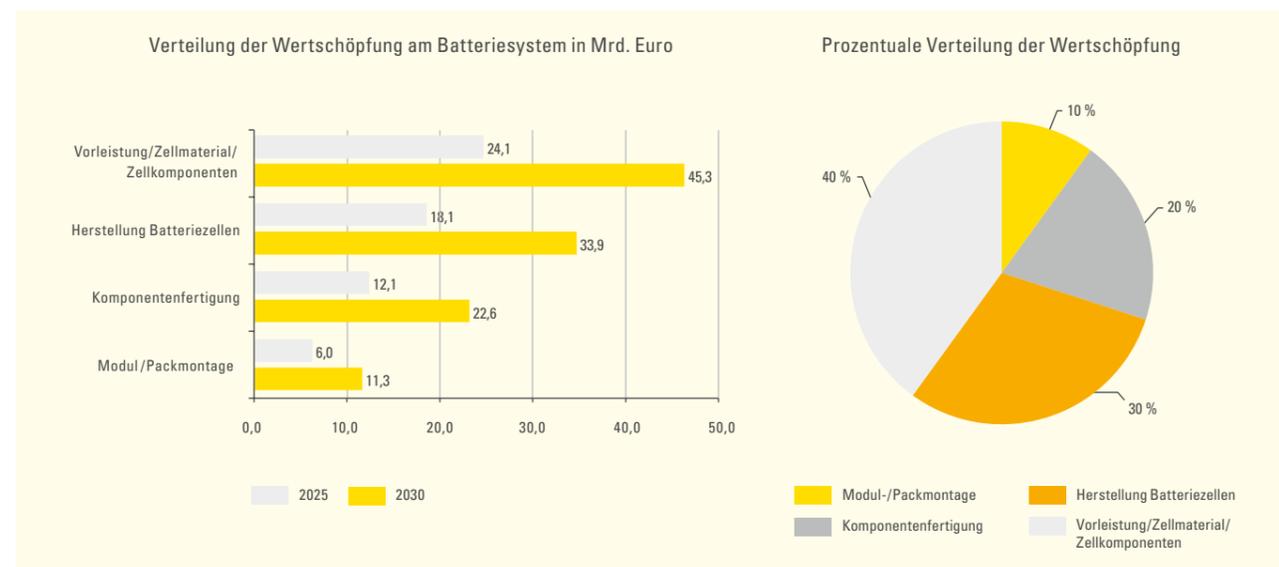


Abbildung 38: Wertschöpfung im Bereich Batteriesystem.⁶⁰

⁵⁹ Unter Annahme eines 50 %-igen Wertanteils des Leistungsteils und der passiven Komponenten sowie eines 20 %-igen Wertanteils der Montage an der Leistungselektronik (exklusive Ladegerät, Elektronikzubehör und Niedervolt-Gleichstromsteller). Vgl. hierzu Kampker (2014).

⁶⁰ Exemplarische Wertverteilung am Beispiel eines Batteriesystems für ein batterieelektrisches Fahrzeug. Im Rahmen der Bestimmung der Wertschöpfungspotenziale wurde keine Veränderung der Wertanteile über den Zeitverlauf vorgenommen.

BRENNSTOFFZELLENSYSTEM

Der Marktanteil des Brennstoffzellenfahrzeugs wurde im Referenzszenario als relativ gering angenommen. Dennoch kann für das hierfür erforderliche Brennstoffzellensystem in den kommenden Jahren ein moderates Wertschöpfungspotenzial ausgewiesen werden. Dieses beläuft sich für das Jahr 2025 auf insgesamt +5,64 Milliarden Euro und für das Jahr 2030 auf +11,40 Milliarden Euro gegenüber dem Referenzjahr 2013. Zurückzuführen sind diese Werte insbesondere auf das sehr komplexe System und den damit verbundenen sehr hohen Herstellungsaufwand.⁶¹

3.5.3 ZUSAMMENFASSUNG DER WERTSCHÖPFUNGSENTWICKLUNGEN

Weltweit entsteht somit, unter den getroffenen Annahmen, bei den betrachteten Komponenten eine Veränderung des Marktvolumens von +216,78 Milliarden Euro (2025) bzw. +341,25 Milliarden Euro (2030) gegenüber dem Referenzjahr 2013. Hiervon entfallen +47,49 Milliarden Euro (2025) bzw. +52,49 Milliarden Euro (2030) auf die konventionellen Komponenten des Verbrennungsmotors (inklusive Kraftstoffsystem), die Abgasanlage sowie das Getriebe

(inklusive Getriebe für Hybrid- und batterieelektrische Fahrzeuge). Bedingt durch die Effizienzsteigerungen im Antriebsstrang sowie die Elektrifizierung von Nebenaggregaten werden erhebliche Veränderungen im Bereich der Effizienztechnologien und der Nebenaggregate erwartet. Dies führt in den beiden Bereichen zu einem Gesamtpotenzial von +57,93 Milliarden Euro (2025) bzw. +82,37 Milliarden Euro (2030), was rund ein Viertel des Gesamtzuwachses im jeweiligen Jahr ausmacht.

Rund die Hälfte des Gesamtzuwachses entfällt im Jahr 2025 bereits auf rein elektrifizierte Komponenten (Leistungselektronik inklusive Ladegerät, elektrischer Maschine, Batteriesystem, Brennstoffzellensystem). Insgesamt beträgt der Zuwachs bei diesen Komponenten im Jahr 2025 +111,36 Milliarden Euro. Für das Jahr 2030 erhöht sich der Anteil dieser Komponenten am Gesamtzuwachspotenzial auf +206,21 Milliarden Euro. Zu diesem Zeitpunkt wird rund 60 % des entstehenden Wertschöpfungspotenzials auf Basis dieser neuen Komponenten erwartet. Nachfolgende Abbildung 39 fasst die im Rahmen der Untersuchung gewonnenen Ergebnisse zusammen.

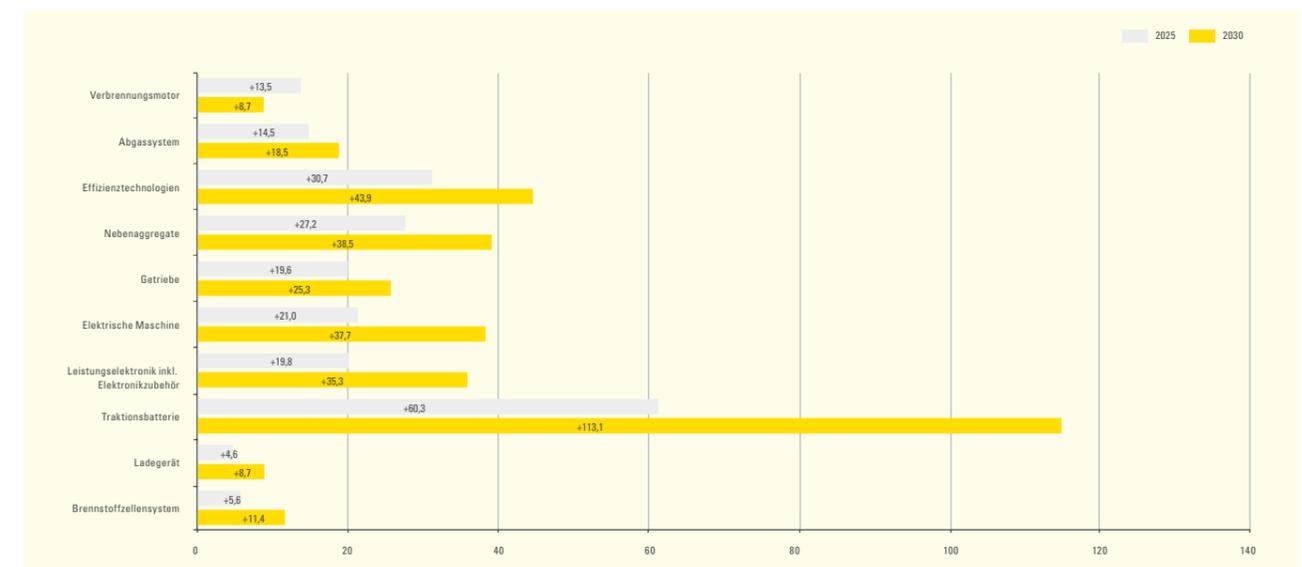


Abbildung 39: Veränderung des globalen Marktvolumens zum Jahr 2025 bzw. 2030 gegenüber 2013 in Mrd. Euro.

⁶¹ Der Berechnung liegt ein Marktpreis des 90-kW-Brennstoffzellensystems von 9.750 Euro im Jahr 2030 zugrunde.

Kapitel 3

3.6 EFFEKTE AUF DIE BESCHÄFTIGUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Aufbauend auf den ermittelten Wertschöpfungspotenzialen im Betrachtungszeitraum erfolgt die Ableitung damit verbundener Beschäftigungseffekte für den Standort Baden-Württemberg. Die Analyse bezieht sich hierbei auf resultierende Veränderungen zwischen 2013 und 2025. Um wesentliche Anteile der Wertschöpfung im Land Baden-Württemberg auf sich zu vereinen, muss es den hier ansässigen Unternehmen gelingen, nicht nur im Bereich der Forschung und Entwicklung, sondern auch in der Herstellung bedeutender elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten und Effizienztechnologien eine Spitzenposition im globalen Wettbewerb einzunehmen. Dabei ist das Erreichen einer ausreichend hohen Wertschöpfungstiefe im Bereich neuer Antriebskomponenten und den damit verbundenen Lösungen eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Schaffung von Arbeitsplätzen. Weiterhin können auch durch die Entwicklung, Herstellung, Planung und Installation von Produktionsanlagen durch im Land ansässige Unternehmen wertvolle Wertbeiträge generiert werden.

3.6.1 BESTIMMUNG DER BESCHÄFTIGUNGSEFFEKTE

Die Ermittlung der Beschäftigungseffekte basiert in einem ersten Schritt auf der Annahme, dass die baden-württembergischen Unternehmen der Automobilindustrie auch im Jahr 2025 denselben Anteil am weltweiten Umsatz von rund 6 % besitzen.⁶² Darauf aufbauend erfolgt eine Diskussion hinsichtlich der Zielerreichung der hieraus theoretisch ermittelten Werte für die Komponenten der alternativen Antriebsstränge (Kapitel 3.6.4). Hierfür wurden die den jeweiligen Komponenten zugrunde liegenden Wertschöpfungsaktivitäten genauer untersucht und diese in sogenannte Wertschöpfungsmodule gegliedert. Dies bildete die Basis für die Diskussion der komponentenspezifischen Wertschöpfungsanteile.

Der Fokus der Betrachtung liegt ausschließlich auf dem Antriebsstrang und damit verbundenen Komponenten. Potenzielle Beschäftigungseffekte, welche sich im Kfz-Handwerk oder auch im automobilbezogenen Dienstleistungssektor ergeben könnten, wurden nicht untersucht. Die Berechnung der Arbeitsplatzeffekte wurde auf Basis der Kennzahl Umsatz pro Beschäftigten in der Automobilindustrie in Baden-Württemberg ermittelt. Dieser Wert betrug für das Jahr 2013 rund 415.000 Euro. Bedingt durch die in den vergangenen

Jahren ermittelte Wachstumsrate hinsichtlich dieser Größe (2,8 % p.a.) erhöht sich für die Ermittlung der Beschäftigungseffekte im Jahr 2025 der Bezugswert (Umsatz/Beschäftigter) auf 504.000 Euro.⁶³

3.6.2 POTENZIALE DURCH KONVENTIONELLE ANTRIEBE/KOMPONENTEN

Im Folgenden werden die Umsatz- und Beschäftigungseffekte für die Komponenten des Verbrennungsmotors und dessen Peripherie, der Abgasanlage sowie der Getriebe für Baden-Württemberg aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Wertschöpfungskomplexe der Nebenaggregate sowie der Effizienztechnologien auf deren Potenziale hinsichtlich der Generierung von Umsatz und Arbeitsplätzen im Land betrachtet.

VERBRENNER UND PERIPHERIE

Dem klassischen Verbrennungsmotor (inklusive Tanksystem) wird bis zum Jahr 2025 noch eine große Bedeutung beigemessen. Für Baden-Württemberg ergibt sich unter den getroffenen Annahmen ein Anstieg des Marktvolumens von +0,81 Milliarden Euro gegenüber dem Jahr 2013, was einem Beschäftigungspotenzial von +1.600 Beschäftigten im Jahr 2025 entspricht. Ein deutlicher Zuwachs von +0,87 Milliarden ist im Bereich der Abgasanlage zu erwarten. Dieser Zuwachs führt zu einem Beschäftigungspotenzial von +1.720.

GETRIEBE

Ein weiterer Zuwachs kann für die Komponenten des Getriebes (inklusive Getriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge) ausgewiesen werden. Bedingt durch das starke globale Wachstum ergibt sich für Baden-Württemberg im Jahr 2025 ein Marktpotenzial von +1,17 Milliarden Euro gegenüber dem Jahr 2013. Aus Sicht der Beschäftigung kann somit ein Potenzial von +2.320 Beschäftigten abgeleitet werden.

EFFIZIENZTECHNOLOGIEN UND (ELEKTRIFIZIERUNG DER) NEBENAGGREGATE

Im Bereich der Effizienztechnologien sowie der Nebenaggregate werden erhebliche Wertschöpfungspotenziale für die kommenden Jahren erwartet. Bei den Effizienztechnologien (inklusive Elektrifizierung von Nebenaggregaten) wird durch ein Marktpotenzial in Baden-Württemberg zum Jahr 2025 von +1,84 Milliarden Euro ein Beschäftigungszuwachs von +3.650 Beschäftigten gegenüber dem

Jahr 2013 prognostiziert. Das Wertschöpfungssegment der Nebenaggregate kann zum Jahr 2025 einen Umsatzzuwachs von +1,63 Milliarden Euro gegenüber dem Jahr 2013 auf sich vereinen. Diese starke Zunahme führt zu einem Potenzial von +3.240 Beschäftigten.

ZUSAMMENFASSUNG

In Summe ergibt sich für das Jahr 2025 in den beschriebenen Wertschöpfungssegmenten ein Potenzial von insgesamt +12.530 Beschäftigten gegenüber dem Referenzzeitpunkt (2013).

3.6.3 THEORETISCHE POTENZIALE DURCH NEUE ANTRIEBE/KOMPONENTEN

Im Anschluss an die vorangegangene Untersuchung werden nachfolgend die Komponenten der elektrifizierten Antriebe hinsichtlich deren Umsatz- und Arbeitsplatzpotenzialen für das Land Baden-Württemberg untersucht. Den hierbei ermittelten Werten liegt zunächst die Annahme zugrunde, dass Baden-Württemberg auch in diesen neuen Wertschöpfungsfeldern den bisherigen Anteil von rund 6 % am globalen Umsatz hält. Daher werden diese ermittelten Werte nachfolgend als theoretische Potenziale bezeichnet. Daran anschließend werden die theoretischen Potenziale hinsichtlich ihrer Zielerreichung diskutiert. Aufbauend auf dieser Diskussion erfolgt die Abschätzung tatsächlich realisierbarer Potenziale.

ELEKTRISCHE MASCHINE

Durch den Einsatz der elektrischen Maschine in den vielfältigen Antriebskonzepten kann für das Jahr 2025 ein deutlicher Umsatzzuwachs in diesem Segment erwartet werden. Unter Annahme eines gleichbleibenden Marktanteils Baden-Württembergs resultiert ein theoretischer Zuwachs von 1,26 Milliarden Euro im Jahr 2025, was zu einem theoretischen Beschäftigungspotenzial von +2.500 gegenüber dem Jahr 2013 führt.

LEISTUNGSELEKTRONIK

Im Bereich der Leistungselektronik (inklusive Ladegerät) kann ebenfalls eine deutliche theoretische Umsatzzunahme erwartet werden. Für Baden-Württemberg ergibt sich ein Zuwachs von +1,47 Milliarden Euro im Jahr 2025, was einem theoretischen Beschäftigungszuwachs von +2.910 gegenüber dem Jahr 2013 entspricht.

TRAKTIONSBATTERIE/BATTERIESYSTEM

Das Batteriesystem als Schlüsselkomponente elektrifizierter Fahrzeugkonzepte besitzt in den kommenden Jahren ein enormes Wachstumspotenzial. Die theoretische Veränderung des Marktvolumens für Baden-Württemberg beläuft sich im Jahr 2025 auf insgesamt +3,62 Milliarden Euro. Die detaillierte Ermittlung des hieraus resultierenden Beschäftigungspotenzials ergibt einen Bedarf an +5.400 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013.⁶⁴

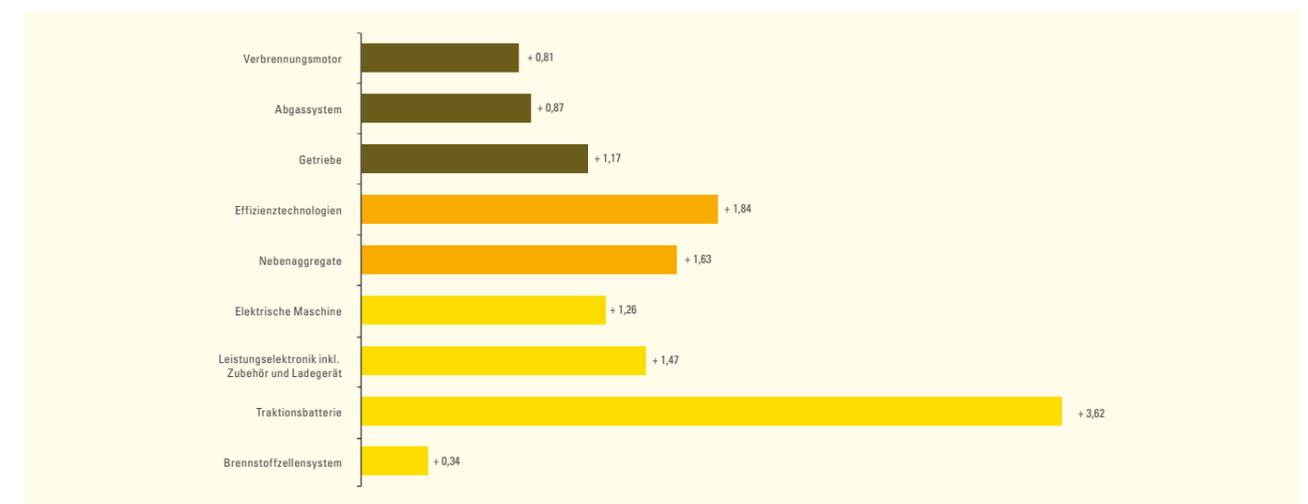


Abbildung 40: Theoretische Veränderung des Marktvolumens in Baden-Württemberg im Jahr 2025 gegenüber 2013 in Mrd. Euro.

⁶² Der Umsatz baden-württembergischer Unternehmen der Automobilindustrie (Automobilhersteller und Zulieferer) lag im Jahr 2013 bei 87,87 Milliarden Euro [Statistisches Landesamt (2014)]. Dies entspricht rund 6 % des globalen Umsatzes. Bezogen auf die elektromobilitätsspezifischen Komponenten erschweren die dynamischen Entwicklungen in der derzeitigen frühen Marktphase die eindeutige Bestimmung Baden-Württemberg-spezifischer Wertschöpfungsanteile.

⁶³ Eine Ausnahme bildet im Rahmen der Bestimmung die Komponente des Batteriesystems. Hierfür wurden bestehende und geplante Produktionseinrichtungen auf ihre Mitarbeiterbedarfe hin untersucht und mit den im Rahmen des Berechnungsmodells erwarteten „Batteriekapazitäten“ im Bezugsjahr 2025 abgeglichen. Als Ergebnis erfolgte somit eine detaillierte Ermittlung der zur Abdeckung des Batteriebedarfs erforderlichen Mitarbeiter. Bezogen auf das Batteriesystem ergibt sich somit ein veränderter Wert von ca. 670.000 Euro je Beschäftigtem.

⁶⁴ Im Rahmen der Ermittlung wurde die im Referenzszenario für das Jahr 2025 erwartete Batteriekapazität über alle Antriebssysteme ermittelt. Darauf aufbauend wurden mittels Experteninterviews und Extrapolation bekannte Personalbedarfe ausgewählter Batterieproduktionen (Zellfertigung sowie Modul- und Systemmontage) für unterschiedliche Ausbringungsmengen gegenübergestellt und ermittelt. Als Ergebnis konnte somit die Abschätzung des Beschäftigungspotenzials in Baden-Württemberg erreicht werden.

Kapitel 3

BRENNSTOFFZELLENSYSTEM

Im Bereich der Herstellung von Brennstoffzellensystemen für zukünftige Fahrzeuggenerationen ergibt sich unter Berücksichtigung der angenommenen Marktverteilung eine theoretische Veränderung des Marktvolumens von 0,34 Milliarden Euro im Jahr 2025, was einem Zuwachs von +675 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 entspricht.

ZUSAMMENFASSUNG

Für das Jahr 2025 ergibt sich durch die Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs ein theoretisches Potenzial von insgesamt +11.485 Beschäftigten gegenüber dem Referenzzeitpunkt (2013). Zusammen mit den Potenzialen aus den „konventionellen“ Wertschöpfungssegmenten ergibt sich für das Jahr 2025 ein Gesamtbeschäftigungspotenzial von +24.015 Beschäftigten gegenüber dem Referenzjahr 2013.

3.6.4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Da Baden-Württemberg heute als Technologieführer beim Verbrennungsmotor gilt, stellt sich die Frage, inwieweit die im Rahmen der Untersuchung ausgewiesenen Beschäftigungspotenziale, die in den neuen Komponenten liegen, zukünftig ausgeschöpft werden können und ob der bestehende Weltmarktanteil baden-württembergischer Unternehmen weiterhin gehalten werden kann. Neben der Diskussion auf Ebene der neuen Komponenten gilt es auch die Entwicklungen bei konventionellen Komponenten kritisch im Auge zu behalten. Verlagerung von Forschungs- und Produktionsstandorten ansässiger Unternehmen oder Stagnation von wichtigen Märkten (EU) können als Herausforderungen für die kommenden Jahre hinsichtlich der Aufrechterhaltung lokaler Wertschöpfung genannt werden.

ELEKTRISCHE MASCHINE

Der Markt wird nach wesentlich mehr elektrischen Maschinen verlangen. Allerdings kann Baden-Württemberg heute keine großskalige Serienherstellung im Bereich der elektrischen Maschinen vorweisen. So hat beispielsweise das Joint Venture von Bosch und Daimler (EM-motive) seine Produktion der elektrischen Maschinen in Hildesheim (Niedersachsen) angesiedelt. Der sehr hohe Anteil der Materialkosten an den gesamten Herstellkosten elektrischer Maschinen kann als limitierender

Faktor hinsichtlich einer tatsächlich erzielbaren Wertschöpfung im Land gesehen werden. Unter der Annahme, dass sich im Jahr 2025 eine begrenzte Anzahl an Unternehmen in Baden-Württemberg mit der Fertigung von Traktionsmotoren und dafür erforderlichen Komponenten (Wellen, Stator, Rotor, Gehäuse etc.) beschäftigen, erfolgt im Rahmen einer derzeitigen Einschätzung eine Reduzierung des theoretischen Marktpotenzials in diesen Segmenten von 6 auf 2 %.⁶⁵

Im Bereich der Montage und Prüftechnik hingegen wird die Erreichung des theoretischen Anteils von 6 % angenommen. Mit über 50 % aller deutschen Werkzeugmaschinen- und Präzisionswerkzeugherstellern verfügt das Land Baden-Württemberg über optimale Voraussetzungen, um auch in Zukunft mit innovativen Konzepten und Produktionstechnologien Unternehmen der Automobilindustrie mit vollen Kräften zu unterstützen. Bestens ausgebildete Fachkräfte und eine gute Vernetzung zwischen Unternehmen und Hochschulen lassen sich als weitere Vorteile in Baden-Württemberg identifizieren, welche zukünftig zur Erreichung dieser Zielsetzung weiter ausgebaut werden müssen. Auf Basis dieser Annahmen wird eine Reduzierung des theoretischen Marktanteils (6 %) über alle betrachteten Wertschöpfungssegmente auf 2,8 % als derzeit realistischer Referenzwert angenommen.⁶⁶ Hieraus resultiert für Baden-Württemberg ein „ausschöpfbares“ Marktpotenzial von 588 Millionen Euro im Jahr 2025, was einem Beschäftigungspotenzial von +1.170 Beschäftigten entspricht.

LEISTUNGSELEKTRONIK

Die Leistungselektronik dient als wesentlicher Baustein im elektrifizierten Antriebskonzept. Die Herstellung der einzelnen Komponenten wie Leistungsmodul, Folienkondensator oder Steuerelektronik erfordern hierbei jedoch enormes Wissen und Erfahrung in der Halbleitertechnik und im Hochvoltbereich. Durch den großen Stellenwert der Montagetätigkeiten im Rahmen der Herstellung nehmen präzise abgestimmte Prozess-technik und aufwendige Qualitätssicherungsprozesse einen wichtigen Bestandteil im Rahmen der Leistungserstellung ein.

Aufgrund bestehender Aktivitäten in der Leistungselektronikherstellung im Land Baden-Württemberg erfolgt eine moderate Anpassung des zu erwartenden Marktanteils im Jahr 2025 vom

theoretischen Referenzwert von 6 % auf 4,5 %. Auf Basis dieser Annahme kann eine „ausschöpfbare“ Veränderung des Marktvolumens von 1,1 Milliarden und somit ein Beschäftigungspotenzial von +2.180 Beschäftigten ausgewiesen werden.

TRAKTIONSBATTERIE/BATTERIESYSTEM

Die Traktionsbatterie bietet bei den neuen Antriebsstrangkomponenten mit Abstand das größte theoretische Marktpotenzial für Baden-Württemberg. Bei der Herstellung von Batteriezellen gilt es zu beachten, dass das Land Baden-Württemberg derzeit noch über keine großskalige Zellfertigung im Bereich Traktionsbatterie verfügt. Mit dem Aufbau einer Pilotproduktionsanlage für Lithium-Ionen-Batterien in Ulm ist der Grundstein zur Erforschung wirtschaftlicher Lösungen im Bereich der Batterieherstellung gelegt. Diese Institution bietet beteiligten Unternehmen und deutschen Forschungseinrichtungen eine zentrale Anlaufstelle und Dialogmöglichkeit. Neben der Einrichtung in Ulm konnte in den vergangenen Jahren eine weitere Forschungs- und Produktionseinrichtung für die Herstellung von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen in Karlsruhe in Betrieb genommen werden. Anders als bei den Arbeiten in Ulm steht hier nicht das Zellformat der prismatischen Zelle, sondern die Geometrie der Pouchzelle im Fokus.

Als wesentliche Herausforderungen aus produktionstechnischer Sicht können derzeit die Übertragung neu entwickelter Produktionsverfahren, Materialien, Komponenten und Anlagenteile in die industrielle Fertigung seriennaher Batterien für Elektrofahrzeuge gesehen werden. Zudem gilt es, Qualitätssicherungsstandards und -methoden zu erarbeiten, Rein- und Trockenraumkonzepte für Großserienfertigung von Batteriezellen zu konzipieren und weiter an Beschichtungsverfahren und intelligenten Handhabungs- und Automatisierungslösungen zu arbeiten.

Sehr gute Chancen werden insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Montage der Batterien (Modul- und Systemmontage) und der Integration des Systems in das Fahrzeug gesehen. Darüber hinaus bietet die Herstellung von Komponenten der Batteriemodule bzw. des Systems wichtige Wertschöpfungspotenziale. Hierzu zählen beispielsweise Steuerungs- und Elektronikkomponenten, Sensoren, Temperierungslösungen oder Struktur- und Gehäusekomponenten. Unter der Annahme, dass bis zum Jahr 2025 keine Zellfertigung im Land Baden-Württemberg angesiedelt werden kann, reduziert sich das theoretische Marktpotenzial bei der Traktionsbatterie um rund 70 % (inklusive Vorleistungen), was einem Rückgang der zuvor anvisierten 6 % auf 1,8 % entspricht.

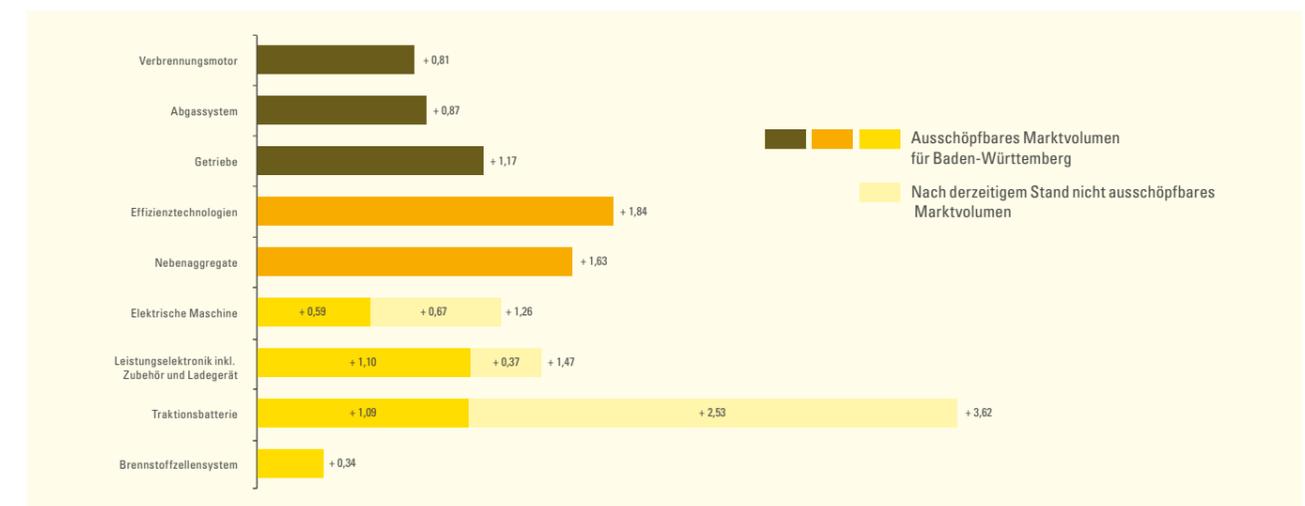


Abbildung 41: „Ausschöpfbare“ Veränderung des Marktvolumens in Baden-Württemberg im Jahr 2025 gegenüber 2013 in Mrd. Euro.

⁶⁵ Ein Marktanteil von 6 % entspräche dem durchschnittlichen Weltmarktanteil Baden-Württembergs bezogen auf den Automotive-Markt 2013.

⁶⁶ Der Berechnung liegt eine Verteilung von 80 % Komponentenfertigung inklusive Vorleistungen und 20 % Montage- und Prüftätigkeiten (inklusive Maschinen und Anlagenbau) zugrunde (vgl. hierzu Kampker (2014)).

Kapitel 3

Aufbauend auf diesen Annahmen führt dies beim Batteriesystem zu einem „ausschöpfbaren“ Marktpotenzial von 1,09 Milliarden Euro im Jahr 2025, ausgehend von der heutigen Markteinschätzung. Das hieraus resultierende Beschäftigungspotenzial beträgt +1.620 Beschäftigte gegenüber dem Jahr 2013.

BRENNSTOFFZELLENSYSTEM

Im Bereich des Brennstoffzellensystems wird auf Basis heutiger Informationen eine vollständige Ausschöpfung des theoretischen Marktpotenzials von 6 % angenommen. Gründe liegen hierbei insbesondere in der guten Ausgangsposition ansässiger Unternehmen im Bereich Gesamtsystem und damit verbundener Komponenten. Die Aufnahme einer Serienproduktion/-montage des aufwendigen Brennstoffzellensystems bis 2025 kann nicht ausgeschlossen werden. Hieraus resultiert ein Wachstumspotenzial für Baden-Württemberg von +0,34 Milliarden Euro im Jahr 2025, was einem Zuwachs von +675 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 entspricht.

ZUSAMMENFASSUNG DER DISKUSSION

KONVENTIONELLE KOMPONENTEN

Für die Wertschöpfungssegmente des Verbrennungsmotors (inklusive Tanksystem), des Abgassystems sowie des Getriebes kann für das Jahr 2025 insgesamt ein Potenzial von +5.640 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 ausgewiesen werden. Die Potenziale der einzelnen Segmente haben die Aufrechterhaltung eines gleichbleibenden Umsatzanteils Baden-Württembergs über die kommenden Jahre zur Annahme.

NEBENAGGREGATE UND EFFIZIENZTECHNOLOGIEN

Im Bereich der Nebenaggregate und der Effizienztechnologien kann für das Jahr 2025 insgesamt ein Potenzial von +6.890 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 ausgewiesen werden. Das hierbei ausgewiesene Potenzial hat ebenfalls die Aufrechterhaltung eines gleichbleibenden Umsatzanteils Baden-Württembergs über die kommenden Jahre zur Annahme.

NEUE ANTRIEBE/KOMPONENTEN

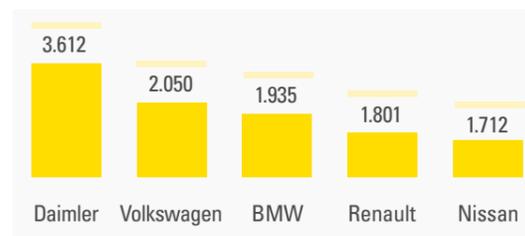
Bei den neuen Antrieben und damit verbundenen Komponenten wurde im Rahmen der Studie zwischen einem theoretischen Potenzial bei gleichbleibendem Marktanteil von 6 % und

einem „ausschöpfbaren“ Potenzial unterschieden. Bei Aufrechterhaltung des Marktanteils würde sich somit ein starker Beschäftigungszuwachs von insgesamt +11.485 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 ergeben. Nach vorangegangener Diskussion wird allerdings lediglich ein Beschäftigungszuwachs von +5.645 Beschäftigten als realistisch erachtet. Nachfolgende Abbildung 42 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchung zusammen.

In Summe resultiert aus den im Rahmen der Studie betrachteten Wertschöpfungssegmenten für das Jahr 2025 ein „realistischer“ Beschäftigungszuwachs von insgesamt +18.175 Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2013 (gegenüber einem „theoretischen“ Beschäftigungszuwachs von +24.015 Beschäftigten, der ein „derzeit nicht ausschöpfbares Beschäftigungspotenzial“ von 5.840 Beschäftigten enthält).⁶⁷

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Hersteller-Ranking in Deutschland zugelassener E-Autos:



(Sebastian Schaal, wiwo.de, 2014)

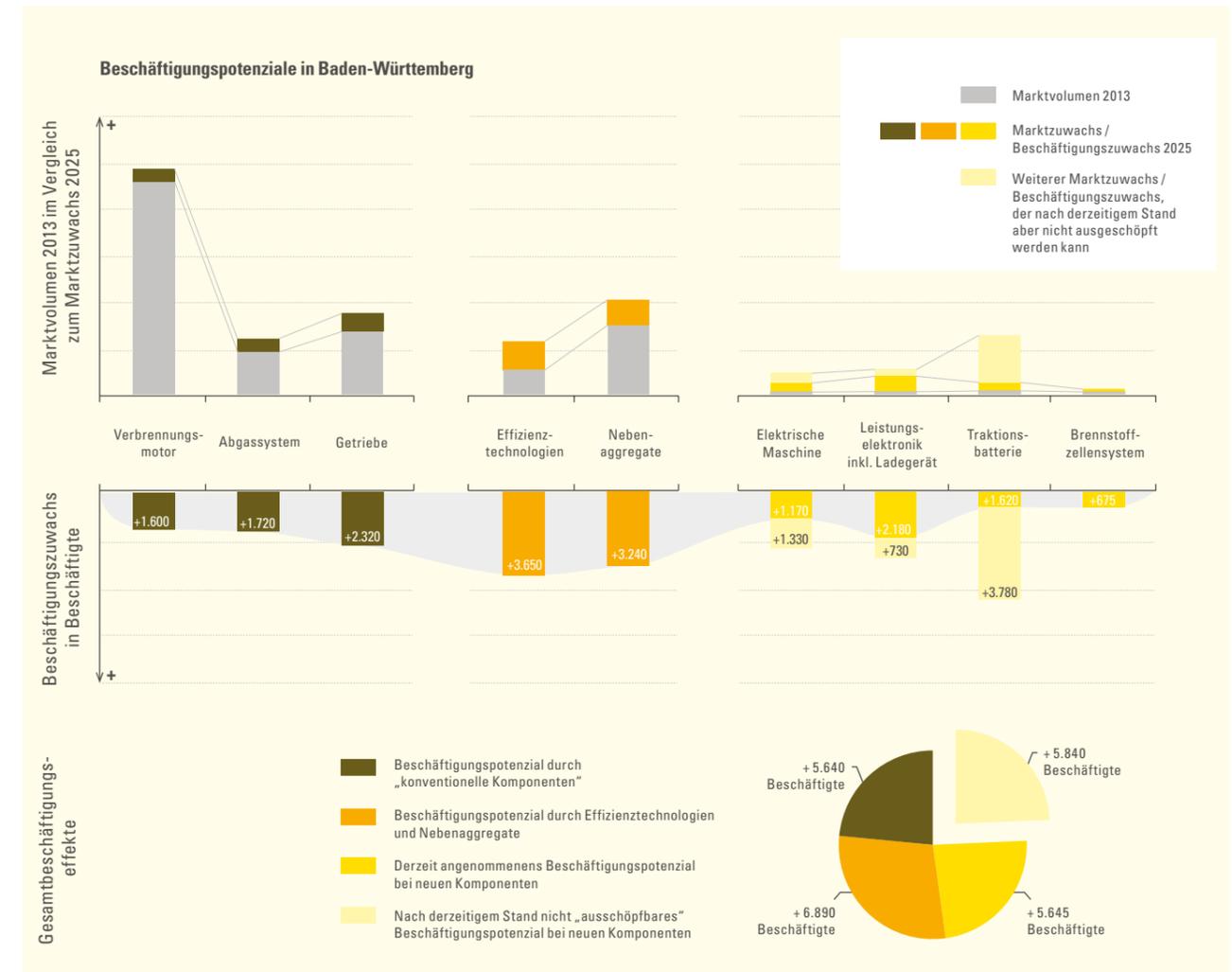


Abbildung 42: Beschäftigungspotenziale in Baden-Württemberg im Jahr 2025.

⁶⁷ Hierbei wird angemerkt, dass unter die Kategorie der „derzeit nicht ausschöpfbaren Beschäftigungspotenziale“ neben der Zellfertigung verstärkt Wertschöpfungsaktivitäten mit Bezug zu den Rohstoffen (Rohstoffgewinnung) und deren Aufarbeitung fallen. Diese Wertschöpfungsaktivitäten können aufgrund der Ressourcensituation in Deutschland und insbesondere in Baden-Württemberg nicht bzw. nur sehr eingeschränkt ausgeführt werden.

Kapitel 4

AKTIVITÄTEN UND ERFAHRUNGEN

4.1 BADEN-WÜRTTEMBERG AUF DEM WEG ZUM LEITMARKT

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Stand der Elektromobilität in Baden-Württemberg aus Sicht zentraler Akteure der Politik beleuchtet. Dazu erfolgt zunächst eine Betrachtung von Förderinstrumenten für die Marktdurchdringung einschließlich einer expliziten Auflistung von Maßnahmen zur Förderung von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Ländern. Dem schließt sich eine Darstellung von Märkten und Fördermodellen im internationalen Vergleich an, wobei auch ein Überblick über Kaufförderungen für Elektrofahrzeuge Berücksichtigung findet. Eine Beschreibung von Schlussfolgerungen für Baden-Württemberg aus den gewonnenen Erkenntnissen bildet den Abschluss des Kapitels.

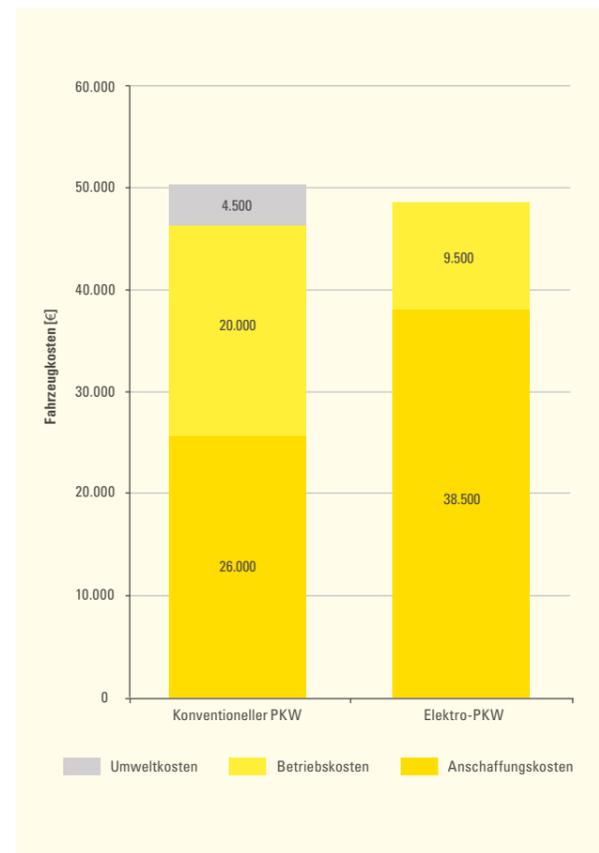


Abbildung 43: Gesamtkostenvergleich zwischen Verbrennungs- und Elektrofahrzeug.⁶⁸

4.1.1 INSTRUMENTE ZUR FÖRDERUNG DER MARKTDURCHDRINGUNG

Die Übernahme der Leitmarktrolle ist eine Voraussetzung der Leitanbieterschaft und daher für die Wertschöpfung in Baden-Württemberg von hoher Relevanz [NPE (2014a)]. Zudem ist es aufgrund der ökologischen Vorteile von Elektrofahrzeugen auch volkswirtschaftlich sinnvoll, die geringeren externen Kosten von Elektrofahrzeugen durch eine Förderung zu internalisieren. Abbildung 43 zeigt, dass die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten eines konventionellen Fahrzeugs über die Lebensdauer betrachtet heute kaum höher sind als die eines Elektrofahrzeugs.

Zur Förderung der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen gibt es eine Vielzahl von Förderinstrumenten, die in die Kategorien Privilegierung, Preissteuerung und Ladeinfrastrukturförderung unterteilt werden können.

Abbildung 44 zeigt die Bandbreite der wichtigsten und international bereits eingesetzten Fördermaßnahmen. Über die genannten Maßnahmen hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu fördern. Die Flottenemissionsvorgaben der europäischen CO₂-Regulierung sind ein starker indirekter regulatorischer Anreiz für Automobilhersteller, in Elektrofahrzeuge zu investieren und dadurch ihre kalkulatorischen Flottenverbrauchswerte zu reduzieren.⁶⁹ Die direkte Mengensteuerung zählt zu den radikalsten regulatorischen Eingriffen. Kalifornien erließ im Jahr 1991 eine Quotenregelung, welche die herstellerbezogene Vorgabe enthielt, dass ab 1998 2 % und ab 2003 10 % der zugelassenen Fahrzeuge Zero Emission Vehicles sein mussten. Mit einer Nichteinhaltung waren erhebliche Strafzahlungen verbunden [Naunin (2007)]. Die Vorgaben wurden Ende der 1990er-Jahre jedoch völlig aufgebrochen. Gesetzliche Vorgaben hinsichtlich der Beschaffung von Elektrofahrzeugen durch die öffentliche Hand werden bislang nur in Frankreich gemacht. Insgesamt müssen 25 % der neu durch die öffentliche Hand angeschafften Fahrzeuge in Frankreich rein batterieelektrische Fahrzeuge sein [Teichmann (2014)]. Eine weitere denkbare Maßnahme sind zudem „Negativförderungen“ (Malus-Förderungen) wie beispielsweise die Erhöhung der Steuern für konventionelle Fahrzeuge, sodass Elektrofahrzeuge relativ zu konventionellen Fahrzeugen günstiger werden.

⁶⁸ Teichmann (2014).

⁶⁹ Vgl. hierzu die Expertenaussagen in Kapitel 4.3.

	Maßnahmen	Internationale Beispiele	Situation in Deutschland
Privilegierung	Sonderparkplätze/Sondernutzungserlaubnisse Ladeinfrastruktur	„EL“-Parkplätze für Elektrofahrzeuge (EFZ) in Oslo	im EmoG vorgesehen, besondere Parkplätze an Ladestationen im öffentlichen Raum für EFZ auszuweisen
	Aufhebung von Zufahrtsverboten	Verbot verbrennungsmotorischer Zweiräder in China	Ausnahmen bei Lärm-/Abgasschutzzonen im EmoG vorgesehen/ Projekt „Nachtbelieferung mit elektrischen Nutzfahrzeugen“ in Berlin
	Sondernutzungen von Autobahnen	Freigabe der HOV-Lane für Clean Air Vehicles in Kalifornien	k.A.
	Kostenfreies Parken in Innenstädten	Kostenfreies Parken für EFZ in Norwegen	Reduktion/Erlassung von Parkgebühren im EmoG vorgesehen
	Kostenfreies Anwohnerparken	Kostenloser Anwohnerparkausweis für EFZ in Westminster (UK)	k.A.
	Freigabe von Busspuren	Nutzungserlaubnis für Busspuren in Norwegen	im EmoG vorgesehen
Monetäre Anreize	Kfz-Steuerbefreiung	Befreiung von Kfz-Steuern für EFZ in Norwegen/Niederlande	Befreiung von BEVs für 10 Jahre bei Neuzul. bis 31.12.15, für 5 Jahre bei Neuzulassung zw. 2016 und 2020 (Regierungsprogramm)
	Befreiung von Zulassungssteuern	Befreiung o. Reduzierung bei Kauf eines EFZ in Norwegen	k.A.
	Zusätzliche Steuern/Abgaben bei Neukauf eines konventionellen Fahrzeug	Hohe Zulassungssteuern für konventionelle Fahrzeuge in Dänemark	k.A.
	Dienstwagenbesteuerung	Befreiung von der Dienstwagenbesteuerung in UK	Nachteilsausgleich im Bereich der Dienstwagenbesteuerung (Regierungsprogramm)
	Abwrackprämie beim Kauf von EFZ	Subventionen für ein gewerbliches EFZ als Ersatz eines konv. Fzg. in Rotterdam	k.A.
	Reduktion des Strompreises durch spezifische Abgabentlastung für EFZ	Reduzierter Stromtarif in Kalifornien	k.A.
	Sonderregelungen bei der Abschreibung von EFZ	k.A.	Sonder-AfA für gewerbliche Nutzer (Vorschlag NPE)
	Direkte Zuschüsse bei Neukauf	Kaufprämie in Frankreich	k.A.
	Befreiung von Straßenbenutzungsgebühren auf Autobahnen	Befreiung von Autobahngebühren für EFZ in Norwegen	k.A.
	Zinsgünstige Kredite für den Kauf von EFZ	Zinsgünstige Kredite für den Kauf von EFZ in Irland	Zinsgünstige Kredite für den Kauf von EFZ für Selbstständige und Freiberufler durch die KfW
Förderung Ladeinfrastruktur	Förderung/Zuschüsse privater Ladeinfrastruktur	Zuschüsse für die Installation privater Ladeinfrastruktur in Rotterdam	Bsp.: Förderung der Installation von Wallboxes mit 200 € durch Stadtwerke Leipzig
	Investitionszuschüsse für öffentliche Ladeinfrastruktur	Zuschüsse für die Installation öffentlicher Ladeinfrastruktur in Norwegen/Niederlande/Kalifornien	Investitionspartnerschaften zum Aufbau öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur stärken (Vorschlag NPE)
	Vorschrift zur Berücksichtigung von Ladeinfrastruktur bei Neu- und Umbauten	Ladeinfrastrukturpflicht bei Neubauten in London	Vorbereitung für Ladeinfrastruktur in Neu- und Umbauten in den Landesbauvorschriften festschreiben (Vorschlag NPE)
	Bereitstellung kostenlosen Stroms	Kostenloses Laden an öffentlichen Ladepunkten in Oslo	k.A.

Abbildung 44: Maßnahmen zur Förderung von Elektrofahrzeugen.⁷⁰

⁷⁰ Eigene Darstellung.

Kapitel 4

4.1.2 MÄRKTE UND FÖRDERMODELLE IM INTERNATIONALEN VERGLEICH

Zwischen der Förderhöhe und dem Marktanteil von Elektrofahrzeugen besteht ein eindeutiger Zusammenhang. Im Rahmen einer Auswertung internationaler Daten wurden verschiedene Fördermaßnahmen quantifiziert, aggregiert und annualisiert. Abbildung 45 zeigt den eindeutigen Zusammenhang von Förderhöhe pro Jahr für Privatkunden und Anteil von Elektrofahrzeugen an den gesamten Neuzulassungen. In den Leitmärkten wird eine Bandbreite an verschiedenen Förderinstrumenten genutzt.

In Oslo, dem wichtigsten Markt in Norwegen, werden bei der Anschaffung die ansonsten sehr hohen Zulassungssteuern sowie die Mehrwertsteuer in Höhe von 25 % erlassen. Die Kraftfahrzeugsteuer ist reduziert und es gibt eine 50%-Minderung auf die Besteuerung der privaten Nutzung von Dienstwagen. Es werden keine Straßenbenutzungsgebühren (City-Maut, Bundesstraßen etc.) erhoben und die Fahrzeuge dürfen die für Busse und Taxis reservierten Fahrspuren mitbenutzen. Die Fahrzeuge dürfen gratis in der Stadt parken und bekommen den Strom an öffentlichen Ladestationen gratis. Zudem bezahlen E-Fahrzeuge keine Fährgelühren und dürfen während der Überfahrt kostenlos laden.

Rotterdam, ein weiterer europäischer Leitmarkt, profitiert von den staatlichen niederländischen Fördermaßnahmen. Die niederländischen

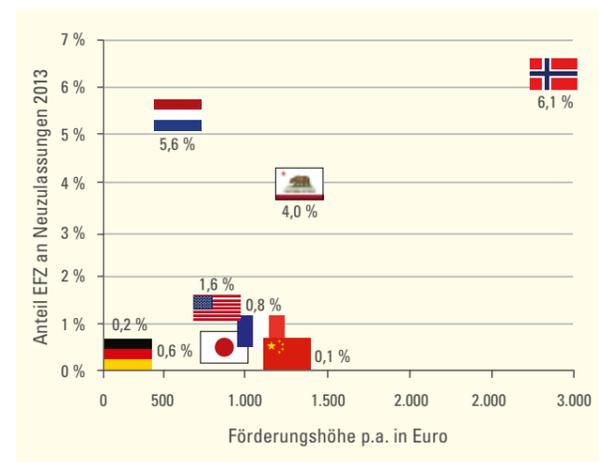


Abbildung 45: Einfluss der Förderung von Elektrofahrzeug-Privatkunden auf die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen.⁷¹

dische Regierung erlässt den Käufern von Elektrofahrzeugen die PKW-Kaufsteuer (Umsatz- und Einfuhrsteuer in Höhe von 42,5 %) und die Kfz-Steuer. Zudem werden die Steuersätze für die private Nutzung von Dienstwagen erheblich reduziert, sodass ein Großteil der in den Niederlanden zugelassenen Elektrofahrzeuge privat genutzte Dienstwagen sind [NPE (2014a)]. Zusätzlich zu den staatlichen Maßnahmen hat die Stadt Rotterdam ein eigenes Elektromobilitätsförderprogramm aufgelegt. So erhalten z.B. die ersten 5.000 gewerblichen Kunden bei Kauf eines Elektrofahrzeugs eine Abwrackprämie in Höhe von 2.500 Euro. Dies führt dazu, dass gewerbliche Fahrzeuge bis zu 75 % unter dem ursprünglichen Kaufpreis (zzgl. Batterieleasing) liegen können [Nissan (2014)]. Als weitere erfolgreiche Maßnahme hat sich der Rotterdamer Ansatz erwiesen, private Ladeinfrastruktur zu fördern und Elektrofahrzeugkäufern ohne private Lademöglichkeit eine öffentliche Lademöglichkeit in der Nähe des Wohnorts zu bieten.

In Kalifornien kommt zusätzlich zur US-amerikanischen „Kaufprämie“ in Form einer Steuergutschrift auf die Einkommenssteuer in Höhe von max. 7.500 US-Dollar noch eine kalifornische Kaufprämie in Höhe von max. 2.500 US-Dollar hinzu. Zudem wird in Kalifornien der Aufbau privater Ladeinfrastruktur (Home Charger) monetär gefördert und das Laden an öffentlichen Ladestationen ist häufig kostenfrei. Außerdem dürfen Elektrofahrzeuge auf kalifornischen Highways die sogenannte High-Occupancy-Lane sowie die High-Occupancy-Toll-Lane mitbenutzen, was einem dreistelligen monetären Gegenwert pro Jahr entspricht.

Deutschland fördert die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen monetär derzeit nur in geringem Maße durch die Befreiung von der Kfz-Steuer und den Nachteilsausgleich bei der Dienstwagenbesteuerung. Geplant ist es, die im Regierungsprogramm zur Elektromobilität bereits genannten Beschaffungsprogramme für öffentliche und industrielle Fuhrparks umzusetzen. Beispielweise hat die Bundesregierung 2012 die Initiative gestartet, bei Neufahrzeugen mehr als 10 % umweltfreundliche Fahrzeuge zu erwerben [NPE (2014a); Bundesregierung (2011)]. Die Nationale Plattform Elektromobilität schlägt darüber hinaus in ihrem Bericht 2014 vor, eine Sonder-AfA für gewerbliche Nutzer einzuführen und je nach Entwicklung des Markthochlaufs KfW-Kredite für Elektrofahrzeuge zu gewähren und die Kfz-Steuerbefreiung auf PHEV und REEV auszuweiten [NPE (2014a)]. Zur Förderung des Ladeinfrastruktur-

aufbaus schlägt die NPE unter anderem vor, das Wohnungseigentums- und Mietrecht zur Installation von Ladepunkten zu ändern, den Ladeinfrastrukturaufbau in Neu- und Umbauten in den Landesbauvorschriften zu berücksichtigen, auf die Versteuerung des geldwerten Vorteils beim Laden am Arbeitsplatz zu verzichten, die Steuergesetzgebung dahingehend zu erleichtern, dass Arbeitgeber ihren Arbeitnehmern eine Ladesäule zu Hause zur Verfügung stellen und pauschal Strom vergüten können, und die Genehmigungsverfahren für Ladeinfrastruktur zu beschleunigen [NPE (2014a)].

Mit der zunehmenden Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle nimmt in Deutschland die Diskussion um eine „Kaufprämie“ bzw. einen einmaligen monetären Vorteil beim Kauf des Fahrzeugs zu. Im Koalitionsvertrag vom Dezember 2013 wurden zwar nutzerorientierte Anreize angekündigt, eine Kaufprämie jedoch noch verneint [Bundesregierung (2013)]. Die Aussagen der im Rahmen dieser Studie befragten Experten in Kapitel 4.3 belegen jedoch die große Bedeutung, die Kaufprämien beigemessen wird.

Tabelle 46 zeigt die verschiedenen Maßnahmen zur Kaufförderung in Frankreich, Japan, USA und China. Die japanische Variante, 50 % der Deltakosten zwischen Elektro-/Hybridfahrzeug und konventionellem Fahrzeug zu fördern, ist aufgrund der damit verbundenen Dynamik eine sehr effiziente Variante und bietet sich als Vorbild für ein deutsches System an.

4.1.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Im internationalen Vergleich haben Deutschland und Baden-Württemberg die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in der Phase der Marktvorbereitung bis 2014 nur in unterdurchschnittlichem Maße gefördert. Mit dem Markthochlauf ab 2015 stellt sich die Frage einer aktiven Förderpolitik neu. Ein Großteil der Fördermaßnahmen ist Bestandteil nationaler Politik. Allerdings zeigen die internationalen Beispiele, dass es Kommunen/Regionen gibt, die es durch zusätzliche Förderung geschafft haben, Leitmärkte für Elektrofahrzeuge zu werden. Hierzu zählen insbesondere Oslo, Rotterdam, Amsterdam und Kalifornien. Die Kommunen Baden-

Land	Förderhöhe		Bemessungsgrundlage	Antragsstellung	Bewertung		
	BEV	Hybrid			Zielerreichung	Effizienz	Implementierungsanforderungen
Deutschland					keine Kaufförderung		
Frankreich	€ 7.000	€ 4.000	Emissionen in g/km	Direkt beim Händler oder nachträgliche Beantragung	++ Vollständige Zielerreichung ++ Schneller Wirkeintritt	++ Statisch effizient ++ Dynamisch effizient + Geringer Transaktionsaufwand	++ Hohe Flexibilität - Erhöhter Regulierungsbedarf - Verringerte Marktconformität
Japan	50 % des Differenzbetrags zwischen Elektro-/Hybridauto und konventionellem PKW		Abhängig vom Kaufpreis des Fahrzeugmodells	Antragstellung durch den Käufer mithilfe des Händlers	++ Vollständige Zielerreichung ++ Schneller Wirkeintritt	++ Statisch effizient ++ Dynamisch effizient + Geringer Transaktionsaufwand	++ Hohe Flexibilität ++ Geringer Regulierungsbedarf ++ Hohe Marktconformität
USA	€ 1.950 – 5.830 als Verrechnung mit Einkommenssteuer	Keine Kaufförderung	Batteriekapazität	Nachträgliche Beantragung durch Steuererklärung; bald direkt über Händler	++ Vollständige Zielerreichung ++ Schneller Wirkeintritt	++ Statisch effizient ++ Dynamisch effizient + Geringer Transaktionsaufwand	++ Hohe Flexibilität - Erhöhter Regulierungsbedarf + Hohe Marktconformität
China	€ 2.500 – € 7.500	€ 1.900 – € 6.250	Batteriekapazität	Nachträgliche Beantragung bei Regierung, wobei Händler dies i.d.R. übernimmt	- Geringe Zielerreichung ++ Schneller Wirkeintritt	++ Statisch effizient ++ Dynamisch effizient + Geringer Transaktionsaufwand	++ Hohe Flexibilität - Erhöhter Regulierungsbedarf - Nicht marktconform

Tabelle 46: Kaufförderung von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Ländern.⁷²

⁷¹ Eigene Darstellung auf Basis eigener Berechnungen unter der Annahme einer Nutzungsdauer von 7 Jahren und einer Zugrundelegung eines Renault Zoe als Referenzfahrzeug. Anm.: Trotz der niedrigen Förderhöhe ist der Anteil an Neuzulassungen in den Niederlanden vergleichsweise hoch. Dies liegt darin begründet, dass in den Niederlanden zusätzlich zu der hier abgebildeten Förderung weitere Förderungen auf kommunaler Ebene, Subventionierungen von als Taxis/Lieferfahrzeuge genutzten EFZ, eine steuerliche Besserstellung von privat genutzten Firmen-EFZ sowie eine steuerliche Begünstigung für gewerbliche Halter existieren.

⁷² Teichmann (2014).

Kapitel 4

Württembergs haben mit dem Elektromobilitätsgesetz von 2015 an die rechtliche Möglichkeit, Elektrofahrzeuge in erheblichem Maße zu privilegieren. Neben kostenfreiem Parken zählt hierzu die Nutzung von Busspuren und Ausnahmen bei Lärm- und Abgasschutzzonen, z.B. für den Lieferverkehr. Eine weitere Möglichkeit ist neben der Förderung des öffentlichen Infrastrukturaufbaus die Förderung des privaten Infrastrukturaufbaus, z.B. Wallboxes in

Ein- und Mehrfamilienhäusern. Ein geeignetes Maßnahmenbündel von staatlichen und kommunalen Maßnahmen könnte die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in Baden-Württemberg in den nächsten Jahren erheblich erhöhen.

4.2 BADEN-WÜRTTEMBERG AUF DEM WEG ZUM LEITANBIETER

Die Nationale Plattform Elektromobilität sieht Deutschland bezüglich einer Leitanbieterschaft im Bereich Elektromobilität bereits in einer führenden Position, während sie im Wettbewerb um den Leitmarkt anderen Ländern einen deutlichen Vorsprung zugesteht. Die Chancen auf einen hohen Anteil an den global produzierten Elektrofahrzeugen haben sich in den letzten Jahren für Deutschland erheblich verbessert. Anfang 2014 lag Deutschland bezüglich der Elektrofahrzeug-Produktionsplanzahlen für 2019 (5-Jahres-Horizont) weltweit an zweiter Stelle. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund bedeutsam, dass Deutschland derzeit noch einen Nischenanteil an der Produktion von Elektrofahrzeugen hat [McKinsey (2014)]. Eine Untersuchung des Fraunhofer ISI sieht Baden-Württemberg hinsichtlich der Leitanbieterkriterien „Produktion von Fahrzeugen und Schlüsselkomponenten“ sowie „Forschung und Entwicklung“ im Mittelfeld eines internationalen Vergleichs. Nachfolgende Abbildung 48 fasst die wesentlichen Ergebnisse des Benchmarks zusammen.

Als wesentliche Wertschöpfungssegmente in Bereich der Elektrofahrzeuge wurden in Kapitel 3 unter anderem die Nebenaggregate, das Thermomanagement und die Kernkomponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs, die elektrische Maschine, die Leistungselektronik sowie die Traktionsbatterie ausgewiesen. Baden-Württemberg mit seinen spezifischen Kompetenzen hat insbesondere in nachfolgenden Wertschöpfungssegmenten gute Chancen auf eine Leitanbieterschaft:

- Anlagenbau in den Bereichen Batterie, Leistungselektronik und elektrische Maschine
- Entwicklung und Herstellung von Aktivmaterialien für Batteriezellen
- Montage von Batteriemodulen und -systemen sowie Fahrzeugintegration des Systems
- Herstellung leistungselektronischer Komponenten
- Fertigung, Montage und Qualitätssicherung elektrischer Maschinen
- Herstellung von Nebenaggregaten und Komponenten für Thermomanagementlösungen

In den genannten Bereichen gibt es eine Reihe von erfolgversprechenden Forschungsprojekten und Initiativen in Baden-Württemberg, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

schung damit verbundener Inhalte wurde in Karlsruhe eigens eine Demonstrator-Produktionsanlage für großformatige Pouchzellen aufgebaut [Competence E (2014)].

Das im Rahmen von „Competence E“ verankerte Projekt MAT4BAT (Advanced Materials for Batteries) hat sich die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien mit Batterielebensdauern von mindestens 4.000 Zyklen bei 80 % Entladetiefe über 10 bis 15 Jahre zum Ziel gesetzt. Dafür ist es nötig, das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien zu verstehen. Darauf aufbauend werden neuartige Zellkonzepte basierend auf neuen Materialien und Prozessen entwickelt. Neben der Lebensdauer werden darüber hinaus weitere Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit sowie wirtschaftliche und ökologische Aspekte berücksichtigt. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3,5 Jahren (01.09.2013 bis 28.02.2017) und ein Volumen von 11,5 Millionen Euro [Competence E (2014a)]. Alle Unterprojekte des Projekts „Competence E“ des KIT beschäftigen sich mit wichtigen und zukunftsweisenden Themen. Vor allem durch die ganzheitliche und vollständige Integration aller Prozesse entlang der Wertschöpfungskette können interdisziplinäre Lösungen entwickelt werden, die bei separater Arbeit aller Fachbereiche möglicherweise nicht erreichbar gewesen wären. Sollte es gelingen, die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien zu erhöhen, wäre dies ein wichtiger Schritt, die Attraktivität batteriebetriebener Fahrzeuge zu erhöhen und Baden-Württemberg als Forschungsstandort zu bestätigen.

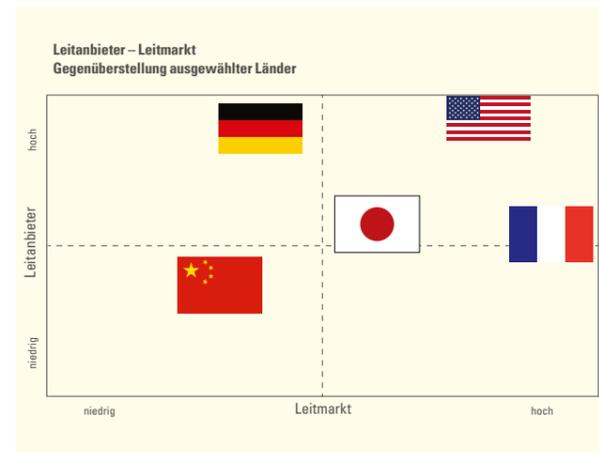


Abbildung 47: Internationaler Vergleich von Leitmärkten und Leitanbietern.⁷³

Region	Anwendung und Infrastruktur		Produktion von Fahrzeugen und Schlüsselkomponenten		Forschung und Innovation		Region	Anwendung und Infrastruktur		Produktion von Fahrzeugen und Schlüsselkomponenten		Forschung und Innovation	
	Elektrofahrzeuge	Infrastruktur	Fahrzeugproduktion	Anzahl Fahrzeugmodelle (alternativer Antrieb)	Patente	Publikationen		Elektrofahrzeuge	Infrastruktur	Fahrzeugproduktion	Anzahl Fahrzeugmodelle (alternativer Antrieb)	Patente	Publikationen
Baden-Württemberg	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Osaka-Kyoto (Japan)	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Paris (Frankreich)	k.A.	k.A.	↘	↘	↘	↘	Tokio (Japan)	k.A.	k.A.	↘	↘	↘	↘
Boston (USA)	k.A.	↗	↘	↘	↘	↘	Seoul (Südkorea)	k.A.	↘	↗	↘	↘	↘
Detroit (USA)	k.A.	↘	↗	↗	↘	↗	Beijing (China)	k.A.	↘	↘	↘	↘	↘
Los Angeles (USA)	↗	↘	↘	↘	↘	↘	Guangzhou (China)	k.A.	k.A.	↗	↘	↘	↘
New York (USA)	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Shanghai (China)	↘	↘	↗	↘	↘	↘
San Francisco (USA)	↗	↗	↘	↘	↘	↘	Tianjin (China)	k.A.	↘	↘	↘	↘	↘
Toronto (Kanada)	k.A.	↘	↘	↘	↘	↘	Hsin-Chu (Taiwan)	k.A.	k.A.	↘	↘	↘	↘
Aichi (Japan)	k.A.	k.A.	↗	↗	↗	↘							

Abbildung 48: Internationaler Vergleich von Regionen.⁷⁴

⁷³ Eigene Darstellung auf Basis von NPE (2014a).

⁷⁴ Fraunhofer ISI (2014).

Kapitel 4

Jahren (ab Januar 2015) verpflichtet, aktiv an dem Projekt teilzunehmen. Lithium-Ionen-Batterien sind sowohl für moderne Hybridautos, reine Batteriefahrzeuge, Anwendungen aus dem Nutzfahrzeugbereich als auch für die dezentrale Speicherung von Strom aus Fotovoltaikanlagen wichtig. Sollte es gelingen, hierfür technologisch überlegene Batterien zu entwickeln und gleichzeitig eine wirtschaftliche Großserienproduktion zu etablieren, könnte Baden-Württemberg zum Leitanbieter im Bereich Batterietechnik und somit auch zum Leitanbieter im kompletten Bereich der Elektromobilität werden [ZSW (2014a)].

BATTERIEZELLE/AKTIVMATERIALIEN:

PROJEKT LuLi – STROM AUS LUFT UND LITHIUM

Heutige Zellchemien werden den Anforderungen der Automobilindustrie hinsichtlich Gewicht, Reichweite und Wiederaufladezeiten noch nicht vollumfänglich gerecht. Lithium-Luft-Batterien könnten eine erfolgversprechende Alternative sein. Insbesondere die Tatsache, dass als Oxidationsmittel keine Schwermetallverbindung mehr eingesetzt wird, sondern der aus der Luft entnehmbare und viel leichtere Sauerstoff, eröffnet die theoretische Möglichkeit der Erreichung von Reichweiten von weit über 500 km.

In dem Projekt „LuLi – Strom aus Luft und Lithium“ sollen Lithium-Luft-Akkus als Energiespeicher für elektrisch betriebene Fahrzeuge erforscht werden. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Beim ersten Konzept wird die Sauerstoffreduktion direkt in nicht-wässrigen Elektrolyten durchgeführt, beim zweiten Ansatz wird versucht, die Sauerstoffreduktion in wässrigen Elektrolyten durchzuführen. Der zweite Ansatz hat den Vorteil, dass er technisch einfacher und besser erforscht ist. Grundsätzlich muss jedoch gesagt werden, dass die Grundlagen der entsprechenden Technologie, speziell der Sauerstoffreduktion (und der Sauerstoffentwicklung beim Ladevorgang), unter den für Lithium-Akkus nötigen Bedingungen und Einsatzmöglichkeiten bisher kaum bekannt und erforscht sind. Zur Erforschung dieser Thematik haben sich fünf Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen: Universität Bonn, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart, Universität Stuttgart, Universität Ulm, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Finanziert wird das Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Forschungszentrum Jülich [DLR (2013); Universität Bonn (2014)]. Sollte es mittels dieses Projekts gelingen, die Grundlagen und Technologien der Luft-Lithium-Akkus zu ver-

stehen und anzuwenden, so könnte ein Durchbruch hinsichtlich der Abbildung größerer Reichweiten in Elektrofahrzeugen erzielt werden. Baden-Württemberg könnte dadurch eine führende Rolle im Bereich von Post-Lithium-Ionen-Technologien einnehmen.

ALTERNATIVE SPEICHERTECHNIKEN: PROJEKT PowerCaps

Im Rahmen des Projekts „PowerCaps“ sollen Batterien entwickelt werden, die das sekunden- bzw. minutenschnelle Aufladen ermöglichen und sich darüber hinaus durch eine geringe Selbstentladung auszeichnen. Die hybriden Speichertechniken kombinieren die Vorteile von Superkondensatoren und Batterien. Ziel des Projekts, das 2015 in die zweite Phase geht, ist die Überführung von Powercaps in die Serienreife. Hierzu müssen geeignete Materialien, Komponenten und Fertigungsverfahren entwickelt werden. Das Projekt gehört zum übergeordneten Forschungsprojekt „FastStorageBW“, das von Fraunhofer IPA, Varta Microbattery, Universität Stuttgart, Fraunhofer ICT, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) sowie Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam durchgeführt wird. Das Gesamtvolumen beträgt in den nächsten drei Jahren insgesamt 60 Millionen Euro. Das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg fördert das Projekt mit rund 25 Millionen Euro. Die Powercaps ermöglichen durch die schnelle Aufladung (im Sekundenbereich) und die hohe Lebensdauer (> 100.000 Zyklen) neue Konzepte der Energierückgewinnung und -speicherung. Des Weiteren werden eine hohe Zuverlässigkeit und eine im Vergleich zu heutigen Lithium-Ionen-Systemen deutlich verbesserte Sicherheit betont. Die Energiedichte der Powercaps soll vergleichbar sein mit der von herkömmlichen Batterien bei einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren (Lebensdauer herkömmlicher Batterien: 3 bis 8 Jahre). Zusätzlich sollen die Powercaps eine höhere Temperaturbeständigkeit als heutige Batterien haben und sich durch die Möglichkeit auszeichnen, ihre Ladung über mehrere Wochen ohne nennenswerte Verluste durch Selbstentladung halten zu können. Das Marktpotenzial für die Technologie liegt laut Experten in den nächsten vier bis sechs Jahren bei zwei bis drei Milliarden Euro [Fraunhofer IPA (2014)].

ANTRIEB/E-MASCHINEN-HERSTELLUNG:

PROJEKT e-generation

Die breite Durchsetzung der Elektromobilität wird aktuell noch durch die Kritikpunkte der zu geringen Reichweite, der hohen Kos-

ten und der fehlenden Alltagstauglichkeit verhindert. Hier setzte das Projekt „e-Generation“ an. Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer neuen Generation von Komponenten für Elektrofahrzeuge. Die Komponenten sollten bezüglich Effizienz und Gewicht optimiert werden, um die Reichweite, Kosten, Alltagstauglichkeit und Zuverlässigkeit zu verbessern. Außerdem wurde analysiert, inwieweit Modularisierung und Komponentenbaukästen dazu beitragen, Kostenverbesserungen und andere Optimierungen zu erreichen. Das Projekt wurde in sieben Teilprojekte aufgeteilt, in denen definierte Kernthemen intensiver bearbeitet wurden. Das Projekt hatte eine Laufzeit von 3 Jahren (1/2012 bis 12/2014) und ein Gesamtbudget von 39 Millionen Euro, welches jeweils zur Hälfte vom Bundesministerium für Forschung und Bildung und von den Projektpartnern getragen wurde. Projektpartner waren Porsche Engineering Group GmbH, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Volkswagen AG, Robert Bosch GmbH, MAHLE Behr GmbH & Co. KG, ZF Friedrichshafen AG, Infineon Technologies AG, ascs, Fraunhofer LBF, Universität Ulm, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Technische Universität Dresden, Karlsruher Institut für Technologie, RWTH Aachen und Technische Universität Braunschweig. Durch die Betrachtung sämtlicher Funktionsbereiche vom Antriebsstrang über Elektronik bis zum Energiemanagement wurde eine ganzheitliche Betrachtung des Problems sichergestellt und so auch umfassende und völlig neue Lösungen ermöglicht [GGEMO (2013)].

Neben den bereits skizzierten Projekten werden im Zeitraum von 2012 bis Ende 2015 Projekte im Rahmen der ersten von zwei Phasen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West gefördert. Nachfolgend werden ausgewählte Vorhaben aus der ersten Phase mit besonderem Bezug zu den wesentlichen Wertschöpfungssegmenten vorgestellt.

BATTERIE MODULMONTAGE/ANLAGENBAU:

PROJEKT AutoSpEM

Derzeit sind die Produktionskosten zur Herstellung von großformatigen Automotive-Batteriespeichern in Deutschland noch zu hoch. Problematisch ist vor allem, dass einzelne Arbeitsvorgänge noch manuell durchgeführt werden müssen. An diesem Punkt setzt das Projekt „AutoSpEM“ („Automatische Handhabung zur Prozesssicheren und wirtschaftlichen Herstellung von Speicherbatterien für die Elektromobilität“) an. Das Projekt hat das Ziel, Produkti-

onsprozesse und Fertigungstechnologien für eine automatisierte Batteriemodulherstellung sowie ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem zu entwickeln. Als Ergebnis entstehen Demonstratoren für die unterschiedlichen Fertigungs- und Montageschritte von der Entnahme einzelner Zellen bis zur Handhabung von Batteriemodulen. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3 Jahren (12/2012 bis 11/2015) und wird von den Partnern Schunk GmbH & Co KG, ads-tec GmbH, Dürr Systems GmbH, Festo AG & Co KG, teamtechnik GmbH und Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West mit 1,5 Millionen Euro. Das Projekt AutoSpEM leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung einer automatisierten Produktion von Batteriemodulen [Produktion.de (2013)].

BATTERIE SYSTEMMONTAGE/ANLAGENBAU: PROJEKT ProBat

Der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in automobilen Anwendungen stellt hohe Anforderungen an die Einheiten bezüglich Sicherheit, Zuverlässigkeit und Leistungs- bzw. Energiedichte. Im Rahmen des Projekts „ProBat“ („Projektiertung qualitätsorientierter, serienflexibler Batterieproduktionssysteme“) werden Konzepte und Instrumente zur Planung sowie Steuerung einer qualitätsorientierten Batteriesystemherstellung erforscht. Hierfür werden Anlagenlayouts und Qualitätssicherungssysteme bezüglich Sicherheit und Effizienz untersucht, bewertet und in einem softwarebasierten Planungswerkzeug gebündelt. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3 Jahren (08/2012 bis 07/2015) und wird von den Partnern Dürr Systems GmbH, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Daimler AG und Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Das BMBF fördert das Projekt im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West mit 1,7 Millionen Euro für drei Jahre. Durch die Arbeiten im Projekt wird ein wesentlicher Grundstein zur Steigerung der Effizienz zukünftiger Serienherstellungen von Batteriesystemen gelegt [KIT (2012)].

LEISTUNGSELEKTRONIK UND NEBENAGGREGATE:

PROJEKT InnoROBE

Elektrische Systeme erzeugen nur wenig Abwärme, die zur Beheizung der Fahrgastzelle genutzt werden könnte. Der Energiebedarf der Nebenverbraucher (z.B. Klimaanlage) stellt somit neben den hohen Batteriekosten ein entscheidendes Problem von Elektrofahrzeugen dar. Zur Lösung des Problems ist es nötig, grundsätz-

Kapitel 4

liche Lösungen für die gezielte Lenkung der vorhandenen bzw. benötigten Energieflüsse im Fahrzeug und für das Thermomanagement zu entwickeln. Durch die Nutzung kleiner autarker Energiewandlersysteme (On-Board-Ladesysteme) soll der Energiebedarf der Nebenverbraucher eines Autos (z.B. Klimaanlage) im Fahrzeug selbst bereitgestellt werden. Das Projekt „InnoROBE“ („Innovative Regenerative On-Board-Energiewandler“) erforscht dazu ein Brennstoffzellensystem mit entsprechendem DC/DC-Wandler und einem Verbrennungsmotor mit Generator und Inverter. Dabei ist der Einsatz regenerativer Kraftstoffe, d.h. Methan beim Verbrennungsmotor und Wasserstoff bei der Brennstoffzelle, vorgesehen. Das Projekt hat eine Laufzeit von drei Jahren (08/2012 bis 07/2015) und ein Volumen von 4,1 Millionen Euro. 2,05 Millionen Euro beträgt die Förderung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West. Das Projekt wird von den Partnern GreenIng GmbH und Co. KG, Robert Bosch GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Fraunhofer ICT durchgeführt. Das Projekt könnte bei erfolgreichem Verlauf die Kosten und die Ladezeit reduzieren und gleichzeitig zur Reichweitenerhöhung beitragen [Fraunhofer ICT (2012)].

LEISTUNGSELEKTRONIK/LADETECHNIK: PROJEKT BIPoLplus

Zur Erhöhung der Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen ist es nötig, den Ladevorgang möglichst kundenfreundlich zu gestalten. Insbesondere die langen Ladezeiten und das aufwendige Handtieren mit Ladekabeln werden als unkomfortabel empfunden. Ein Schnellladesystem mit hoher Ladeleistung und berührungsloser Energieübertragung bei deutlich reduzierter Ladezeit bringt für den Anwender und Benutzer deutliche Verbesserungen. Inhalt des Projekts „BIPoLplus“ („Berührungsloses, induktives und positionstolerantes Laden“) ist die Erforschung und Entwicklung eines induktiven Ladesystems für batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Übertragungsleistung von bis zu 22 kW. Dabei wird die Optimierung von Bauraum, Gewicht und Sicherheitsaspekten angestrebt. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3 Jahren (01/2013 bis 12/2015). Im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West wird das Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit insgesamt rund 5,1 Millionen Euro gefördert. Projektbeteiligte sind Daimler AG, EnBW AG, IPT GmbH, Porsche Engineering Group GmbH, Robert Bosch GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Karlsruher Institut für Technologie und

Universität Stuttgart. Das Projekt bietet Baden-Württemberg die Chance, im Bereich des induktiven Ladens einen Kompetenzvorsprung aufzubauen und damit in einer möglichen Zukunftstechnologie der Elektromobilität die Leitanbieterschaft zu erreichen [Universität Stuttgart (2013)].

E-MASCHINEN-HERSTELLUNG/ANLAGENBAU:

PROJEKT Epromo

Im Projekt „Epromo“ („Erforschung eines prozessmodularen Fertigungskonzepts für die E-Motoren-Fertigung“) wird an neuen Fertigungs- und Montagekonzepten im Rahmen der E-Motoren-Herstellung geforscht. Ziel ist hierbei die wirtschaftliche Durchführung der Herstellungsprozesse unter Berücksichtigung des sich langsam entwickelnden Markthochlaufs elektrischer Fahrzeuge. Aufbauend auf einer Analyse von Zukunftsszenarien zu Bauformen und Stückzahlen elektrischer Antriebe, werden ein zukunftsfähiges, modulares Anlagenkonzept entwickelt sowie ausgewählte Schlüsselprozesse in Form von physischen Demonstratoren abgebildet. Das Konzept kann flexibel an verschiedene Stückzahlbereiche und Varianten angepasst werden und bietet somit die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Herstellung der Antriebseinheiten in den kommenden Jahren. Das Projekt wird im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit insgesamt 1,8 Millionen Euro gefördert. Projektbeteiligte sind Daimler AG, teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH, Faude Automatisierungstechnik GmbH, MAG IAS GmbH, WITTENSTEIN cyber motor GmbH sowie die Fraunhofer-Institute IAO und IPA [Butov et al. (2014)].

THERMOMANAGEMENT: PROJEKT GaTE

Mittels des Projekts „GaTE“ (Ganzheitliches Thermomanagement im E-Fahrzeug) soll ein optimiertes Thermomanagementkonzept für Elektrofahrzeuge erarbeitet werden. Dabei soll der elektrische Energiebedarf für die Fahrzeugklimatisierung und die Temperierung der Antriebskomponenten gegenüber aktuellen Lösungen reduziert und minimiert werden. Die Projektpartner erhoffen sich dabei eine erhebliche Steigerung der Reichweite, insbesondere im Winterbetrieb. Durch die Erforschung und Entwicklung einer Wärmepumpe, bei der das Kühlmittel als Wärmequelle und Wärmesenke genutzt wird, und durch die Entwicklung eines neuen Ventilkonzepts soll erreicht werden, dass Elektrofahrzeuge im Winter energieeffizient und kostengünstig heizbar und im Sommer kühlbar

sind. Eine neuartige und innovative Beschlag-Sensorik soll darüber hinaus das Beschlagen der Windschutzscheibe verhindern, da durch die zusätzliche Erhöhung des Umluftanteils, mittels dessen eine Reduzierung der Antriebsleistung und somit eventuell der Batteriekosten erreicht werden soll, eine erhöhte Beschlagsneigung zu erwarten ist. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3 Jahren (07/2012 bis 06/2015) und ein Volumen von 5,8 Millionen Euro. Gefördert wird das Projekt vom BMBF im Rahmen des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West mit 2,9 Millionen Euro. Projektpartner sind MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Robert Bosch GmbH, Daimler AG, FKFS Stuttgart und sitronic GmbH & Co. KG. Das Projekt „GaTE“ eröffnet Potenziale zur Erhöhung von Energieeffizienz, Sicherheit und Komfort bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten. Durch das im Projekt erforschte ganzheitliche Thermomanagementsystem kann die Leistung des Heizsystems im Winter um bis zu 60 % reduziert werden. Daraus kann eine Steigerung der Reichweite um bis zu 25 % erzielt werden [FKFS (2012)]. Die dargestellten Projekte haben einen hohen Innovationsgrad und zeigen, dass Baden-Württemberg in wesentlichen Wertschöpfungssegmenten (vgl. Kapitel 3) das Potenzial hat, zu einem der Leitanbieter zu avancieren.



Bemerkenswert ist dabei, dass Baden-Württemberg auch im Bereich der Traktionsbatterie relevante Wertschöpfungssegmente besetzen kann, auch wenn es derzeit keine Automotive-Zellfertigung auf Lithium-Ionen-Basis in Baden-Württemberg gibt.

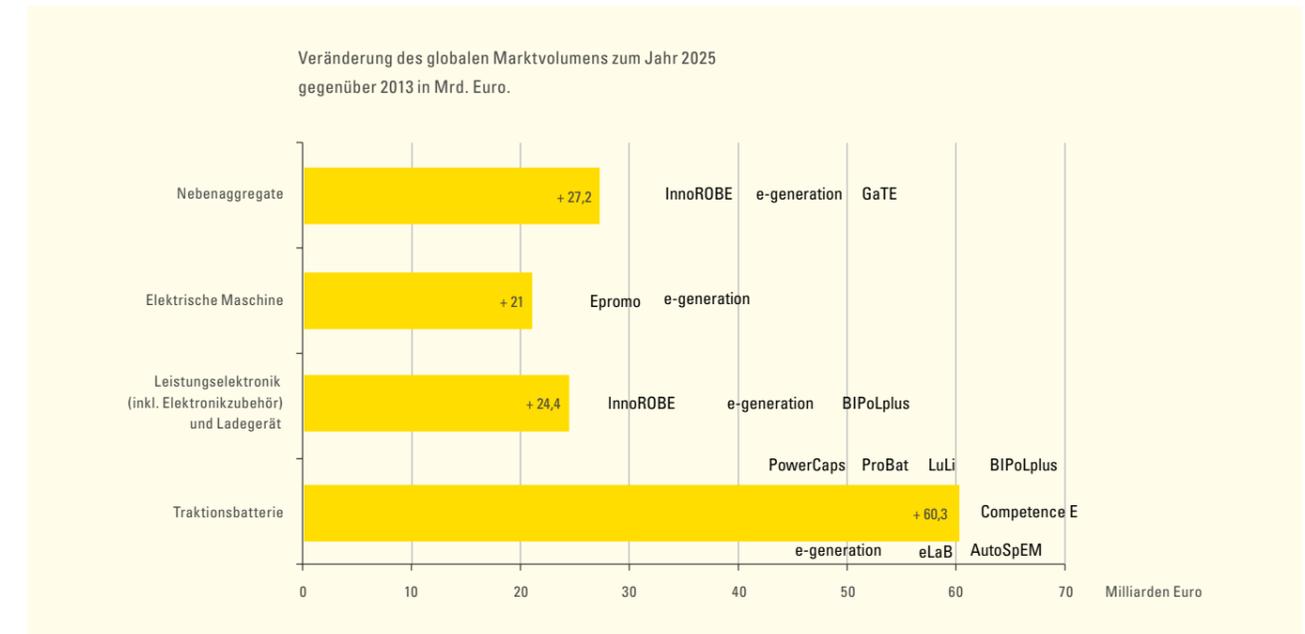


Abbildung 49: Projekte in Baden-Württemberg in wichtigen Wertschöpfungssegmenten.⁷⁵

⁷⁵ Eigene Darstellung.

4.3 EXPERTENBEFRAGUNG ZUM STATUS QUO DER ELEKTROMOBILITÄT

Neben einer ausführlichen Betrachtung aktueller Technologietrends und deren Folgen für die Wertschöpfungschancen im Land Baden-Württemberg war es Ziel der diesjährigen Strukturstudie, den Status quo des Gesamtsystems Elektromobilität aus Sicht verschiedener Akteure beurteilen zu lassen. Zu diesem Zweck wurden Experteninterviews mit führenden Persönlichkeiten auf dem Gebiet der Mobilität und des Fahrzeugbaus durchgeführt. Im Fokus stand hierbei die Einschätzung der Experten, wie sich Markt, Technologie und Forschung im Bereich Elektromobilität seit Erscheinen der ersten Strukturstudie 2009 weiterentwickelt haben. Zudem wurde gefragt, welchen Herausforderungen die jeweiligen Akteure aktuell gegenüberstehen und welche Handlungsfelder im Bereich der politischen Förderung in den nächsten Jahren als besonders relevant einzustufen sind.

Zur Teilnahme am Interview haben sich freundlicherweise bereit erklärt:



Dr. Volkmar Denner ist seit Juli 2012 Vorsitzender der Geschäftsführung der Robert Bosch GmbH. Er verantwortet unter anderem die zentralen Funktionen Forschung und Vorausentwicklung, Koordination Technik sowie Neue Arbeitsgebiete.



Karl Schmauder ist seit 2005 im Vorstand der ElringKlinger AG verantwortlich für den Vertrieb Erstausrüstung und den Bereich Neue Geschäftsfelder.



Winfried Hermann (Bündnis 90/Die Grünen) ist seit Mai 2011 Minister für Verkehr und Infrastruktur in Baden-Württemberg.



Dr. Nils Schmid (SPD) ist seit Mai 2011 stellvertretender Ministerpräsident sowie Minister für Finanzen und Wirtschaft in Baden-Württemberg.



Siegbert Lapp ist seit 1987 Vorstand und Geschäftsführer aller Produktionswerke der Lapp Gruppe. Zudem ist er Vorstand der Wirtschafts- und Industrievereinigung Stuttgart (WIV).



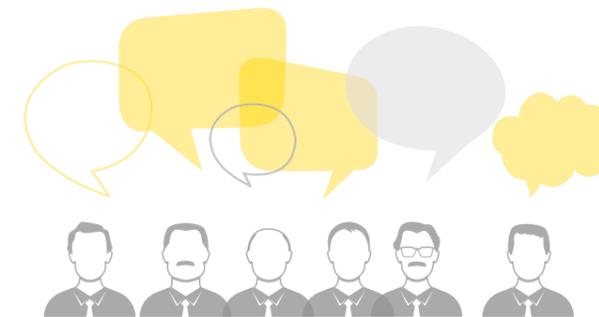
Prof. Dr. Thomas Weber ist seit Januar 2003 Vorstandsmitglied der Daimler AG und in dieser Funktion seit 1. Mai 2004 verantwortlich für Konzernforschung & Mercedes-Benz Cars Entwicklung.

4.3.1 RÜCKBLICK, STATUS QUO UND AUSBLICK ZUM STAND DER ELEKTROMOBILITÄT IN DEUTSCHLAND UND BADEN-WÜRTTEMBERG

Gefragt nach dem Gesamteindruck vom Stand der Elektromobilität, waren sich die befragten Experten darüber einig, dass sich das Thema in den vergangenen fünf Jahren vom begeisterten Hype über eine Phase der Ernüchterung nach dem Motto „Das wird ja doch alles nichts“ mittlerweile als fester Bestandteil in Technologie-Roadmaps und F&E-Strategien der Unternehmen etabliert habe. Zwar entsprechen die Zulassungszahlen bisher nicht den Erwartungen, die vom ehrgeizigen Ziel der Bundesregierung geschürt wurden, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, jedoch sei der technologische Fortschritt, gerade im Bereich der Serienfertigung von Elektrofahrzeugen, sehr positiv zu bewerten. Auch im Hinblick auf den internationalen Wettbewerb habe Deutschland in dieser Zeit einen erheblichen Fortschritt erzielt, sodass die einstige Debatte um den „verpassten Anschluss“ deutscher Hersteller seit 2009 kontinuierlich an Brisanz verloren habe:

»Vor fünf Jahren gab es noch die große Diskussion, ob wir in Europa den Rückstand auf die japanischen Hersteller überhaupt noch aufholen können. Ich meine, wir haben den Beweis überzeugend geliefert, dass wir das können.«

Dr. Volkmar Denner, Bosch GmbH



Wie hat sich das Thema Elektromobilität in den vergangenen fünf Jahren entwickelt?

Dr. Volkmar Denner

„Wir befinden uns derzeit im **Übergang von der Entwicklungsphase in die Markthochlaufphase**. Auch wenn manchmal die Wahrnehmung vorherrscht, es gehe alles zu langsam; ich finde, wenn man sich die Zahlen vergegenwärtigt, dann **hat sich schon enorm viel getan**. Die breite Palette an elektrifizierten Fahrzeugen zeigt, dass sich vieles positiv entwickelt hat.“

Winfried Hermann

„Aus meiner Sicht gehen die **Wahrnehmung und die tatsächliche Entwicklung etwas auseinander**. Ich habe den Eindruck, dass das Thema in der Öffentlichkeit an Fahrt verliert. Auch weil es für viele Menschen immer noch nicht sichtbar genug ist. Aber aus fachlicher Sicht ist das Thema sehr dynamisch und bewegt sich **ganz im Rahmen dessen, was man von so einer technischen Entwicklung erwarten kann**.“

Siegbert Lapp

„Ich denke, es hat sich in den letzten fünf Jahren einiges geändert. Das Thema ist nun **überall angekommen**. Auch wenn einem Elektrofahrzeug außerhalb der größeren Städte immer noch hinterhergeschaut wird; es hat sich vieles im öffentlichen Bewusstsein getan, **obwohl es noch nicht für jeden alltäglich ist**.“

Karl Schmauder

„Vor etwa fünf Jahren gab es diesen großen **Hype** auf allen Messen und Tagungen, dann eine **Phase der Depression** und nun würde ich sagen, dass wir in der Realität angekommen sind. Man hat mittlerweile wohl auch erkannt, dass es **kein 100-Meter-Lauf ist, sondern eher ein Marathon**. Und dementsprechend braucht man auch einen **langen Atem**, um die großen technischen und kommerziellen Herausforderungen zu bewältigen.“

Dr. Nils Schmid

„Vor fünf Jahren war die Elektromobilität noch ein **fernes Zukunfts- und Forschungsthema**. Inzwischen sind aber **zahlreiche Unternehmen** bereits mit Produkten und Lösungen erfolgreich am Markt tätig. Und das sind nicht nur die großen Player, sondern auch die vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen. Damit hat die **Elektromobilität bereits Wertschöpfung und Arbeitsplätze im Land geschaffen**.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Als unser smart electric drive vor fünf Jahren in zweiter Generation auf den Markt kam, gab es darüber hinaus fast **nur Showcars**. Zu diesem Zeitpunkt konnten wir bereits wichtige Erkenntnisse aus dem mehrjährigen Kundenbetrieb unserer Testflotte gewinnen. Inzwischen sind wir in der dritten Generation am Markt und haben über 10.000 Fahrzeuge an unsere Kunden in aller Welt ausgeliefert. Viele Hersteller sind jetzt in der **Serienphase** angekommen, wenn auch auf einem wesentlich niedrigeren Stückzahlenniveau als von vielen erhofft. **Bis zu der von der Bundesregierung angestrebten einen Million ist es allerdings noch ein weiter Weg**.“

Tabelle 50: Wie hat sich das Thema Elektromobilität in den vergangenen fünf Jahren entwickelt?

Kapitel 4

Beim Automobilzulieferer Bosch kann man anhand der Entwicklung der Produktpalette gut illustrieren, in welchem Maße elektrische Antriebe bereits ihren Platz im Markt eingenommen haben. Während das erste Plug-in-Serienfahrzeug mit Bosch-Technologie 2010 auf den Markt kam, waren Ende des Jahres 2014 bereits 30 Serienprojekte im Bereich der Elektromobilität realisiert. Ein Wachstum, welches die Bedeutung des Themas aufseiten der großen Unternehmen anschaulich demonstriert.

Während der technologische Fortschritt positiv stimmt, bleibt die Akzeptanz beim Endnutzer noch immer hinter den Erwartungen zurück. So stehen Kaufpreis und Reichweite nach wie vor nicht in einem derart attraktiven Verhältnis, dass der Markthochlauf die erwartete Dynamik zeigt.

Die wesentlichen Ursachen für die anhaltende Trägheit des Markts sehen die Experten jedoch an verschiedenen Stellen. Weshalb sich auch die Lösungsvorschläge, wie man diese Trägheit überwinden und den Markt am wirksamsten anschieben könnte, voneinander unterscheiden:

Wo sehen Sie die Gründe für die bisher so geringen Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen?

Dr. Volkmar Denner

„Man muss das Thema **Elektromobilität viel breiter denken** und Produkte anbieten, bei denen die **Beschränkungen**, über die wir heute noch klagen, **keine Rolle spielen**. Ein wesentlicher Grund für den Erfolg von Elektromobilität bei Zweirädern ist das Thema **Emotion**. Heute rüsten wir Mountainbikes mit Elektromotoren aus und überzeugen auch sportliche Fahrer davon, mit einem E-Bike zu fahren. Diese **emotionale Attraktivität** müssen wir bei den Fahrzeugen auch schaffen.“

Winfried Hermann

„Natürlich sind die **Vorteile von Elektrofahrzeugen für viele noch nicht ausreichend**, um die Mehrkosten in Kauf zu nehmen. Allerdings habe ich auch den Eindruck, dass es **noch nicht ausreichend kommuniziert wird**, dass es durchaus gelingen kann, mit den **eingesparten Treibstoff- und Werkstattkosten** zumindest nicht wesentlich über den Kosten eines Verbrenners zu liegen. In der Öffentlichkeit herrscht immer der direkte Vergleich der Kaufpreise vor. Auch wenn ich es nicht zu rosig malen will, aber die **Betriebskostensparnis wird zu wenig in den Vordergrund gerückt**.“

Tabelle 51: Wo sehen Sie die Gründe für die bisher so geringen Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen?

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Elektrofahrzeuge verkaufen sich gut. 2013 in den USA:

Tesla Model S	17.650	
Mercedes-Benz S-Klasse	13.300	
BMW 7er	10.930	
Audi A8	6.300	

(Michael Freitag, Manager Magazin, 2014)

Siegbert Lapp

„Ich glaube, wenn man bei der **Batterietechnik** mal so weit ist, dass man einen **Radius von 200 bis 300 km** anbieten kann, dann ist das Thema Reichweite für niemanden mehr ein Hinderungsgrund, ein Elektrofahrzeug zu kaufen.“

Karl Schmauder

„Ich empfinde die **Marktanreize**, die nun gesetzt werden sollen, als **völlig unzureichend, um der Technologie den nötigen Drive zu geben**. Ich sage nicht, dass ich staatliche Eingriffe in den Markt generell befürworte. Aber wenn man will, dass die **von der Bundesregierung gesteckten Ziele bis 2020 erreicht werden**, sind substanzielle **staatliche Fördermaßnahmen schlicht erforderlich**. Ohne Fördermittel sind Elektrofahrzeuge für den überwiegenden Teil der Kunden nicht wirtschaftlich.“

Dr. Nils Schmid

„In erster Linie sind **attraktive und bezahlbare Fahrzeuge und Geschäftsmodelle** gefragt. Zunächst werden sich in den kommenden Jahren die **Plug-in-Hybride** am Markt etablieren. **Weiterentwicklungen und Kostensenkungen im Bereich** der Batterie werden dann aber auch das batterieelektrische Fahrzeug attraktiver machen.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Wir als Automobilhersteller müssen die richtigen Produkte auf den Markt bringen, um den Kunden zu zeigen, dass es bei der Elektromobilität **nicht um Verzicht geht, sondern um Emotion und Fahrspaß** – und das tun wir! Die Politik muss das Thema gleichzeitig als **Gesamtkonzept angehen** und geeignete Anreize schaffen. Dazu gehören sicherlich Aspekte wie die Nutzung von Busspuren, privilegierte Parkplätze und eine großflächige Ladeinfrastruktur. Aber auch **finanzielle Anreizprogramme** sollten in Erwägung gezogen werden.“

Neben der kontinuierlichen Optimierung von technischen Bedingungen wie der begrenzten Batteriekapazität und den hohen Fertigungskosten werden vor allem Kommunikationskonzepte gefordert, die Elektrofahrzeuge mit positiven Emotionen, Fahrspaß und Sportlichkeit in Verbindung bringen. Demnach sollen Elektrofahrzeuge als die richtige Wahl für urbane Mobilität positioniert werden, anstatt einen Eindruck von Einschränkungen und Komplexität zu vermitteln. Hier sind vor allem die Fahrzeughersteller, aber auch die Händler gefragt, die im direkten Kontakt zum Kunden stehen und deren Beratungsfunktion beim Autokauf einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen haben kann. Weiterhin sprachen sich die befragten Unternehmensvertreter mehrheitlich für umfassende und zentral koordinierte Marktanzweigungen aus. Nicht-monetäre Instrumente wie privilegierte Parkplätze seien jedoch lediglich ein erster Schritt, um zum Kauf eines Elektrofahrzeugs zu motivieren. Darüber hinaus wurde in den Interviews deutlich, dass Vertreter der freien Wirtschaft die Hoffnung auf direkte finanzielle Kaufanreize noch nicht aufgegeben haben.

4.3.2 EXPERTENSICHT AUF DIE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN DEUTSCHER UNTERNEHMEN UND DIE POSITION IM INTERNATIONALEN WETTBEWERB

Aufseiten der Unternehmen wird an verschiedenen Kennzahlen und strategischen Entscheidungen deutlich, dass alternative Antriebskonzepte mittlerweile ein fester Bestandteil der Forschungs- und Investitionsentscheidungen geworden sind:

»Wir haben bei uns hart in die Budgets eingegriffen. Von über fünf Milliarden Euro, die die Daimler AG jährlich in F&E investiert, fließt rund die Hälfte in grüne Technologien. Das spiegelt die strategische Ausrichtung unseres Unternehmens wider und die Konsequenz, mit der wir dieses Thema umsetzen.«

Prof. Dr. Thomas Weber, Daimler AG

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Baden-Württemberg geht voran. Hier befinden sich **knapp 20 % der Elektro-PKW und der Elektro-Ladepunkte Deutschlands**.



(Agentur für Erneuerbare Energien, 2014)



Wie hat sich das Thema Elektromobilität speziell auf die Strukturen in Ihrem Unternehmen ausgewirkt?

Dr. Volkmar Denner

„Bei uns hat sich das Thema sehr umfassend ausgewirkt. Zum einen sind wir in das **Geschäft mit E-Bikes und Scootern eingestiegen**. Bei den E-Bike-Antrieben sind wir inzwischen Marktführer in Europa. Außerdem haben wir mit der Gründung des **Robert Bosch Zentrums für Leistungselektronik** ein wichtiges Zeichen gesetzt. Wir haben Softwarelösungen auf den Markt gebracht, die den Kunden ein einfaches Laden ihrer Fahrzeuge ermöglichen. Das sind wichtige strategische Weichenstellungen, die zeigen, dass wir **viel Geld und mit einem langen Atem in das Thema investieren**.“

Siegbert Lapp

„Wir sind natürlich sehr **aktiv in der Umsetzung von vielen Projekten** und sind **vielfach als Lieferant** tätig. Da gibt es in Zukunft jedoch noch eine ganze Menge mehr Möglichkeiten für uns. Im Bereich der **Hochvoltverkabelung im Fahrzeug** haben wir zum Beispiel eine Reihe interessanter Lösungen, die wir künftig an unsere Kunden weitergeben werden.“

Karl Schmauder

„Wir haben in den vergangenen Jahren kräftig investiert, **sowohl in F&E als auch in hochmoderne Fertigungsanlagen**. Schließlich geht es für uns darum, **unsere Technologiekompetenz** im Bereich der konventionellen Antriebe **auf das Feld des elektrischen Antriebsstranges zu übertragen**. Seit 2013 beliefern wir mit technisch anspruchsvollen Komponenten namhafte Automobilunternehmen.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Wir haben beim Thema Elektromobilität bereits **früh auf Breite gesetzt**. So haben wir aktuell zehn unterschiedliche, rein elektrische Modelle mit Batterie und Brennstoffzelle am Markt und werden darüber hinaus insgesamt zehn Plug-in-Hybride bis 2017 einführen. Doch wir **denken auch über das Fahrzeug hinaus** – etwa, indem wir unser Carsharing-Modell car2go mit einbeziehen. Zudem haben wir uns sehr für die **Qualifizierung unserer Mitarbeiter** engagiert und in den vergangenen Jahren **84.000 Beschäftigte in alternativen Antriebskonzepten und Leichtbau geschult**, um die notwendige Basis zu schaffen.“

Tabelle 52: Wie hat sich das Thema Elektromobilität speziell auf die Strukturen in Ihrem Unternehmen ausgewirkt?

Kapitel 4

Die Kapazitäts- und Wirkungsgradsteigerung der Batterien für Elektrofahrzeuge wird auch in den kommenden Jahren der entscheidende Forschungsschwerpunkt bleiben. Für den Entwicklungs- und Produktionsstandort Deutschland wird es daher von zentraler Bedeutung sein, parallel zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren weitere Kompetenzen im Bereich der Zellforschung für Batterietechnologie aufzubauen. Neben diesem Konsens unter den befragten Experten gab es jedoch teilweise unterschiedliche Ansichten, ob es für deutsche Unternehmen möglich sei, den Innovationswettbewerb in der aktuellen Zellgeneration noch entscheidend mitzuprägen:

Wie bewerten Sie die Position deutscher Unternehmen im Bereich der Batterietechnologie?

Dr. Volkmar Denner

„Die Batterie ist das Thema, bei dem wir **noch keine befriedigende Lösung** gefunden haben. Ich bin der Meinung, dass es **Geldverschwendung ist, in die jetzige Zellgeneration zu investieren**. Denn ich halte es für **unmöglich, den großen Rückstand auf die asiatischen Anbieter noch aufzuholen**. Deshalb konzentrieren wir uns auf die **Forschung an der nächsten Zellgeneration**. Bei der müssen wir ein Wiedereintrittsfenster öffnen, um die Karten noch mal neu zu mischen mit dem Ziel, Wertschöpfung nach Deutschland zu holen.“

Siegbert Lapp

„Wenn ich mir die derzeitigen Aktivitäten und Investitionen von Tesla im Bereich der Batterietechnologie anschau, dann bin ich eigentlich sicher, dass die **Technologie demnächst noch einen weiteren Sprung machen wird**.“

Karl Schmauder

„Deutschland hat im **Bereich der Lithium-Ionen-Technologie zehn Jahre Nachholbedarf** im Vergleich zu Asien. Aber die heutige Zellchemie ist sicherlich nicht die Technologie der Zukunft. Daher gibt es **auch in diesem Segment durchaus Raum für Innovationen**. Von daher würde ich nicht sagen, dass man das komplett vergessen kann. Im Gegenteil: Wir müssen im **Innovationswettbewerb um die nächste Zellgeneration** vorne mit dabei sein, um zukünftig auch bei diesen wichtigen Komponenten Know-how und Wertschöpfung in Deutschland zu haben.“

Dr. Nils Schmid

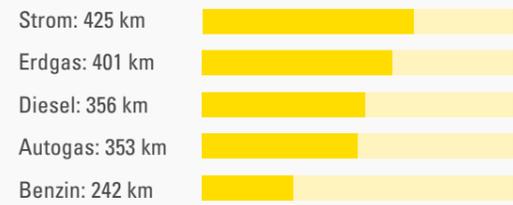
„Die **Batteriekosten sind nach wie vor die größte Herausforderung**. Obwohl wir in den vergangenen Jahren bereits hervorragende Ergebnisse in der wirtschaftsnahen Forschung erzielt haben; beispielsweise am eLab des ZSW in Ulm. Dieses **Wissen muss nun aber auch zeitnah in Produkte einfließen**, um für den Kunden deutlich attraktivere Lösungen bieten zu können.“

Tabelle 53: Wie bewerten Sie die Position deutscher Unternehmen im Bereich der Batterietechnologie?

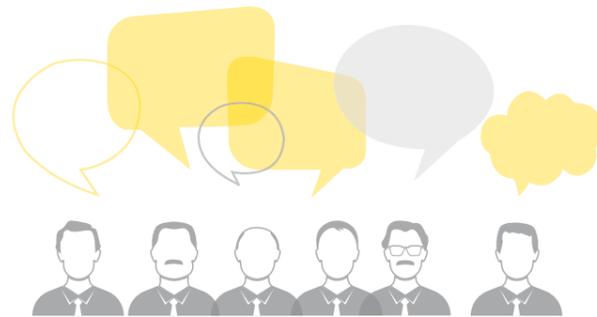
ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Kraftstoffkosten in der Elektromobilität.

So weit kommen Sie mit Kraftstoff im Wert von 20 Euro.



(Clemens Vest, stromdrive.de, 2014)



Die positive Bewertung des Status quo der Elektromobilität in Deutschland und Baden-Württemberg zeigt, dass Politik und Wirtschaft mittlerweile ein klares Bekenntnis zum Aufbau dieser Technologie abgeben und sich die Relevanz des Themas im Vergleich zum Jahr 2009 erhöht hat. Ein Blick in die konkurrierenden Märkte wie in die der USA und Asiens macht jedoch deutlich, dass deutsche Unternehmen im internationalen Vergleich bisher nicht die unangefochtene Technologieführerschaft für sich beanspruchen können:

Wie sind, Ihrer Einschätzung nach, baden-württembergische Unternehmen im Vergleich zur ausländischen Konkurrenz aufgestellt?

Dr. Volkmar Denner

„Wir sehen, dass es **extrem viele Forschungsaktivitäten und Start-ups in den USA gibt**. Die Maschinerie im Silicon Valley im Bereich innovativer Batterietechnologie läuft dort mit voller Drehzahl. Wir müssen **aufpassen, dass wir nicht von zwei Seiten in die Zange genommen werden**: Einerseits haben wir die **Großserienproduktion in Asien**, die so schnell nicht aufzuholen ist, und **auf der anderen Seite stehen die USA mit innovativen Ideen und einer regen Start-up-Kultur**.“

Winfried Hermann

„Wir beobachten mit einer gewissen Sorge, **dass wir die Wettbewerber in den anderen Ländern bisher nicht überholen konnten**, obwohl die baden-württembergische Industrie viel an Schwung gewonnen hat. Jetzt muss man dranbleiben. Das heißt auch, dass man sich **vom scheinbaren Abklingen des Hypes nicht beeindrucken lassen darf** und jetzt einen langen Atem beweisen muss.“

Siegbert Lapp

„Mit einem i3 kommt man leider heute noch nicht ganz so weit. **Da sind uns die Amerikaner doch ein Stück voraus**. Irgendwann müssen aber sicherlich auch die europäischen Hersteller, und speziell natürlich die deutschen, **ein ordentliches, rein elektrisches Fahrzeug aufbauen und kostengünstig anbieten**.“

Tabelle 54: Wie sind, Ihrer Einschätzung nach, baden-württembergische Unternehmen im Vergleich zur ausländischen Konkurrenz aufgestellt?

4.3.3 HANDLUNGSBEDARF IM BEREICH DER LADEINFRASTRUKTUR

Die Frage nach dem flächendeckenden Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur bleibt bisher einer der „großen Unsicherheitsfaktoren“ (Schmauder) unter den unterschiedlichen Akteuren im Feld der Elektromobilität. So sei beispielsweise noch unklar, ob öffentliche Ladestationen eines Tages in dem Ausmaß genutzt werden, dass tragfähige Finanzierungsmodelle für deren Ausbau und Betrieb ermöglicht werden. Verkehrsminister Hermann betont daher, dass die heutigen Ladeinfrastrukturprojekte in erster Linie als „Signal“ an die noch zögernden Endnutzer verstanden werden sollten, welches

Karl Schmauder

„Beim elektrifizierten Fahrzeug der Zukunft ist es **schwieriger, sich über die Antriebseinheit zu differenzieren**. Da sind wir in Baden-Württemberg schon herausgefordert und müssen ehrlich zu uns sein: **Zumindest bis heute können wir nicht für uns in Anspruch nehmen, was wir beim Verbrennungsmotor können**: Nämlich, dass hier eine Menge Weltmarktführer sitzen.“

Dr. Nils Schmid

„Baden-Württemberg hat den Vorteil, dass es **ganzheitlich gut aufgestellt** ist. Zulieferer aus Baden-Württemberg **beliefern weltweit die Branche mit elektromobilen Komponenten und Systemen**. Unsere Fahrzeughersteller haben hybride Lösungen, batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellen in der Kundenerprobung oder bereits am Markt platziert.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Bei Innovationen kommt es immer auch auf den **richtigen Zeitpunkt** an – und auf **Geschwindigkeit**. Lange hat sich das Vorurteil gehalten, die deutsche Automobilindustrie hätte hier den Trend verschlafen. Nicht zuletzt beim Rollout der Plug-in-Hybride **geben wir aber ganz klar den Takt vor**.“

das breite Bekenntnis der Politik und die zukünftige Weiterentwicklung alternativer Antriebsformen manifestieren soll:

»Die öffentliche Ladeinfrastruktur halten wir für wichtig, weil man Nutzern von Elektrofahrzeugen das Signal gibt: ‚Du bleibst nicht liegen‘. Wir erwarten natürlich nicht, dass das künftige Elektroauto vorwiegend auf der Straße geladen wird. Aber dieser Sicherheitsfaktor, eine Ladesäule in der Nähe finden zu können, der ist natürlich für die Akzeptanz von Bedeutung.«

Winfried Hermann, MVI

Kapitel 4

Darüber hinaus sei bisher noch nicht abschließend entschieden, in welchem Maße private Akteure zum Infrastrukturausbau beitragen sollen. Die befragten Experten aufseiten der Unternehmen waren sich hingegen einig, dass die Bereitstellung öffentlich zugänglicher Lademöglichkeiten eine Aufgabe des Staates sei und als Form der „öffentlichen Daseinsvorsorge“ über öffentliche Gelder finanziert werden müsse. Ein besonderer Schwerpunkt liege hierbei im Aufbau einer diskriminierungsfreien Schnellladeinfrastruktur, die es künftig ermöglichen solle, die eingeschränkten Reichweiten von Elektrofahrzeugen abzufedern und deren Fahrern die Möglichkeit zu geben, den Radius ihrer Fahrten auf Langstrecken auszudehnen.

Kritisiert wurde in diesem Zusammenhang vor allem die bisher mangelnde Koordination unter den Verantwortlichen. Schließlich sei es für eine weitere Verbreitung der Elektromobilität kontraproduktiv, wenn proprietäre Zugangssysteme und mangelnde Interoperabilität unterschiedlicher Lademöglichkeiten einer nutzerfreundlichen Gesamtlösung entgegenstünden. So könne man sich als Fahrer eines Elektrofahrzeugs heute noch keinesfalls darauf verlassen, dass man sein Fahrzeug im Einzugskreis eines anderen Energieversorgers ohne vorherigen Anmeldevorgang tatsächlich wieder aufladen könne.

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Elektromobilität: **Fahrfreude und Nachhaltigkeit**

	BMW i8: 2,1 l/100 km, 4,4 s von 0 auf 100 km/h
	Aston Martin Vanquish: 14,4 l/100 km, 3,8 s von 0 auf 100 km/h
	Jaguar F-Type: 9,1 l/100 km, 4,9 s von 0 auf 100 km/h

(Herstellerangaben, 2014)

Wie beurteilen Sie den Status quo der Ladeinfrastruktur und welche Maßnahmen erwarten Sie für die Zukunft?

Dr. Volkmar Denner

„Mir ist es wirklich **ein Dorn im Auge**, wenn ich sehe, **dass hier wieder diese Kleinstaaterei beginnt**. Hier bauen **zu viele Player unterschiedliche Lösungen** auf, obwohl das die kleine Zahl von Fahrzeugen eigentlich überhaupt nicht rechtfertigt. Dabei haben wir bereits Lösungen entwickelt, die sich als Plattform für alle eignen.“

Winfried Hermann

„Bei der Ladeinfrastruktur kann die öffentliche Hand im Sinne einer umfassenden Verantwortung für Infrastruktur aktiv werden. Die Entscheidung, **wie viel als öffentliche Daseinsvorsorge nötig ist und wie viel private Initiative sein muss, ist aber noch nicht gefallen**.“

Siegbert Lapp

„Ich denke, der **Ausbau des Ladenetzes ist eine Infrastrukturmaßnahme** und geht daher in Richtung **Vorsorge für den Bürger**. Es sollte also eine **Aufgabe der öffentlichen Stellen** sein, die man nicht alleine dem Autobauer, Betreiber oder dem Nutzer überlassen kann. Ich finde, dass gerade die Schnellladesysteme noch stärker vom Staat unterstützt werden sollten.“

Karl Schmauder

„Das Thema Ladeinfrastruktur ist aus meiner Sicht noch **einer der großen Unsicherheitsfaktoren**. Ich sehe heute weder **einheitliche Standards**, noch ein **tragfähiges Geschäftsmodell** für die Ladestationen. Aus Komfortsicht ist das **induktive Laden** unverzichtbar.“

Dr. Nils Schmid

„Im Bereich der Ladeinfrastruktur wurden schon **beträchtliche Erfolge** erzielt. Dies gilt für Baden-Württemberg und Stuttgart sicher besonders. Trotzdem gehören **Fragestellungen der Schnellladung** weiterhin zu den **Schwerpunkten unserer Forschungsförderung** im Bereich Elektromobilität.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Der Aufbau einer standardisierten, öffentlichen Ladeinfrastruktur ist und bleibt **eine der ganz großen Herausforderungen**. Heute mangelt es vielfach noch an Ladesäulen und **einfachen Abrechnungsmodalitäten**. Und zweitens kommt es jetzt darauf an, dass mit dem Combined Charging System (CCS) ein **verbindlicher Ladestandard** geschaffen und auch in Europa umgesetzt wird.“

Tabelle 55: Wie beurteilen Sie den Status quo der Ladeinfrastruktur und welche Maßnahmen erwarten Sie für die Zukunft?

4.3.4 RÜCKBLICK AUF DIE BISHERIGE FÖRDERPOLITIK UND AUSBLICK IN DIE ZUKUNFT

Gefragt nach den bisher getroffenen politischen Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität, wurde von den Experten ein einheitlich positives Urteil gefällt. Unterschiedliche Positionen gab es lediglich bei der europäischen CO₂-Gesetzgebung. Während diese einerseits als „kluge Politik“ (Denner) gelobt wurde, die bei verlässlichen Rahmenbedingungen eine große Technologieoffenheit zulasse und Innovationen stimulierte, wurde sie an anderer Stelle als „staatlicher Eingriff in die technologische Entwicklung“ kritisiert:

»Wir haben die Herausforderung Elektromobilität in dieser Größenordnung ja nicht, weil es so eine tolle Technologie ist, sondern weil sie im Prinzip über die CO₂-Vorgaben staatlich verordnet ist.«

K. Schmauder, ElringKlinger AG

Abgesehen von der grundsätzlichen Frage der Erfolgsaussichten gesetzlich gestützter Innovationspolitik waren sich die Experten jedoch einig, dass der Ansatz deutscher und baden-württembergischer Förderpolitik positiv zu bewerten sei. Die Konzentration auf F&E-Förderung habe sich als richtige Entscheidung erwiesen, ohne die gerade kleine und mittelständische Unternehmen kaum eine Chance gehabt hätten, in angemessenem Maße in die Entwicklung innovativer Antriebssysteme zu investieren. Zudem wurde die nationale Koordination durch die NPE einstimmig gelobt, da sie ein Forum biete, alle unterschiedlichen Player zu vernetzen und dabei die gemeinsame Laufrichtung vorgebe.

Erste sichtbare Erfolge bei der Stimulation des Markts elektrisch betriebener Busse zeigen darüber hinaus, dass auch finanzielle Anschubhilfen ein wirksames Mittel sein können, die Trägheit des Markts zu überwinden. So zeigen Förderprogramme, in denen öffentlichen Verkehrsbetrieben eine Deltafinanzierung für die Anschaffung von Elektro- oder Hybridbussen gewährt wird, bereits den gewünschten Effekt einer Nachfragesteigerung und einer damit einhergehenden Preissenkung der Fahrzeuge.

Wie bewerten Sie den Beitrag der öffentlichen Förderung zum aktuellen Status quo der Elektromobilität?

Dr. Volkmar Denner

„Normalerweise hören die Politiker ja aus der Wirtschaft nur Kritik, was sie alles falsch machen. Ich glaube hingegen, **die Politik hat mit der CO₂-Gesetzgebung sehr klug mitgeholfen, verlässliche Rahmenbedingungen zu schaffen**. Diese zwingen die Branche, die Technologie ständig weiterzuentwickeln, lassen dabei jedoch eine große **Technologieoffenheit** zu.“

Winfried Hermann

„Bei unserem **Busförderprogramm** kann man bereits sehen, **wie die öffentliche Förderung geholfen hat, den Markt anzuschieben**. So schließen sich immer mehr Verkehrsunternehmen, ihre Flotten zu elektrifizieren. Und der positive Effekt hierbei ist, dass die **Mehrkosten von Hybridbussen bereits zu sinken scheinen**.“

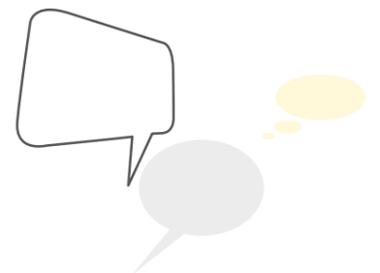
Karl Schmauder

„Ich finde den **Ansatz, den wir hier in Deutschland und Baden-Württemberg haben**, nämlich die **Investition in Forschung und Entwicklung, gut und richtig**. Es ist meine feste Überzeugung, dass Unternehmen unserer Größenordnung und auch die **KMU auf solche Förderprogramme angewiesen** sind.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Ohne **Fördermaßnahmen und die Koordination durch die NPE** hätten wir in Deutschland – und ganz besonders in Baden-Württemberg – **nicht diesen guten Stand erreicht**. Hervorheben möchte ich den **Schulterschluss zwischen den vielen verschiedenen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und der Politik** im Rahmen des Spitzenclusters und des Schaufensters Elektromobilität. Genau dieses Zusammenspiel brauchen wir für den nachhaltigen Erfolg der Elektromobilität.“

Tabelle 56: Wie bewerten Sie den Beitrag der öffentlichen Förderung zum aktuellen Status quo der Elektromobilität?



Kapitel 4

Gefragt nach den zukünftig wichtigsten Themen einer öffentlichen Förderpolitik, sehen die Befragten jeweils unterschiedliche Aspekte des Systems Elektromobilität im Zentrum des Interesses:

Was erwarten Sie im Bereich der öffentlichen Förderung für die kommenden Jahre?

Dr. Volkmar Denner

„Ich halte **eine F&E-Förderung für Batterien** für ganz wesentlich, damit wir hier in Deutschland wieder den Anschluss schaffen. Diese sollte sich jedoch auf die nächste Zellgeneration konzentrieren. Hier kann die Politik durch **Clusterbildung und den Aufbau eines leistungsfähigen Zulieferernetzwerkes** einen wirklich wichtigen Beitrag leisten. Denn wir haben nichts erreicht, wenn die Technologie im Labor funktioniert, wir sie aber nicht in die Serie bekommen.“

Winfried Hermann

„Die Herausforderung zurzeit ist, dass wir es **mehr Verbrauchern und Flottenmanagern schmackhaft machen müssen, Elektrofahrzeuge zu kaufen**. Um die nötigen Stückzahlen zu erreichen, reden wir derzeit weniger über direkte finanzielle Subventionen als über **Privilegien für Elektrofahrzeuge**. Wir glauben, dass das ein **wichtiger Baustein sein kann, der sich nicht immer zwangsläufig monetär bezahlt macht**, aber dafür im Faktor Zeit. Wer einen privilegierten Parkplatz ansteuern kann, ist eben oft auch schneller am Ziel.“

Siegbert Lapp

„Ich würde mir wünschen, dass in Zukunft noch **mehr infrastrukturelle Maßnahmen gefördert werden**. Hierbei wäre uns **eine verbindliche Norm** sehr wichtig, anstatt zu viele verschiedene Lösungen anzubieten. Da wir Serienhersteller sind, wünschen wir uns einfach **möglichst einheitliche Richtlinien**. Denn **verschiedene Normen erfordern den doppelten Aufwand und die doppelten Kosten**.“

Karl Schmauder

„Neben der fokussierten **Förderung von Zellchemie und Batterietechnik** müssen wir die **Brennstoffzelle industrialisieren**. Ansonsten drohen wir in diesem Technologiefeld den Anschluss an die Asiaten zu verlieren. Und wir brauchen **herausragende Bildungsinitiativen** für junge, kreative Ingenieurinnen und Ingenieure, die in der Lage sind, die technischen Herausforderungen der Zukunft zu meistern.“

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Reichweitenangst ist unbegründet.

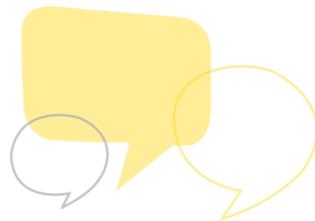
Tägliche Fahrleistung
unter 50 km: 64,3 %

Tägliche Fahrleistung
unter 100 km: 93,2 %

Reichweite von Elektrofahrzeugen: 120 – 400 km



(Stefan Paternoga et al., *Akzeptanz von Elektrofahrzeugen*, 2013; Felix Ehrenfried, *wiwo.de*, 2013)



Dr. Nils Schmid

„Der **Förderung der wirtschaftsnahen Forschung und Entwicklung** kommt eine zentrale Rolle zu. Ein Schwerpunkt hierbei ist die **Industrialisierung der Elektromobilität**. Neben dem Speicher als zentralem Thema sind Projekte zur Schnellladung, zur Leistungselektronik, zur elektrischen Maschine, im Bereich Leichtbau, bei der Vernetzung und Automatisierung des Fahrens sowie zur zukünftigen Produktion und Industrie 4.0 Schwerpunkte unserer Forschungsförderung.“

Prof. Dr. Thomas Weber

„Die groß angelegte **Bildungs- und Qualifizierungsoffensive** muss fortgesetzt werden. Bisher gibt es noch nicht ausreichend viele Experten in den Bereichen Elektromobilität, Chemie, Batterietechnologie und Elektronik. Parallel müssen **Anreizsysteme** forciert werden, um deutlich mehr Kunden zum Kauf anzuregen. **Sonst entwickelt sich der Leitmarkt außerhalb von Deutschland**.“

Tabelle 57: Was erwarten Sie im Bereich der öffentlichen Förderung für die kommenden Jahre?

Neben klassischen Fördermaßnahmen, Bildungsprogrammen und Anreizsystemen liege der Handlungsbedarf aufseiten der öffentlichen Hand jedoch noch bei einem anderen Thema: So forderten Vertreter der Unternehmen ein stärkeres Engagement bei der Elektrifizierung der öffentlichen Fuhrparke, die derzeit noch weit hinter den gehegten Erwartungen zurückbleibe. Gründe für diesen Umstand liegen laut Minister Hermann momentan noch bei administrativen und teilweise individuellen Hürden auf Ebene der Fuhrparkbetreiber:

Welche Ziele sollten sich die öffentlichen Institutionen weiterhin setzen?

Dr. Volkmar Denner

„Auch die **öffentliche Hand muss durch die Beschaffung ihrer eigenen Fahrzeuge ein klares Bekenntnis ablegen. Da tut sie sich leider noch extrem schwer**. Diese Fahrzeugflotten hätten auch eine große Signalwirkung für die Bevölkerung, was ich für sehr wichtig halte.“

Winfried Hermann

„Aus meiner Sicht ist es so, dass wir es bei den **Fuhrparkverantwortlichen nicht immer mit enthusiastischen Anhängern der Elektromobilität** zu tun haben, die aus eigenem Antrieb oder Idealismus sagen, sie wollen diese neue Technik. Sondern da herrscht oft noch **eine gewisse Skepsis**. Das sieht man vor allem an **organisatorischen Vorkehrungen**, die man treffen muss. Das zeigt auch, dass es nicht immer nur eine technische Umstellung ist, sondern dass die **Umstellung in den Köpfen der Nutzer stattfinden muss**.“

Tabelle 58: Welche Ziele sollten sich die öffentlichen Institutionen weiterhin setzen?

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Ladeinfrastruktur ausbauen

In Deutschland waren Anfang 2014 für 97.731 zugelassene Hybrid- und Elektrofahrzeuge nur 2.821 Ladesäulen verfügbar.



(Henriette Spyra, *Elektromobilität 2013, 2014*)

Kapitel 4

4.4 ELEKTROMOBILITÄT AUS SICHT DES ANWENDERS

4.4.1 NUTZUNGSHÜRDEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN AUS SICHT PRIVATER NUTZER

Die flächendeckende Verbreitung der Elektromobilität gilt in Deutschland und anderen großen Automobilnationen als erklärtes politisches Ziel. Ob der gewünschte Durchbruch in den kommenden Jahren jedoch gelingt, hängt in letzter Konsequenz von der Kaufbereitschaft und Akzeptanz der Endkunden ab. So haben Forschung und Entwicklung der Industrie, öffentliche Förderung und der voranschreitende Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur letztlich das Ziel, bestehende Nutzungshürden abzubauen und Vertrauen in die neue Technologie zu fördern. Im Folgenden wird dargestellt, inwieweit dies bereits gelingt und welche Maßnahmen auf dem Weg zu einer weiteren „Elektrifizierung“ der mobilen Bevölkerung künftig ergriffen werden könnten.

Nach wie vor sorgen vor allem die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten dafür, dass der Kauf eines Elektrofahrzeugs für die meisten Nutzer keine ökonomisch sinnvolle Alternative darstellt. Weiterhin sind die im Vergleich zum herkömmlichen Tanken deutlich längeren Ladezeiten und die geringeren Reichweiten von Elektrofahrzeugen ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor. Ungeachtet dessen, dass die täglichen Fahrprofile der meisten Autofahrer den Kapazitäten heutiger Fahrzeugbatterien bereits entsprechen (vgl. Abbildung 59), ist der psychologische Aspekt der „Reichweitenangst“ ein nicht zu unterschätzender Faktor, der in der öffentlichen Wahrnehmung dazu führt, dass Elektrofahrzeuge noch immer mit Einschränkungen assoziiert werden. Auch wenn bereits erwiesen ist, dass sich Nutzer nach kurzer Zeit an den Umgang mit der schwankenden Reichweite gewöhnen [Franke (2012)], konnte im Rahmen einer Forschungsarbeit an der TU Chemnitz nachgewiesen werden, dass im Durchschnitt 20 bis 25 % der verfügbaren Reichweite von den Fahrern als psychologische Sicherheitsreserve angesehen und die heute verfügbaren Reichweitenressourcen häufig gar nicht ausgeschöpft werden [Franke/Krems (2013)]. Demnach könnten speziell auf Reichweitenoptimierung ausgelegte Assistenzsysteme und eine flächendeckende und diskriminierungsfreie Ladeinfrastruktur eine substantielle Akzeptanzhürde abschwächen und Unsicherheit in Bezug auf Lademöglichkeiten und Reichweitereinschränkungen begegnen. Darüber hinaus

sind die mangelnden Langzeiterfahrungen und die technische Unsicherheit in Bezug auf die Lebensdauer der Batterietechnik ein weiterer Grund, der zu einer noch immer abwartenden Haltung bei Fahrzeugkäufern, Leasingfirmen und Fuhrparks führt [Fazel (2013)].



Abbildung 59: Alltagstauglichkeit heutiger Reichweiten von Elektrofahrzeugen.

Die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung im Rahmen des Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ können jedoch erste Ansätze liefern, wie dieser Unsicherheit aufseiten der potenziellen Fahrzeugnutzer zu begegnen ist und welche weiteren Maßnahmen für eine positive öffentliche Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen ergriffen werden könnten. So konnte beispielsweise in mehreren Studien nachgewiesen werden, dass Elektrofahrzeuge signifikant positiver bewertet werden und das Potenzial haben, Nutzer nachhaltig zu begeistern, wenn diese

deren Eigenschaften in Praxistests und Fahrversuchen selbst ausprobieren konnten (vgl. u.a. InnoZ (2012); Fazel (2013)). Darüber hinaus scheinen die positiven Fahreigenschaften sogar das Potenzial zu haben, die reichweitenbedingten Einschränkungen zu einem gewissen Maß zu kompensieren [Canzler (2010)].

Demzufolge kann die Zielsetzung der Schaufensterförderung, Elektromobilität für den Nutzer „erfahrbar“ zu machen und in Pilotprojekten praktisch zu erproben, als folgerichtig bewertet werden. Ebenso setzt die Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Systeme und intermodale Verkehrskonzepte wie in den Projekten BeMobility, Stuttgart Services oder der elektrischen car2go-Flotte im Raum Stuttgart an einem sinnvollen Punkt an, wenn es darum geht, einen möglichst großen Nutzerkreis auf unverbindliche Art mit den neuen Antriebsarten in Kontakt zu bringen. So konnte mehrfach nachgewiesen werden, dass Nutzer aufgrund der eingangs erwähnten Einstiegshürden eine erheblich größere Be-

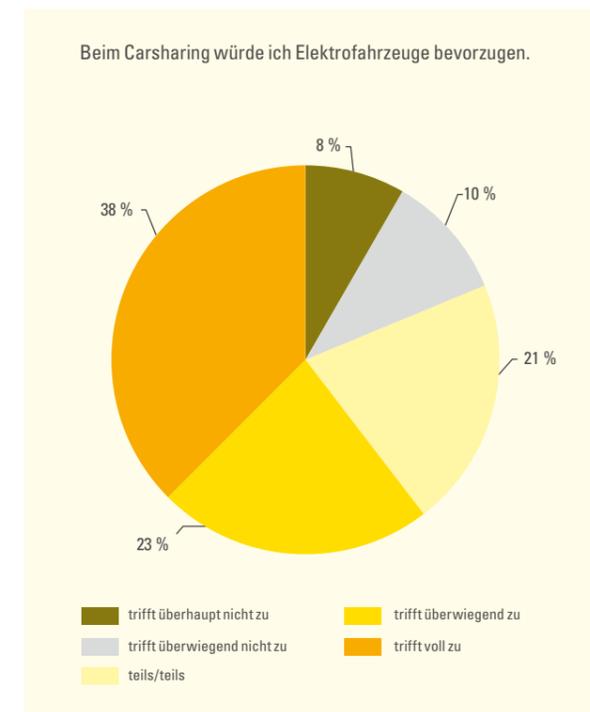


Abbildung 60: Nutzermeinung zur Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Systeme.

reitschaft haben, Elektrofahrzeuge im Rahmen von Carsharing zu nutzen, als sich langfristig per Fahrzeugkauf oder -leasing auf ein Elektrofahrzeug festzulegen [Fazel (2013); Fraunhofer ISI (2012a); Knie (2010)]. Somit ist das Ziel, Elektrofahrzeuge und elektromobile Dienstleistungen zu Beginn der Markteinführung einem möglichst großen Personenkreis zuzuführen, beispielsweise über Carsharing wesentlich einfacher zu erreichen, als es durch die klassische Nutzungsform des Kaufs möglich wäre. Gleichzeitig können über die flexible und unkomplizierte Bereitstellung der Fahrzeuge die positiven Fahreigenschaften und die Vermittlung von Fahrspaß einem breiten Nutzerkreis vermittelt werden. Zumal auch unter Personen, die bisher keine Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen gemacht haben, ein hohes Interesse besteht, diese im Rahmen von Kurzzeitmieten zu testen (vgl. Abbildung 60).

4.4.2 ERFAHRUNGEN AUS ANWENDUNGSPROJEKTEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Ein Anwendungsprojekt, welches den Ansatz aufgreift, dass potenziellen Kunden Elektrofahrzeuge über flexible Mietmodelle zum Probefahren zur Verfügung gestellt werden, ist das Schaufensterprojekt „charge@work“. In diesem Projekt, in dem die Daimler AG, die Universität Stuttgart und das Fraunhofer IAO gemeinsam die Bedingungen für eine intelligente Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz erforschen, wird unter anderem die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen beim Endnutzer untersucht. Mitarbeiter der Daimler AG bekommen hierbei die Möglichkeit, für Zeiträume von einem Wochenende bis zu einem Jahr Elektrofahrzeuge zu mieten und die hierfür installierte Ladeinfrastruktur an mehreren Standorten zu nutzen. Im weiteren Projektverlauf soll zusätzlich ein bedeutender Anteil des internen Daimler-Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge umgestellt werden. Interessierte Testnutzer, die sich entschieden, für mindestens drei Monate ein Elektrofahrzeug zu nutzen, wurden hierbei mit wiederholenden Befragungen begleitet, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich die Einstellung des Privatnutzers gegenüber Elektrofahrzeugen mit zunehmender Nutzungsdauer verändert. Unter anderem wurden die Erwartungen an verschiedene Eigenschaften von Elektrofahrzeugen mit den späteren Praxiserfahrungen verglichen. Die Abbildungen 61 und 62 zeigen die veränderte Bewertung der unterschiedlichen Fahrzeugeigenschaften.

Kapitel 4

Es wird hierbei deutlich, dass sich die Bewertung der meisten Eigenschaften nach der Nutzung des Elektrofahrzeugs deutlich verbessert hat. Lediglich die Bewertung der verfügbaren Reichweite und der anfallenden Anschaffungskosten verschlechterten sich nach der Nutzung signifikant, was mit der eher neutralen Erwartung zusammenhängt, mit denen die meisten Testnutzer in den Feldversuch gegangen waren. Darüber hinaus konnte im Zuge der Befragung weiterhin bestätigt werden, was Statistiken zum Mobilitätsverhalten schon länger nahelegen: So gaben 75 % der Befragten an, dass die Reichweite der genutzten Elektrofahrzeuge für den täglichen Mobilitätsbedarf ausreiche (siehe Abbildung 59). Für die Kommunikation und das Marketing von Elektrofahrzeugen relevanter sind jedoch diejenigen Fahrzeugeigenschaften, die vor dem Feldversuch als neutral oder negativ eingeschätzt wurden

und deren Bewertung sich nach dem Praxistest deutlich verbessert hat. Hervorzuheben sind die Erwartungen an den Fahrkomfort, die Beschleunigung und die Höchstgeschwindigkeit. Diese Eigenschaften, die allesamt mit dem Fahren bzw. mit dem Fahrgefühl des Fahrzeugs in Verbindung stehen, scheinen die Nutzer positiv überrascht oder sogar begeistert zu haben. Eine Erklärung für diese positive Entwicklung der Bewertung könnte eine öffentliche Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen sein, die sich nicht im gleichen Tempo verändert wie die technische Entwicklung der Fahrzeuge. So scheinen Elektrofahrzeuge noch immer mit Einschränkungen im Allgemeinen assoziiert zu werden. Hierbei werden die Fahreigenschaften wie Fahrkomfort und Beschleunigung, die durchaus das Potenzial haben, Nutzer zu begeistern, von den Faktoren der begrenzten Reichweite oder der Unsicherheit hinsichtlich der Lad-

infrastruktur scheinbar kaum differenziert wahrgenommen. Diese Interpretation legt auch die signifikante Verbesserung des Faktors „Image“ nahe. Bei einem Großteil der Testfahrer hat sich die Einschätzung über das Image, welches Elektrofahrzeuge vermitteln, geändert. Während vor dem Feldversuch knapp 70 % angaben, dass sie das Image von Elektrofahrzeugen sehr oder eher negativ bewerten, wandelte sich diese Meinung während des Praxistests grundlegend. Nach einem Testzeitraum von drei Monaten waren 95 % der Fahrer der Auffassung, dass Elektrofahrzeuge einen positiven Eindruck bei den Menschen in ihrem persönlichen Umfeld hinterlassen. Auch hier wird deutlich, dass die Erwartungen an Elektrofahrzeuge von einem Bild bestimmt werden, welches als eher unattraktiv bezeichnet werden kann, während die tatsächlichen Erfahrungen positive Emotionen und Erlebnisse nach sich

ziehen. Aus diesen Zwischenergebnissen lassen sich bereits einige Ansätze für eine Positionierung von Elektrofahrzeugen und eine deutlichere Kommunikation ihrer positiv wahrgenommenen Fahreigenschaften ableiten. Während die Themen Reichweite und Anschaffungskosten vor allem technischen Rahmenbedingungen unterliegen und daher kaum zu beeinflussen sind, sollten die Faktoren Fahrkomfort und Beschleunigungsverhalten in der Produktkommunikation in den Vordergrund gerückt werden. Auch der Umstand, dass die geringeren Reichweiten von Elektrofahrzeugen häufig als größtes Kaufhemmnis angesehen werden, die Kapazitäten einer Batterieladung jedoch für die alltäglichen Wege der meisten Menschen ausreichend sind, könnte in der Vermarktung von Elektrofahrzeugen stärker in den Vordergrund gerückt werden.

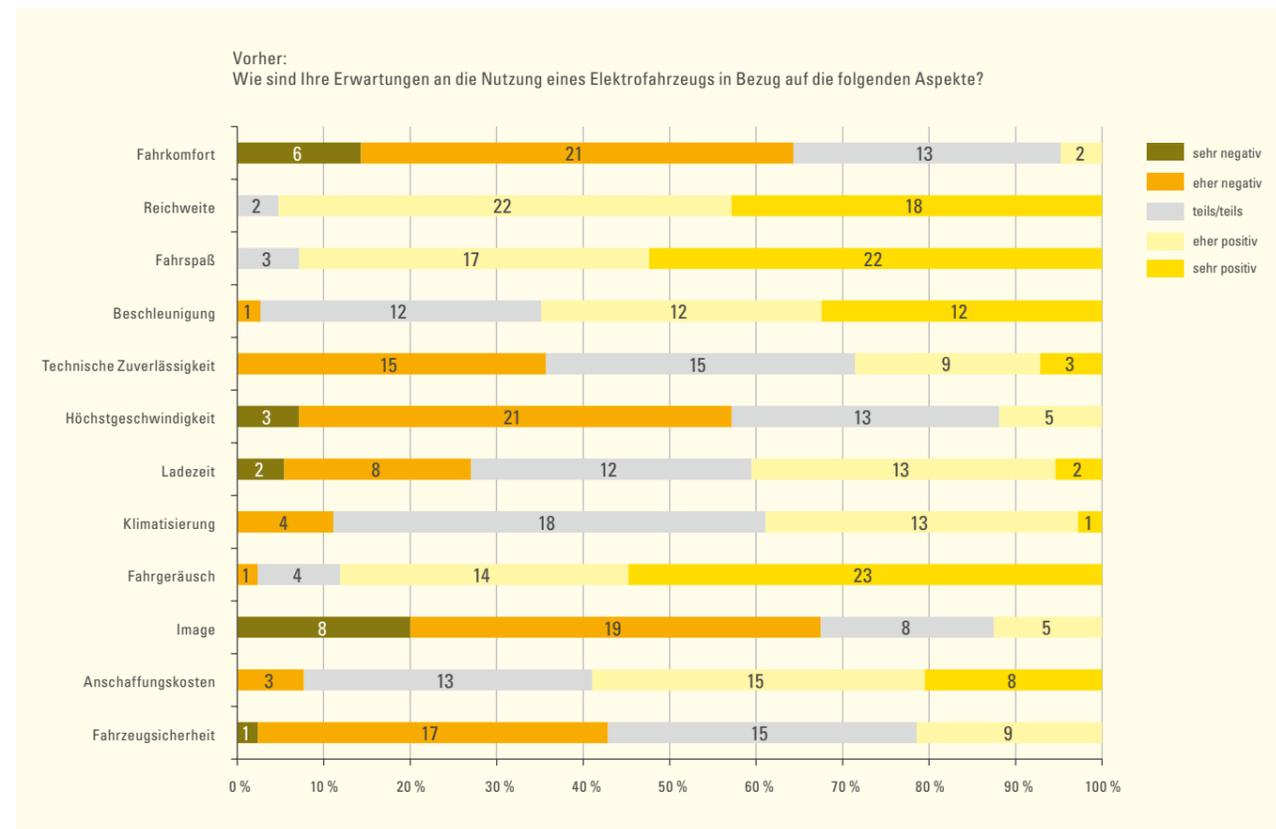


Abbildung 61: Nutzererwartungen an einzelne Eigenschaften von Elektrofahrzeugen vor dem Feldversuch.

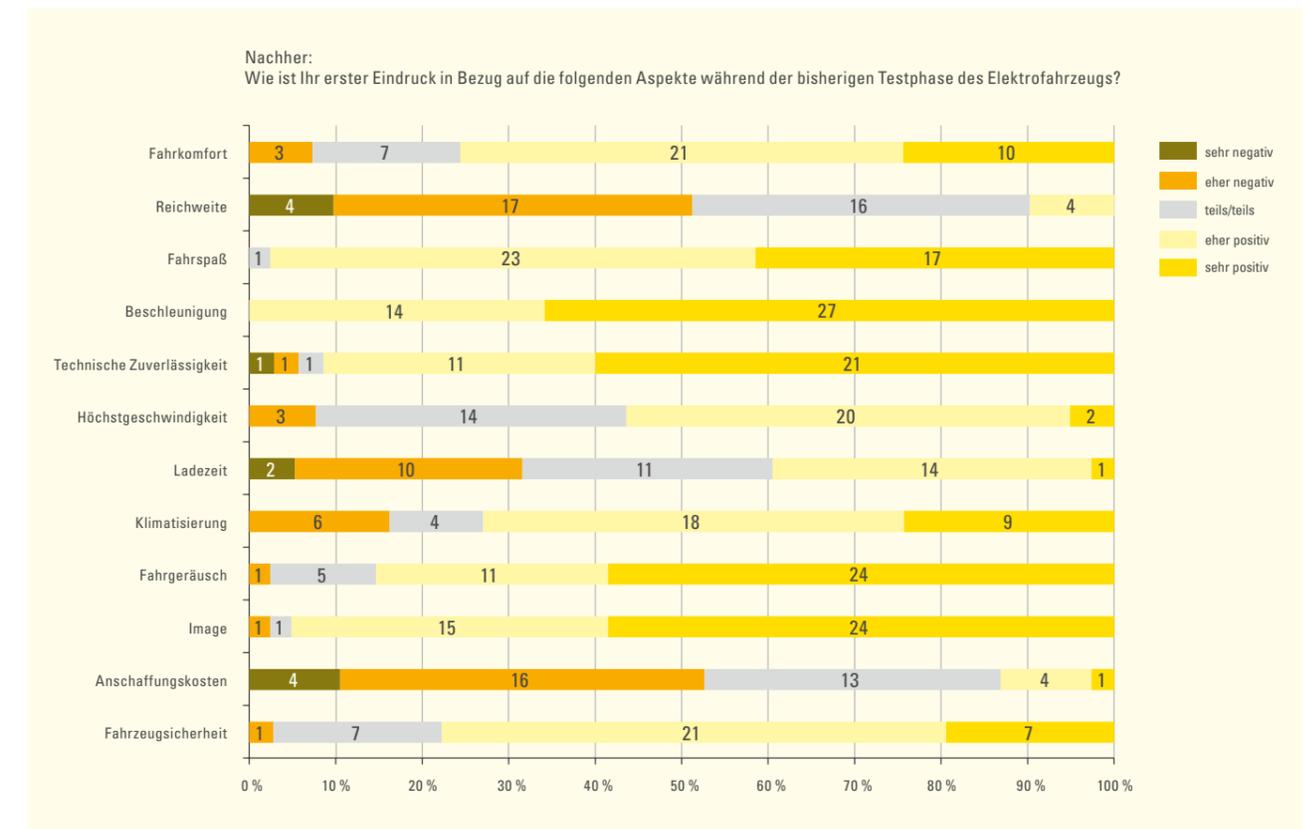


Abbildung 62: Nutzerbewertung einzelner Eigenschaften von Elektrofahrzeugen nach einer zweiwöchigen Praxiserfahrung.

Kapitel 4

Neben der noch herrschenden Unsicherheit in Bezug auf die Elektrofahrzeuge spielt die Verfügbarkeit einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur eine wichtige Rolle für die Verringerung der Skepsis beim Privatnutzer hinsichtlich der Alltagstauglichkeit der Elektromobilität.

Endnutzer wurden ebenfalls im Schaufensterprojekt „Ladeinfrastruktur Stuttgart und Region“ nach ihren Alltagserfahrungen befragt. In diesem Projekt wird die Installation und der Betrieb von 500 Ladepunkten in der Region Stuttgart untersucht; diese werden unter anderem für den Einsatz einer zu 100 % elektrisch betriebenen Carsharing-Flotte mit 500 Fahrzeugen des Anbieters car2go genutzt. Ziel war es, Feedback und Optimierungsvorschläge der Elektromobilitätspioniere zu sammeln und in den künftigen Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur in anderen Regionen einzubringen.

In mehreren Fokusgruppenworkshops wurden Fahrer von Elektrofahrzeugen zum Umgang mit der vorhandenen öffentlichen Ladeinfrastruktur befragt. Es waren sowohl langjährige Nutzer der Elektromobilität unter den Teilnehmern als auch Neukunden, die erst seit Kurzem Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen sammeln konnten.

Die flächendeckende Installation einer öffentlichen Ladeinfrastruktur im Raum Stuttgart wurde von allen Teilnehmern als sehr positiv bewertet. So sei die Sichtbarkeit der Ladestationen erstens ein wichtiges Signal der öffentlichen Hand an die ersten E-Fahrer und baue zweitens eine wesentliche psychologische Hürde für potenzielle Neukunden ab, denen Ladestationen im Stadtbild ein Gefühl der Sicherheit vermitteln können.

Obwohl die Mehrzahl der Diskussionsteilnehmer angab, über einen privaten Ladeplatz zu verfügen und die öffentliche Ladeinfrastruktur nur selten zu nutzen, sei ein fortschreitender Aufbau von (Schnell-)Ladestationen langfristig unverzichtbar, um die momentan noch vorrangigen Nutzungsmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen als reine „Stadtfahrzeuge“ zu erweitern. Folglich war einer der am wichtigsten bewerteten Faktoren der Wunsch nach einem einheitlichen Zugangs- und Abrechnungssystem von Lademöglichkeiten. So stellt die derzeit herrschende „Zersplitterung“ der Tarifregionen und die große Vielfalt an regional be-

grenzten und proprietären Kartensystemen eine große Schwierigkeit beim öffentlichen Laden dar. Eine Vereinheitlichung der Identifikationsmedien und die Möglichkeit des „Roamings“ sind demnach wesentliche Voraussetzungen für die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen. Aktivitäten im Bereich der Standardisierung, wie das Joint Venture „Hsubject“, wurden folglich positiv bewertet. Auch die geplante internationale Datenplattform e-clearing.net, deren Ziel eine europaweite Vernetzung der verschiedenen Lademöglichkeiten zu einem gemeinsamen Zugangssystem ist, ist ein Schritt in die richtige Richtung, hin zu einer offenen und flexibel nutzbaren Ladeinfrastruktur.

Flexibel sollte auch das Tarifmodell der Stromanbieter sein. Es wurde aufgrund der eher unregelmäßigen Nutzung der öffentlichen Ladestationen von den Befragten ein „hybrides Prepaidmodell“ bevorzugt, bei dem die Prepaidkarte per Dauerauftrag solvent gehalten wird. Für diese flexiblere Tarifvariante ohne Grundgebühr und die Möglichkeit, pro Nutzung zu bezahlen, würden die Gelegenheitsnutzer auch einen höheren Preis pro kWh gegenüber „Flatratetarifen“ mit Grundgebühr in Kauf nehmen. Zum einen, da sie sich ungern an einen langfristigen Vertrag binden möchten und zum anderen, da sie derartige Tarifmodelle bereits aus dem Bereich des Mobilfunks kennen und akzeptieren.

Eines der größten Probleme während der bisherigen Praxiserfahrung mit der öffentlichen Ladeinfrastruktur im Raum Stuttgart ist, besonders im städtischen Zentrum, das Zuparken der Ladestationen durch abgestellte Verbrennerfahrzeuge. Dieses Problem

ELEKTROMOBILITÄT IN ZAHLEN

Forschung intensivieren. Patentanmeldungen von Automobilherstellern im Zeitraum 2002–2012



(Grünecker, statista.com, 2015)

werde durch die elektrische Carsharing-Flotte noch zusätzlich verstärkt, da auch diese Fahrzeuge häufig über längere Zeit und auch nach beendeter Ladung an den Ladestationen verbleiben und die dazugehörigen Parkplätze für andere Elektrofahrzeuge blockieren. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass elektrische Carsharing-Fahrzeuge in Stuttgart bisher anderen Tarifbedingungen unterliegen als Privatnutzer. Während Letztere eine an die Parkzeit gekoppelte Gebühr zahlen, profitieren Sharing-Fahrzeuge unabhängig von ihrer Standzeit von einem Pauschaltarif für das Aufladen. Um die Auslastung der Ladepunkte bei einer steigenden Verbreitung privat genutzter Elektrofahrzeuge künftig zu optimieren, sollte nach anderen Ansätzen gesucht werden, Sharing-Fahrzeugen weiterhin ein angemessenes Tarifmodell zu bieten. Gleichzeitig sollten aber Anreize gesetzt werden, die Stehzeiten an den Ladepunkten möglichst gering zu halten. Im Falle des Zusammenspiels mit elektrischen Carsharing-Flotten müssen konzeptionelle Lösungen gefunden werden, um die Fluktuation auf den Ladepunkten zu erhöhen. Eine Möglichkeit wäre es beispielsweise, die Carsharing-Nutzer, analog zum Vorgang des Ladens leergefahrener Fahrzeuge, mit einigen Freiminuten für die Nutzung eines geladenen Fahrzeugs zu belohnen.

So kann man zusammenfassend festhalten, dass neben einer besseren Vernetzung der einzelnen Infrastrukturanbieter hinsichtlich Zugang und Abrechnung die kommunalen Gegebenheiten wie das jeweilige Parkplatzangebot und die vorhandenen Mobilitätsanbieter einer Stadt bei der Planung und dem Ausbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur Beachtung finden müssen. Weiterhin sollte künftig noch intensiver um die Beteiligung privatwirtschaftlicher Akteure beim Aufbau von „halböffentlicher“ Ladeinfrastruktur geworben werden. Denn die Gelegenheiten zum Laden von privaten Elektrofahrzeugen stehen meist mit parallel angebotenen Aktivitäten für den Fahrzeugfahrer im Zusammenhang, sodass sich beim künftig erwarteten Markthochlauf schrittweise neue Verknüpfungsmöglichkeiten mit anderen Produkten oder Dienstleistungen ergeben werden. Zudem liegt ein weiterer möglicher Förderungsschwerpunkt auf dem Aufbau von Ladeinfrastruktur bei Unternehmen bzw. Arbeitgebern, da die Verfügbarkeit von Ladestationen am Arbeitsplatz einen hohen Anreiz und einen Sicherheitsfaktor für (potenzielle) Nutzer von Elektrofahrzeugen darstellt (vgl. Abbildung 63).

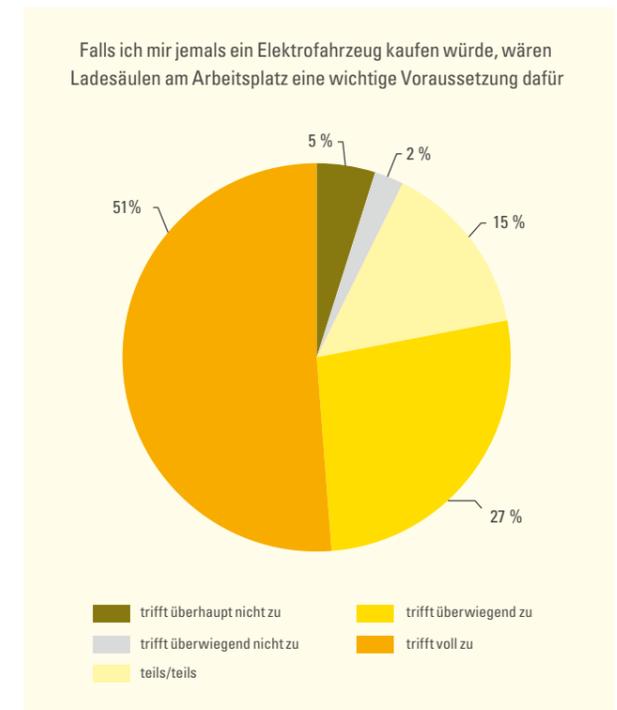


Abbildung 63: Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz als Voraussetzung für Nutzerakzeptanz von Elektromobilität.

Kapitel 5

BESTEHENDE HERAUSFORDERUNGEN AUS AKTEURSSICHT

Mit Beginn der geplanten Markthochlaufphase Anfang des Jahres 2015 stehen neben technischen Weiterentwicklungen vor allem wirtschaftliche Rahmenbedingungen wie Anreizmechanismen, Standardisierungen und gesetzliche Regulierung im Fokus der beteiligten Akteure. Deutschland und speziell Baden-Württemberg haben gute Chancen, zu den Leitanbietern im Bereich der Elektromobilität zu gehören. Dies zeigen gerade die innovativen Forschungsprojekte im Land.

Kern der F&E-Anstrengungen wird aus Sicht der Industrie die Weiterentwicklung künftiger Speichertechnologien sein. Die Chancen, im Markt der aktuellen Lithium-Ionen-Technologie nennenswerte Markterfolge zu erzielen, werden eher gering eingeschätzt. Dennoch hat gerade das Land Baden-Württemberg mit seiner breit aufgestellten Forschungs- und Produktionslandschaft eine solide Ausgangsposition für die Erforschung innovativer Alternativen. Inwieweit die hiesigen Unternehmen in Zukunft jedoch wettbewerbsfähige Produktionskapazitäten für die Batterieherstellung aufbauen können, ist derzeit noch offen.

Vertreter der Politik sehen ihre Aufgabe hierbei in der Vernetzung der Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft, um eine Innovationsführerschaft zu erreichen, die gleichzeitig eine hohe Marktnähe aufweist. Auch aus Sicht der Anwender ist die Weiterentwicklung der Batterien mit dem Ziel einer signifikanten Reichweitensteigerung ein wichtiger Aspekt, der die Attraktivität und die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen deutlich erhöhen würde.

Aus wirtschaftlicher Sicht müssen erfolgversprechende Nutzungskonzepte identifiziert und weiter ausgebaut werden. Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Schaufensterprogrammen weisen darauf hin, dass die Integration von Elektrofahrzeugen in flexible Nutzungskonzepte wie Carsharing, Leasing oder der Einsatz in betrieblichen Flotten zur Reduktion der Nutzungshürden und Vorbehalte beim Endkunden beitragen. So wurde seitens der Industrievertreter die nur schleppend voranschreitende Integration von Elektrofahrzeugen in öffentliche Flotten kritisiert, die bisher noch hinter den gesteckten Zielen zurückbleibt. Wichtig ist hierbei der Abbau von Vorbehalten der Fuhrparkbetreiber gegenüber organisatorischen und finanziellen Mehraufwänden.

Unklar bleibt weiterhin, zu welchen Teilen öffentliche Hand, Energieversorger und Fahrzeughersteller ihren Beitrag zu einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur leisten werden. Deren wichtige Funktion für eine positive öffentliche Wahrnehmung wurde sowohl von Experten der Industrie als auch des öffentlichen Sektors übereinstimmend hervorgehoben.

Um die zuvor beschriebenen Hürden zu senken, bedarf es einer Reihe organisatorischer und regulatorischer Weichenstellungen, deren Umsetzung teilweise bereits begonnen hat. So sehen gerade Industrievertreter die bundesweite Einführung von Privilegien für Fahrer von Elektrofahrzeugen als entscheidende Maßnahme. Hierbei gilt es, das optimale Verhältnis zwischen Mehrwert für den Nutzer und einer Wirkung auf Ebene des Gesamtsystems zu finden. Der Widerstand einiger Kommunen gegen die Nutzung von Busspuren oder die Schaffung kostenloser Stellplätze zeigt bereits das Dilemma: Der Vorzug eines Verkehrsmittels hat immer auch Auswirkungen auf die Situation anderer Verkehrsträger und muss jeweils im Kontext des gesamten Verkehrssystems sorgsam geprüft werden.

Neben der Forderung nach nicht-monetären Anreizen wurde deutlich, dass auch das Thema der finanziellen Anschubhilfen in Zukunft weiterhin diskutiert werden wird. So forderten Vertreter der Automobilindustrie Sonderabschreibungen für Dienstwagen und weitere Steuererleichterungen für Elektrofahrzeuge. Auch direkte Kaufprämien sollten, da mittlerweile ein nennenswertes Angebot an Fahrzeugen am Markt verfügbar sei, in Zukunft weiterhin vom Gesetzgeber geprüft werden. Der internationale Vergleich zeigt den Zusammenhang von Förderung und Markthochlauf deutlich, weshalb eine Übertragung von Best Practices im Bereich der Förderung auf Deutschland und Baden-Württemberg in Betracht gezogen werden könnte.

Es lässt sich somit festhalten, dass Wirtschaft und Politik weiterhin gemeinsam daran arbeiten müssen, die Elektromobilität auf dem Weg zum Massenmarkt weiterzuentwickeln.



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb.	8	Abbildung 33:	Markthochlauf von Elektrofahrzeugen in Deutschland.	48
Abbildung 2:	Die Vielfalt elektromobiler Fahrzeugkonzepte.	9	Abbildung 34:	Kostenverlauf beim Li-Ionen-Batteriesystem.	49
Abbildung 3:	Auswahl aktueller und geplanter elektromobiler Fahrzeugkonzepte.	10	Abbildung 35:	Übersicht zu Kostenverläufen beim Li-Ionen-Batteriesystem.	50
Abbildung 4:	Energie- und Leistungsdichten unterschiedlicher Speichertechnologien.	11	Abbildung 36:	Exemplarische Kostenentwicklungen verschiedener Fahrzeugkonzepte bis 2025 (in Euro).	53
Abbildung 5:	Energiedichte unterschiedlicher Energieträger im Vergleich.	12	Abbildung 37:	Preisentwicklung am batterieelektrischen Fahrzeug von 2010–2025.	53
Abbildung 6:	Unterschiedliche Materialvarianten bei Lithium-Batteriezellen.	13	Abbildung 38:	Wertschöpfung im Bereich Batteriesystem.	56
Abbildung 7:	Lithium-Batteriezellen unterschiedlicher Hersteller.	14	Abbildung 39:	Veränderungen der globalen Wertschöpfung (2013 im Vergleich zum Jahr 2025 bzw. 2030).	57
Abbildung 8:	Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung.	17	Abbildung 40:	Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg im Jahr 2025 in Milliarden Euro.	59
Abbildung 9:	Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batteriezellen bei unterschiedlichen Temperaturen.	18	Abbildung 41:	„Ausschöpfbare“ Wertschöpfungspotenziale für Baden-Württemberg im Jahr 2025 in Milliarden Euro.	61
Abbildung 10:	Drehmoment- und Leistungskennlinien im Vergleich.	19	Abbildung 42:	Beschäftigungspotenziale in Baden-Württemberg im Jahr 2025.	63
Abbildung 11:	Bauarten elektrischer Maschinen.	20	Abbildung 43:	Gesamtkostenvergleich zwischen Verbrennungs- und Elektrofahrzeug.	64
Abbildung 12:	Radnabenantriebe: Historischer Rückblick und aktuelle Konzepte.	22	Abbildung 44:	Maßnahmen zur Förderung von Elektrofahrzeugen.	65
Abbildung 13:	Schematische Topologie einer Leistungselektronik mit HV-Batterie und NV-Bordnetz.	23	Abbildung 45:	Einfluss der Förderung von Elektrofahrzeug-Privatkunden auf die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen.	66
Abbildung 14:	Wesentliche Bestandteile eines Inverters.	24	Tabelle 46:	Kaufförderung von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Ländern.	67
Abbildung 15:	Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ionen-Zelle bei Schnellladung.	25	Abbildung 47:	Internationaler Vergleich von Leitmärkten und Leitanbietern.	68
Abbildung 16:	Reichweitenabnahme eines batterieelektrischen Fahrzeugs bei steigender Klimasystem-Leistung.	29	Abbildung 48:	Internationaler Vergleich von Regionen.	68
Abbildung 17:	Beispiele für Komponenten zur Klimatisierung des Innenraums elektromobiler Antriebskonzepte.	30	Abbildung 49:	Projekte in Baden-Württemberg in wichtigen Wertschöpfungssegmenten.	73
Abbildung 18:	Typ-2-Stecker (oben) und CCS-Kupplung (unten) (Fahrzeugseite).	32	Tabelle 50:	Wie hat sich das Thema Elektromobilität in den vergangenen fünf Jahren entwickelt?	75
Abbildung 19:	Typ-1-Stecker (Fahrzeugseite).	32	Tabelle 51:	Wo sehen Sie die Gründe für die bisher so geringen Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen?	76
Abbildung 20:	Aufbau eines induktiven Ladesystems.	34	Tabelle 52:	Wie hat sich das Thema Elektromobilität speziell auf die Strukturen in Ihrem Unternehmen ausgewirkt?	77
Abbildung 21:	Landkarte von wichtigen Automobilzulieferunternehmen in Baden-Württemberg.	38	Tabelle 53:	Wie bewerten Sie die Position deutscher Unternehmen im Bereich der Batterietechnologie?	78
Abbildung 22:	Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-PKW in Deutschland.	39	Tabelle 54:	Wie sind, Ihrer Einschätzung nach, baden-württembergische Unternehmen im Vergleich zur ausländischen Konkurrenz aufgestellt?	79
Abbildung 23:	Struktur der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg im Jahr 2013.	40	Tabelle 55:	Wie beurteilen Sie den Status quo der Ladeinfrastruktur und welche Maßnahmen erwarten Sie für die Zukunft?	80
Abbildung 24:	Globale PKW-Marktentwicklung 2011–2013.	41	Tabelle 56:	Wie bewerten Sie den Beitrag der öffentlichen Förderung zum aktuellen Status quo der Elektromobilität?	81
Abbildung 25:	Globaler Absatz von Elektrofahrzeugen 2011–2013.	42	Tabelle 57:	Was erwarten Sie im Bereich der öffentlichen Förderung für die kommenden Jahre?	82
Abbildung 26:	Globale Carsharing-Marktentwicklung 2011–2014.	42	Tabelle 58:	Welche Ziele sollten sich die öffentlichen Institutionen weiterhin setzen?	83
Abbildung 27:	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebskonzepte.	43	Abbildung 59:	Alltagstauglichkeit heutiger Reichweiten von Elektrofahrzeugen.	84
Abbildung 28:	Total-Cost-of-Ownership-Vergleich von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen verschiedener Fahrzeugsegmente bei unterschiedlichen Einsatzzwecken.	43	Abbildung 60:	Nutzermeinung zur Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Systeme.	85
Tabelle 29:	Substitution von Privatfahrzeugen durch Carsharing.	44	Abbildung 61:	Nutzererwartungen an einzelne Eigenschaften von Elektrofahrzeugen vor dem Feldversuch.	86
Abbildung 30:	Entwicklung der Stückzahlen auf dem globalen Automobilmarkt.	45	Abbildung 62:	Nutzerbewertung einzelner Eigenschaften von Elektrofahrzeugen nach einer zweiwöchigen Praxiserfahrung.	87
Abbildung 31:	Produktionsstarts von Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen.	46	Abbildung 63:	Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz als Voraussetzung für Nutzerakzeptanz von Elektromobilität.	89
Abbildung 32:	Marktentwicklung der verschiedenen Antriebssysteme.	47			

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Antiblockiersystem	ISG	Integrierter Startergenerator
AC	Alternating Current (Wechselstrom)	IT	Informationstechnik
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (Europäischer Automobilherstellerverband)	KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
AfA	Absetzung für Abnutzung	KSG	Kurbelwellenstartergenerator
AG	Aktiengesellschaft	LCO	Lithium-Kobaltdioxid
AGR	Abgasrückführung	LFP	Lithium-Eisenphosphat
ASM	Asynchronmaschine	LH ₂	Flüssiger Wasserstoff
ASR	Antriebsschlupfregelung	LKW	Lastkraftwagen
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)	LMO	Lithium-Mangan-Spinelldioxid
CAI	Controlled Auto Ignition (homogene Kompressionszündung)	LMP	Lithium-Metall-Polymer
CCS	Combined Charging System	LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)	LNO	Lithium-Nickeldioxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
CP	Control Pilot	LTO	Lithium-Titanat
DC	Direct Current (Gleichstrom)	MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
DCB-Layer	Direct Copper Bonded Layer	MRC	Magnetic Resonance Coupling
DoD	Depth of Discharge (Entladungstiefe)	NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumdioxid
EFZ	Elektrofahrzeug (umfasst BEV, PHEV und REEV gemäß [Bundesregierung (2009)])	Nd-Fe-B	Neodym-Eisen-Bor
EmoG	Elektromobilitätsgesetz	NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltdioxid
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	NV	Niedervolt
ESP	Electronic Stability Program	NVH	Noise-Vibration-Harshness
EU	Europäische Union	PE	Protective Earth (Schutzleiter)
F&E	Forschung und Entwicklung	PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)	PKW	Personenkraftwagen
G	Grafit	PLC	Powerline Communications
GaN	Galliumnitrid	PP	Proximity Pilot
GH ₂	Gasförmiger Wasserstoff	PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
GPS	Global Positioning System	PTC	Positive Temperature Coefficient (Positiver Temperaturkoeffizient)
GRM	Geschaltete Reluktanzmaschine (Switched Reluctance Machine)	REEV	Range-Extended Electric Vehicle (Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung)
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition (homogene Kompressionszündung)	RFID	Radio Frequency Identification
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug)	RSG	Riemengetriebener Startergenerator
HSM	Hybridsynchronmaschine	Schuko	Schutzkontaktsteckdose
HV	Hochvolt	SiC	Siliziumkarbid
ICCB	In Cable Control Box	SoC	State of Charge (Ladezustand)
ICE	Internal Combustion Engine (meint: konventionell verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug)	SRM	Switched Reluctance Machine (Geschaltete Reluktanzmaschine)
ICEopt.	Optimized Internal Combustion Engine (meint: zur Verbrauchsoptimierung elektrifiziertes konventionelles Fahrzeug)	SSM	Stromerregte Synchronmaschine
ICNIRP	International Commission on non-ionizing radiation protection (Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung)	TCO	Total Cost of Ownership
IEC	International Electrotechnical Commission	VCR	Variable Compression Ratio (Variable Verdichtung)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	VVL	Variable Valve Lift (Variable Ventilhubsteuerung)
IPT	Inductive Power Transfer	VVT	Variable Valve Timing (Zeitlich variable Ventilsteuerung)
		WLAN	Wireless Local Area Network

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 ACEA (2012)
Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (2012): „ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles“, http://www.acea.be/uploads/publications/Updated_ACEA_position_on_charging_ECVs.pdf (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 2 Ackermann (2013)
Ackermann, J., Brinkkötter, C., Priesel, M. (2013): „Neue Ansätze zur energieeffizienten Klimatisierung von Elektrofahrzeugen“, in: ATZ 6/2013.
- 3 ADAC (2012)
Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. (2012): „Wir investieren jedes Jahr 400 Millionen Euro in Elektromobilität“, <http://adacemobility.wordpress.com/2012/02/03/wir-investieren-jedes-jahr-400-millionen-euro-in-elektromobilitat/> (letzter Zugriff 09.09.2014).
- 4 AlixPartners (2014)
AlixPartners (2014): „Caution: Blind Curves Ahead: The Alix Partners Global Automotive Outlook“, AlixPartners, München.
- 5 AMS (2014)
auto-motor-und-sport.de (2014): „Elektroautos – 6 Modelle im Härtetest“, <http://www.auto-motor-und-sport.de/vergleichstest/elektroautos-6-modelle-im-haertetest-8498096.html> (letzter Zugriff 10.11.2014).
- 6 Anderman (2013)
Anderman, M. (2013): „Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Report“, Advanced Automotive Batteries, Oregon House.
- 7 André (2014)
André, M., Andrieux, G., Cremer, S., Basset, T. (2014): „Innovative Elektrifizierung von Nebenaggregaten“, in: MTZ 4/2014.
- 8 Argonne National Laboratory (2013)
Miller, J. (2013): „Energy Storage: Current Status and Future Trends“, JRC high-level meeting „Building a Transatlantic Scientific Bridge on Eco-Industries“, 26.09.2013, Brüssel.
- 9 A.T. Kearney (2012)
Kremlicka, R. (2012): „Megatrends in der Automobilindustrie und ihre Auswirkungen auf den AC Centrope“, Jahresevent Mobilitätscluster Wien, 30.01.2012, Wien.
- 10 A.T. Kearney/TU Wien (2012)
Haslauer, F. et al. (2012): „100 % Strom aus erneuerbaren Energien für E-Mobilität: Effekte, Marktszenarien und Handlungsempfehlungen“, A.T. Kearney/Technische Universität Wien, Wien.
- 11 Audi (2013)
Stadler, R., zitiert in Seiwert, M. (2013): „E-Auto-Batterien: Daimler und Evonik suchen Partner für Li-Tec“, <http://www.wiwo.de/unternehmen/automobil/dramatischer-preis-verfall-e-auto-batterien-daimler-und-evonik-suchen-partner-fuer-li-tec/8350860.html> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 12 Autobild (2014)
autobild.de (2014): „Elektroautos im Wintertest“, <http://www.autobild.de/artikel/elektroautos-im-wintertest-4508538.html> (letzter Zugriff 10.11.2014).
- 13 Automobil Industrie (2014)
Keil, T. et al. (2014): „Die Top-100 Automobilzulieferer des Jahres 2013“, in: Automobil Industrie 4 (2014).
- 14 AW (2014)
Automotive World (2014): „CHAdEMO officially recognised as international DC fast charging standard published by IEC“, <http://www.automotiveworld.com/news-releases/chademo-officially-recognised-international-dc-fast-charging-standard-published-iec/> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 15 Aymanns (2014)
Aymanns, R., Uhlmann, T., Scharf, J., Nebbia, C., Höpke, B., Lückmann, D., Stapelbroek, M., Plum, T. (2014): „Elektrische Zusatzaufladung – neue Freiheitsgrade durch höhere Bordnetzspannungen“, 9. MTZ-Fachtagung: „Der Antrieb von morgen – Elektrifizierung: Was erwartet der Kunde?“, 28./29.01.2014, Wolfsburg.
- 16 Backhaus (2014)
Backhaus, R. (2014): „Verbrennungsmotoren-Entwicklung: Viele kleine Schritte zur CO₂-Reduzierung“, <http://www.springerprofessional.de/verbrennungsmotoren-entwicklung-viele-kleine-schritte-zur-co2-reduzierung/5438336.html> (letzter Zugriff 14.11.2014).
- 17 Bauer (2014)
Bauer, C. (2014): „Untersuchung des Einflusses einzelner Rohstoffe auf die Absatzentwicklung alternativer PKW-Antriebskonzepte bis 2030“, TU Wien, Wien.
- 18 BCG (2009)
Dinger, A. et al. (2009): „Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2010“, The Boston Consulting Group, Boston.
- 19 Bernhart et al. (2013)
Bernhart, W. (2013): „Fuel cells – A realistic alternative for zero emission?“, Roland Berger Strategy Consultants, München.
- 20 Bloomberg New Energy Finance (2012)
Froestel, C., zitiert in Mock, W., Trechow, P.: (2012): „Batterien bleiben größte Hürde für Stromer“, in: VDI nachrichten, Ausgabe 26.
- 21 BMW (2014)
BMW Group (2014): „BMW Group treibt Entwicklung von Systemen für induktives Laden von Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen voran.“, https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=bmw-group-treibt-entwicklung-von-systemen-f%C3%BCr-induktives-laden-von-elektro-und-plug-in-hybrid&outputChannelId=7&id=T0186710DE&left_menu_item=node__5236 (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 22 BMZ (2011)
Bauer, S. (2011): „Batterien für das Elektroauto: Fünf große Hersteller beherrschen den Weltmarkt“, <https://adacemobility.wordpress.com/2011/03/07/batterien-fur-das-elektroauto-funf-gro-se-hersteller-beherrschen-den-weltmarkt-%E2%80%93-experten-interview/> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 23 Bombardier (2014)
Bombardier (2014): „primove“, <http://primove.bombardier.com/de/> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 24 Bombardier (2014a)
Sebayang, A. (2014): „Erste Induktionshaltestellen für Busse in Mannheim im Bau“, <http://www.golem.de/news/bombardier-primove-erste-induktionshaltestellen-fuer-busse-in-mannheim-im-bau-1405-106194.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 25 Bosch (2013)
Fetzer, J. (2013): „Li-Ion Batteries go Automotive – Trends, Technologies, Value chain“, Vorlesungsreihe „Technologieführer der Automobilindustrie stellen sich vor“, 25.4.2013, Stuttgart.
- 26 BRUSA (2014)
BRUSA (2014): „BRUSA verdoppelt die Leistungsdichte beim induktiven Laden“, [http://www.brusa.eu/index.php?id=55&tx_ttnews\[tt_news\]=240](http://www.brusa.eu/index.php?id=55&tx_ttnews[tt_news]=240) (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 27 Bundesregierung (2009)
Bundesregierung (2009): „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung“, Bundesregierung, Berlin.
- 28 Bundesregierung (2010)
Bundesregierung (2010): „Das Energiekonzept 2050“, Bundesregierung, Berlin.
- 29 Bundesverband eMobilität (2011)
Siegl, K. (2011): „Wir rechnen 2020 mit fünf Millionen Elektroautos“, <http://www.zeit.de/auto/2011-10/interview-kurt-sigl> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 30 Butov et al. (2014)
Butov, A., Herrmann, F., Merkert, M., Nägele, F. (2014): „Modulares Fertigungskonzept für E-Motoren“, in: ATZextra 11/2014.
- 31 Canzler (2010)
Canzler, W. (2010): „Mobilitätskonzepte der Zukunft und Elektromobilität“, in: acatech DISKUTIERT, Elektromobilität – Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen, Springer, Berlin/Heidelberg.
- 32 CCC 2020 BEV (2012)
Cluzel, C., Douglas, C. (2012): „Cost and performance of EV batteries – Final Report for The Committee on Climate Change“, Element Energy, Cambridge.
- 33 Cebulski (2011)
Cebulski, B. (2011): „Leistungselektroniken im Fahrzeugantrieb“, in: ATZ Elektronik 01/2011.
- 34 CHAdEMO (2014)
CHAdEMO (2014): „Technological details“, <http://www.chademo.com/wp/technology/details/> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 35 CHAdEMO (2014a)
CHAdEMO (2014): „Charging Protocol“, http://www.chademo.com/05_protocol.html (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 36 Competence E (2014)
Competence E (2014): „Integrierte Entwicklung von neuen elektrischen Energiespeichern und elektrischen Antriebssystemen“, http://www.competence-e.kit.edu/downloads/Competence_E_Standard_Jan_2014_de.pdf (letzter Zugriff 15.12.2014).

- 37 Competence E (2014a)
Competence E (2014): „MAT4BAT – Advanced Materials for batteries“, <http://www.competence-e.kit.edu/239.php> (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 38 Conductix (2012)
Conductix-Wampfler (2012): „12-Meter langer Elektrobus mit induktivem Gelegenheitsladen im Linieneinsatz“, http://www.conductix.de/sites/default/files/downloads/PR_12-10-01_12-Meter_langer_Elektrobus_mit_induktivem_Gelegenheitsladen_im_Linieneinsatz.pdf (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 39 DENSO (2014)
DENSO (2014): „Electric Compressor“, <http://denso-europe.com/products/thermal/electric-compressor/> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 40 DKE (2014)
Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informations-technik (2014): „Normen und VDE-Anwendungsregeln zu E-Mobility“, http://www.dke.de/de/std/e-mobility/Seiten/ARNorm_Emo_Tab_neu.aspx (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 41 DLR (2013)
DLR (2013): „Batterie oder Brennstoffzelle – was bewegt uns in Zukunft?“, in: DLR-Magazin Nr. 139.
- 42 E-Auto.TV (2014)
E-Auto.TV (2014): „Reichweite von Elektroautos im Praxistest“, <http://e-auto.tv/reichweite-von-elektroautos-im-praxistest.html> (letzter Zugriff 10.11.2014).
- 43 Eberspächer (2014)
Eberspächer (2014): „Dritte Hochvolt-Heizer-Generation für Elektrofahrzeuge: Kompakter, leichter, wirtschaftlicher“, <http://www.eberspaecher.com/presse/pressemitteilungen/einzelansicht/article/dritte-hochvolt-heizer-generation-fuer-elektrofahrzeuge-kompakter-leichter-wirtschaftlicher.html> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 44 Electriva (2014)
Electriva.net (2014): „These des Monats Mai 2014: „Deutschland darf beim Aufbau eines DC-Schnellladenetzes nicht auf CHAdeMO verzichten.““, http://www.electriva.net/wp-content/uploads/2014/06/Auswertung_TdM_Mai_Schnellladnetz_CHAdeMO.pdf (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 45 Elstein (2014)
Elstein (2014): „Flächenstrahler“, <http://www.elstein.com/de/elstein-produkte/flaechenstrahler/> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 46 EU (2014)
European Commission (2014): „EU lanciert Strategie für umweltfreundliche Kraftstoffe“, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-40_de.htm (letzter Zugriff 20.01.2014).
- 47 European Commission (2012)
Schrote, A. (2012): „Behavioural Climate Change Mitigation – Options and Their Appropriate Inclusion in Quantitative Longer Term Policy Scenarios“, CE Delft, Delft.
- 48 EVsroll (2014)
EVsroll (2014): „Electric Vehicle Sales - Did well in 2013 and Mixed in 2014“, http://evsroll.com/Electric_Vehicle_Sales.html (letzter Zugriff 01.12.2014).
- 49 Express (2014)
Auto Express (2014): „Mercedes will offer wireless charging by 2016“, <http://www.autoexpress.co.uk/car-news/88647/mercedes-will-offer-wireless-charging-by-2016> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 50 Fazel (2013)
Fazel, L. (2013): „Akzeptanz von Elektromobilität. Entwicklung und Validierung eines Modells unter Berücksichtigung der Nutzungsform des Carsharing“, Springer Gabler, Wiesbaden.
- 51 Firnkorn (2011)
Firnkorn, J., Müller, M. (2011): „What will be the environmental effects of new free-floating car-sharing systems? The case of car2go in Ulm“, in: Ecological Economics 70.
- 52 FKFS (2012)
FKFS (2012): „Ganzheitliches Thermomanagement im E-Fahrzeug“, http://www.fkfs.de/uploads/media/PM_2012_08_ProjektstartGaTE.pdf (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 53 Franke (2011)
Franke, J., Dobroschke, A. (2011): „Prozessentwicklung für die Serienfertigung von elektrischen Fahrantrieben“, E-Motive Expertenforum „Elektrische Fahrzeugantriebe“, 07./08.09.2011, Aachen.
- 54 Franke (2012)
Franke, T. et al. (2012): „Experiencing range in an electric vehicle – understanding psychological barriers“, in: Applied Psychology: An International Review, Vol. 61 (3).
- 55 Franke/Krems (2013)
Franke, T., Krems, J. (2013): „What drives range preferences in electric vehicle users?“, in: Transport Policy, Vol. 30.
- 56 Fraunhofer ICT (2012)
Fraunhofer ICT (2012): „Innovative On-Board-Energiewandler“, http://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/nas_InnoROBE-Steckbrief.pdf (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 57 Fraunhofer IISB (2014)
Eckardt, B. (2014): „Elektroautos effizient induktiv laden“, <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2014/August/elektroautos-effizient-induktiv-laden.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 58 Fraunhofer IPA (2014)
Fraunhofer IPA (2014): „PowerCap-Technologie soll Marktführerschaft bringen“, http://www.ipa.fraunhofer.de/PowerCap-Technologie_soll_Marktfuehrerschaft_bringen.3062.0.html (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 59 Fraunhofer ISE (2013)
Reichert, S. (2013): „Es geht auch ohne Kabel – Hocheffizientes induktives Ladesystem für Elektrofahrzeuge entwickelt“, <http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presse-informationen/presseinformationen-2013/es-geht-auch-ohne-kabel> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 60 Fraunhofer ISI (2010)
Schraven, S., Kley, F., Wietschel, M. (2010): „Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung“, http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e-x/working-papers-sustainability-and-innovation/WP8-2010_Induktive-Ladung-EV.pdf (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 61 Fraunhofer ISI (2012)
Thielmann, A. et al. (2012): „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- 62 Fraunhofer ISI (2012a)
Fraunhofer ISI (2012): „Roadmap zur Kundenakzeptanz – Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- 63 Fraunhofer ISI (2014)
Zanker, C. (2014): „Internationales Benchmarking des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West“, Expertenworkshop, 04.02.2014, Stuttgart.
- 64 Friedrich (2013)
Friedrich, R. (2013): „Das 48V Bordnetz – Pflicht oder Kür?“, http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/Vortrag_TU_Berlin_Final_Netz.pdf (letzter Zugriff 13.11.2014).
- 65 Friedrich (2014)
Friedrich, K.A., Cañas, N. A., Pascucci, B., Wagner N. (2014): „Lithium-Sulfur Batteries: New insights and developments“, World of Energy Solutions, 06.–08.10.2014, Stuttgart.
- 66 Frost & Sullivan (2009)
Frost & Sullivan (2009): „World Ultracapacitor Markets“, Frost & Sullivan, San Antonio.
- 67 Frost & Sullivan (2012)
Frost & Sullivan (2012): „Business Models and Opportunities in the European Traditional and Peer-to-Peer Carsharing Market“, Frost & Sullivan, San Antonio.
- 68 Frost & Sullivan (2012a)
Frost & Sullivan (2012): „Analysis of the Global Hybrid Electric and Electric Vehicle Lithium-ion Battery Market“, Frost & Sullivan, San Antonio.
- 69 Frost & Sullivan (2014)
Frost & Sullivan (2014): „Strategic Insight of the Global Carsharing Market“, Frost & Sullivan, San Antonio.
- 70 Frost & Sullivan (2014a)
Frost & Sullivan (2014): „Outlook of the Global Automotive Aftermarket. High Growth in Vehicle Population to Create New Opportunities for Parts and Service Suppliers“, Frost & Sullivan, San Antonio.
- 71 Future Matters (2013)
Thomsen, L., zitiert in Klöckner, J. (2013): „Trendforscher: Elektroautos 2016 billiger als herkömmliche Spritschlucker“, <http://green.wiwo.de/trendforscher-elektroautos-2016-billiger-als-herkoemmlische-spritschlucker/> (letzter Zugriff 04.12.2014).

- 72 GGEMO (2013)
Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (2013): „Leuchtturmprojekt „e-generation“ – Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge“, http://www.konferenz-elektromobilitaet.de/ausstellung/leuchtturmprojekte/20130530_egeneration_text.pdf?PHPSESSID=88031fc5b29bc48129b659000558e4ad (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 73 Golem (2013)
Golem.de (2013): „Bosch bietet drahtloses Ladesystem für Elektroautos“, <http://www.golem.de/news/elektromobilitaet-bosch-bietet-drahtloses-ladesystem-fuer-elektroautos-1306-99816.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 74 Götte (2014)
Götte, C., Graf, F., Klein, B. (2014): „48-V-Elektrifizierung – bezahlbare Hybridisierung mit hohem Kundennutzen“, 9. MTZ-Fachtagung „Der Antrieb von morgen – Elektrifizierung: Was erwartet der Kunde?“, 28./29.01.2014, Wolfsburg.
- 75 Greengear (2014)
Rau, M. (2014): „Elektrischer Antrieb – die Brennstoffzelle“, <http://www.greengear.de/elektrischer-antrieb-die-brennstoffzelle/> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 76 Großmann (2013)
Großmann, H. (2013): „PKW-Klimatisierung“, Springer, Berlin.
- 77 Hagen (2011)
Hagen, M. (2011): „Schweflige Zukunft für größere Reichweiten“, <http://www.bem-ev.de/schweflige-zukunft-fur-groessere-reichweiten/> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 78 Hahn (2011)
Hahn, H. (2011): „Die strategische Bedeutung von Lithium, Kobalt und Seltenen Erden für E-Mobilität“, EUROFORUM „Rohstoffe für E-Mobilität“, 25./26.05.2011, Stuttgart.
- 79 Hartnig (2011)
Hartnig, C., Krause, T. (2011): „Neue Materialkonzepte für Lithium-Ionen-Batterien“, in: ATZ Elektronik 3/2011.
- 80 Harvard (2014)
Harvard School of Engineering and Applied Sciences (2014): „Organic mega flow battery promises breakthrough for renewable energy“, <http://www.seas.harvard.edu/news/2014/01/organic-mega-flow-battery-promises-breakthrough-for-renewable-energy> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 81 Herron (2014)
Herron, D. (2014): „China’s electric car fast charging (GB/T 20234) to become world standard?“, <http://www.longtailpipe.com/2014/02/chinas-electric-car-fast-charging-gbt.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 82 Hofmann (2014)
Hofmann, P. (2014): „Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft“, Springer, Wien.
- 83 Huslage (2014)
Huslage, J. (2014): „The next generation of automotive batteries!“, World of Energy Solutions, 06.–08.10.2014, Stuttgart.
- 84 Hycenta (2005)
Klell, M. (2005): „Alternative Kraftstoffe – Wasserstoff“, http://www.hycenta.tugraz.at/Image/H2_allg_herstlg_MK_web.pdf (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 85 Hydrox (2014)
Hydrox (2014): „Wasserstoff“, <http://www.hydrox.de/index.htm> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 86 IEA (2013)
Trigg, T. (2013): „Global EV Outlook“, IEA, Paris.
- 87 IHK (2011)
Stahlecker, T., Lay, G., Zanker, C. (2011): „Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet?“, Industrie und Handelskammer Region Stuttgart, Stuttgart.
- 88 IHS (2014)
IHS (2014): „Automotive Hybrid-EV Portal“, <https://technology.ihs.com/Services/441485/ihs-automotive-hybrid-ev-portal> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 89 ika (2012)
Ernst, C.-S. et al. (2012): „CO₂-Reduzierungspotentiale bei PKW bis 2020 – Abschlussbericht 113510“, ika, Aachen.
- 90 InnoZ (2012)
InnoZ (2012): „InnoZ-Baustein 11 – Bewertung integrierter Mobilitätsdienste mit Elektrofahrzeugen aus Nutzerperspektive – Ergebnisse aus der Begleitforschung im Projekt BeMobility – Berlin elektroMobil“, InnoZ, Berlin.
- 91 Insider (2014)
Business Insider (2014): „Audi’s New Electric Concept Car Could Make Plug-In Charging Obsolete“, <http://www.businessinsider.com/heres-how-audi-just-made-plug-in-charging-obsolete-2014-5> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 92 IPT (2014)
IPT Technology (2014): „Startseite“, <http://www.ipt-technology.com/index.php/de/> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 93 ISEA (2014)
ISEA (2014): „Batterietechnologie und Speichersysteme – Redox-Flow-Batteriesysteme“, http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_redox_flow_batteries/ (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 94 ISO (2014)
International Organization for Standardization (2014): „ISO 15118 – Road vehicles – Vehicle to grid communication interface“, <http://www.iso.org/iso/home/search.htm?qt=15118&sort=rel&type=simple&published=on> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 95 ITWissen (2014)
IT Wissen (2014), „Smart Charging – Intelligentes Laden“, <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/smart-charging-Intelligentes-Laden.html> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 96 ixetic (2014)
ixetic (2014): „Heiz-/Kühl-Modul“, <http://www.ixetic.com/de/produkte/heizkuehlmodul/index.pmode> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 97 Jäger (2009)
Jäger, A., Maloca, S. (2009): „Dokumentation der Umfrage Modernisierung der Produktion 2009“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- 98 Johnson Controls (2010)
Molinaroli, A. (2010): „Elektroautos kommen nur langsam voran“, http://www.welt.de/welt_print/wirtschaft/article5889275/Elektroautos-kommen-nur-langsam-voran.html (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 99 JustPark (2013)
JustPark (2013): „Die Wallbox ist Geschichte – Brusa zeigt auf der Ecartech serienreifes Induktivsystem mit nur zwei Gehäusen“, <http://www.justpark.de/news/die-wallbox-ist-geschichte-brusa-zeigt-auf-der-ecartech-serienreifes-induktivsystem-mit-nur> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 100 JustPark (2014)
JustPark (2014): „Volkswagen will ab 2017 induktives Ladesystem als Zusatzoption anbieten – fehlende Standards als Kostentreiber“, <http://www.justpark.de/news/volkswagen-will-ab-2017-induktives-ladesystem-als-zusatzoption-anbieten-fehlende-standards-als> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 101 Kampker (2011)
Kampker, A., zitiert in Rees, J. (2011): „Revolutionäre Seele im Kleinwagenkörper“, <http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/aachener-streetscooter-revolutionaere-seele-im-kleinwagenkoerper/4611526.html> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 102 Kampker (2014)
Kampker, A. (2014): „Elektromobilproduktion“, Springer, Berlin.
- 103 Kane (2013)
Kane, M. (2013): „Tesla Roadster Battery Study proves that Nissan Leaf Battery is long lasting too“, <http://insideevs.com/tesla-roadster-battery-study-proves-that-nissan-leaf-battery-is-long-lasting-too/> (letzter Zugriff 05.09.2014).
- 104 Kinkel (2007)
Kinkel, S., Zanker, C. (2007): „Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie“, Springer, Berlin/Heidelberg.
- 105 KIT (2012)
Karlsruher Institut für Technologie (2012): „Projektstart: Projektierung qualitätsorientierter, serienflexibler Batterieproduktionssysteme“, http://www.kit.edu/kit/pi_2012_11670.php (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 106 Knie (2010)
Knie, A. (2010): „Elektromobilität: Innovationen nur in vernetzter Form“, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin.
- 107 Korte (2011)
Korte, V., Fraser, N., Taylor, J., Dingelstadt, R. (2011): „Effizientes Downsizing für zukünftige Ottomotoren“, in: MTZ 5/2011.
- 108 Korthauer (2013)
Korthauer, R. (2013): „Handbuch Lithium-Ionen-Batterien“, Springer, Berlin.
- 109 Kraftfahrtbundesamt (2014)
Kraftfahrtbundesamt (2014): „Statistik, 2014“, <http://www.kba.de/DE/Statistik/> (letzter Zugriff 20.01.2015).
- 110 Kraftfahrtbundesamt (2015)
Kraftfahrtbundesamt (2015): „Statistik, 2015“, <http://www.kba.de/DE/Statistik/> (letzter Zugriff 20.01.2015).
- 111 Kurz et al. (2014)
Kurz, K., Kleine-Möllhoff, P., Steinbiß, K. (2014): „Chancen und Risiken deutscher Automobilhersteller im Bereich Alternative Antriebe in der VR China (induktive Analyse)“, Hochschule Reutlingen, Reutlingen.

- 112 Lavrinc (2011)
Lavrinc, D. (2011): „Tesla lets us peek in on Model S development“, <http://green.autoblog.com/2011/03/22/tesla-lets-us-peek-in-on-model-s-development/> (letzter Zugriff 05.09.2014).
- 113 Leuthold (2014)
Leuthold, J. (2014): „Wireless Power Transfer für Elektrofahrzeuge - Eine Literaturstudie“, <http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01117/index.html?lang=de> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 114 Lutz (2008)
Lutz, B., Sauer, U., De Doncker, R. W. (2008): „Evolution of Batteries and Charging Concepts“, Seminar Clean Mobility, 16.12.2008, Diepenbeek.
- 115 Lux (2012)
See, K. (2012): „Every Last Drop: Micro And Mild Hybrids Drive a Huge Market for Fuel Efficient Vehicles“, Lux Research, Boston.
- 116 Markus (2013)
Markus, F. (2013): „First Drive: Porsche 918 Spyder“, http://www.motortrend.com/roadtests/exotic/1305_porsche_918_spyder_first_drive/tech_details.html (letzter Zugriff 13.01.2015).
- 117 Marx (2013)
Marx, P. (2013): „Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor“, http://www.mx-electronic.com/pdf/Wirkungsgrad-Vergleich_zwischen_Fahrzeugen_mit_Verbrennungsmotor_und_Fahrzeugen_mit_Elektromotor.pdf (letzter Zugriff 05.11.2014).
- 118 Mathoy (2010)
Mathoy, A. (2010): „Grundlagen für die Spezifikation von E-Antrieben“, in: MTZ 9/2010.
- 119 McKinsey (2012)
Kaar, H.-W., zitiert in Trechow, P. (2012): „Preissturz bei Lithium-Ionen-Akkus bringt Bewegung in den Automobilmarkt“, in: VDI nachrichten, Ausgabe 26.
- 120 McKinsey (2014)
Malorny, C. (2014): „Elektromobilität rund um den Globus“, Hauptstadtkonferenz Elektromobilität 2014, 26.03.2014, Berlin.
- 121 Meszler (2014)
Meszler, D., German, J., Mock, P., Bandivadekar, A., Tu, J. (2014): „Summary of Eastern EU labor rate impacts on EU cost curves“, International Council on Clean Transportation, Berlin.
- 122 Miorini (2013)
Miorini, H. (2013): „Globale Automobile Trends – Ausblick 2020“, <http://fahrzeugtechnik.fh-joanneum.at/workshops/2013-2014/2014-01-29-Globale-Automobile-Trends.pdf> (letzter Zugriff 13.11.2014).
- 123 Mock (2010)
Mock, P. (2010): „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)“, DLR, Stuttgart.
- 124 Möller (2011)
Möller, K. C. (2011): „Zukunft der Akkutechnologie“, in: ATZ Elektronik 3/2011.
- 125 Moody's (2014)
Moody's (2014): „China drives global auto sales growth, while growth rate for US shipments set to decline“, https://www.moody.com/research/Moodys-China-drives-global-auto-sales-growth-while-growth-rate-PR_309119?WT.mc_id=AM~RmluYW56ZW4ubmV0X1JlJTQ9SfYXRpbmdzX05ld3NfTm9fVHJhbnNsYXRpb25z~20140924_PR_309119 (letzter Zugriff 10.12.2014).
- 126 Mültin (2014)
Mültin, M. (2014): „Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home“, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000042102> (letzter Zugriff 27.11.14).
- 127 Nanoflowcell (2014)
Nanoflowcell (2014): „Nanoflowcell“, <http://www.nanoflowcell.com> (letzter Zugriff 27.11.14).
- 128 Navigant Research (2014)
Jaffe, S. (2014): „The Lithium Ion Battery Market“, http://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/Jaffe_RANGE_Kickoff_2014.pdf (letzter Zugriff 30.1.2015).
- 129 NPE (2011)
Nationale Plattform Elektromobilität (2011): „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang“, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin.
- 130 NPE (2012)
Nationale Plattform Elektromobilität (2012): „Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht)“, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin.
- 131 NPE (2013)
Nationale Plattform Elektromobilität (2013): „Die deutsche Normungsroadmap – Elektromobilität – Version 2.0A“, http://www.dke.de/de/std/aal/documents/npe-normungsroadmap_de_2.0a_rz-v01.pdf (letzter Zugriff 01.12.2014).
- 132 NPE (2013a)
Nationale Plattform Elektromobilität (2013): „Elektromobilität in Deutschland – Ergebnisse aus einer Studie zu Szenarien der Marktentwicklung“, Nationale Plattform Elektromobilität, Berlin.
- 133 NPE (2014)
Nationale Plattform Elektromobilität (2014): „Die deutsche Normungsroadmap – Elektromobilität – Version 3.0“, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_normungs_roadmap_3.0_bf.pdf (letzter Zugriff 20.01.2014).
- 134 NPE (2014a)
Nationale Plattform Elektromobilität (2014): „Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung“, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_fortschrittsbericht_2014_bf.pdf (letzter Zugriff 03.12.2014).
- 135 OICA (2014)
Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (2014): „NEW PC REGISTRATIONS OR SALES“, OICA, Paris.
- 136 OICA (2014a)
Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (2014): „PC WORLD VEHICLES IN USE“, OICA, Paris.
- 137 OMT (2011)
Repenning, D., zitiert in Rees, J. (2011): „Akkus für Elektroautos werden billiger“, <http://www.wiwo.de/technologie/auto/iaa-akkus-fuer-elektroautos-werden-billiger/5215400.html> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 138 Parspour (2014)
Parspour, N. (2014): „Vorlesung Elektrische Maschinen I + II“, Institut für elektrische Energiewandlung, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- 139 Peters (2012)
Peters, A., Doll, C. et al. (2012): „Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt“, <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab153.pdf> (letzter Zugriff 28.08.2014).
- 140 Photonics (2014)
Paschotta, R. (2014): „RP-Energie-Lexikon – Elektroauto“, <http://www.energie-lexikon.info/elektroauto.html> (letzter Zugriff 27.11.14).
- 141 Plötz (2013)
Plötz, P. et al. (2013): „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- 142 Polk (2013)
Meteer, G. (2013): „U.S. Commercial New Vehicle Registration Forecast“, AMRC „Spring Conference and Committee Summit 2013“, 29.04.2013, Las Vegas.
- 143 Produktion.de (2013)
Produktion.de (2013): „Projektstart „AutoSpEM“: Automatisierte Batteriemodul-Montage für die Elektromobilität“, <http://www.produktion.de/clean-tech/projektstart-autospem-automatisierte-batteriemodul-montage-fuer-die-elektromobilitaet/> (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 144 Quick (2009)
Quick, D. (2009): „New high energy, high reliability lithium-ion battery module from Panasonic“, <http://www.gizmag.com/panasonic-lithium-ion-battery-module/13030/> (letzter Zugriff 05.09.2014).
- 145 Recharge (2013)
Recharge (2013): „E-mobility Roadmap for the EU battery industry“, RECHARGE aisbl., Brüssel.
- 146 Richter (2014)
Richter, H., Kennel, D. (2014): „Stopp-Start und 48 V – Verdrängen Micro-Mild-Hybride traditionelle Hybridkonzepte vom Markt?“, 9. MTZ-Fachtagung „Der Antrieb von morgen – Elektrifizierung: Was erwartet der Kunde?“, 28./29.01.2014, Wolfsburg.
- 147 Roland Berger (2012)
Roland Berger (2012): „Lithium-ion batteries – The bubble bursts“, Roland Berger Strategy Consultants, Stuttgart.
- 148 Roland Berger (2013)
Roland Berger (2013): „Lazard: Global Automotive Supplier Study 2013 – Driving on thin ice“, Roland Berger Strategy Consultants, München.
- 149 Saft (2009)
Saft (2009): „Primary lithium battery LS 14500“, <http://www.saftbatteries.com/battery-search/l5-lsh> (letzter Zugriff 09.09.2014).

- 150 Sauer (2009)
Sauer, D. (2009): „Elektrische Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen“, http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/vortrag_tu_berlin_29012009.pdf (letzter Zugriff 28.08.2014).
- 151 SB LiMotive (2011)
Rügheimer, U., zitiert in Kilimann, S. et al. (2011): „Warten auf die günstigen Akkus“, <http://www.zeit.de/auto/2011-11/elektro-auto-batterien-preis> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 152 Schäfer (2010)
Schäfer, H. (2010): „Die Zeit ist nun reif“, http://www.hofer.de/de/download/10-04-19_Schaefer_Interview_ATZ_online.pdf (letzter Zugriff 28.10.2014).
- 153 Schoewel (2014)
Schoewel, F., Hockgeiger, E. (2014): „The high voltage batteries of the BMW i3 and BMW i8.“, https://wiki.aalto.fi/download/attachments/91692283/high_voltage_batteries_of_bmw_vehicles.pdf?version=1&modificationDate=1398446470505&api=v2 (letzter Zugriff 05.09.2014).
- 154 Schröder (2013)
Schröder, D. (2013): „Elektrische Antriebe – Grundlagen“, Springer, Berlin.
- 155 Schuh et al. (2013)
Schuh, G., Arnoscht, J., Nee, C., Schittny, B. (2013): „Production system with respect for variable quantities for an economical electric vehicle production“, in: Future Trends in Production Engineering, Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP).
- 156 SEMIKRON (2011)
SEMIKRON (2011): „From Packaging to Unpackaging – Trends in Power Semiconductor Modules“, <http://www.powerguru.org/from-packaging-to-unpackaging-trends-in-power-semiconductor-modules/> (letzter Zugriff 31.10.2014).
- 157 SEW (2012)
SEW Eurodrive (2012): „SEW-EURODRIVE und E.ON präsentieren induktive Ladetechnik auf der Hannover Messe“, http://www.sew-eurodrive.de/presse/2012-04-23_1334754039_P.htm (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 158 Sionpower (2014)
SionPower (2014): „The Rechargeable Battery Company – Technology Overview“, <http://www.sionpower.com/technology.html> (letzter Zugriff 27.11.2014).
- 159 SLAM (2014)
Fraunhofer IAO (2014): „Projekt-Kick-off „SLAM – Schnellladenetz für Achsen und Metropolen“ auf der Hannover Messe 2014“, <http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/presse-und-medien/1332-start-fuer-flaechendeckendes-schnellladenetz.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 160 Spath et al. (2012)
Spath, D. (2012): „Elektromobilität und Beschäftigung“, Fraunhofer IAO, Stuttgart.
- 161 Statistisches Landesamt (2013)
Statistisches Landesamt (2013): „Stuttgart: Baden-Württemberg – ein Standort im Vergleich“, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- 162 Statistisches Landesamt (2014)
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2014): „Statistische Berichte Baden-Württemberg – Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden-Württemberg 2007–2013, Berichtskreis 20+“, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- 163 Statistisches Landesamt (2014a)
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2014): „Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden-Württemberg 2013 – Jahresergebnis für Betriebe (Berichtskreis 20+)“, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- 164 Statistisches Landesamt (2014b)
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2014): „Sozialversicherungspflichtig beschäftigte Arbeitnehmer in Baden-Württemberg“, http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/veroeffentl/Statistische_Berichte/3151_13001.pdf (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 165 Suck (2014)
Suck, G., Spengler, C. (2014): „Lösungen für das Wärme-management von Batteriefahrzeugen“, in: ATZ 7-8/2014.
- 166 Tesla Motors (2013)
Straubel, J., zitiert in Bullis, K. (2013): „How Tesla Is Driving Electric Car Innovation“, <http://www.technologyreview.com/news/516961/how-tesla-is-driving-electric-car-innovation/> (letzter Zugriff 04.12.2014).
- 167 TNO (2011)
TNO (2011): „Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars“, TNO, Delft.
- 168 Toyota (2014)
Toyota (2014): „Worldwide Sales of Toyota Hybrids Top 7 Million“, http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/hv-record/ (letzter Zugriff 01.12.2014).
- 169 Tschech (2014)
Tschech, M. (2014): „Kosten- und Funktionsoptimierung von Lithium-Ionen Zellen unter Berücksichtigung des Anforderungskollektivs elektrifizierter Fahrzeugantriebe.“, E-Motive Expertenforum „Elektrische Fahrzeugantriebe“, 15./16.05.2014, Wolfsburg.
- 170 Tübke (2008)
Tübke, J., McDowall, J. et al. (2008): „Zielkonflikte bei der Sicherheit von industriellen Lithium-Ionen Batteriesystemen“, Fraunhofer ICT, Pfinztal.
- 171 Tübke (2011)
Tübke, J., Hagen, M. (2011): „Energiespeicher für Elektrofahrzeuge – Trends und Perspektiven“, Drive-E-Akademie, 14.–18. Februar 2011, Berlin.
- 172 Universität Bonn (2014)
Universität Bonn (2014): „LuLi – Strom aus Luft und Lithium“, <http://www.chemie.uni-bonn.de/forschung/luli> (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 173 Universität Stuttgart (2013)
Universität Stuttgart (2013): „Spitzencluster Elektromobilität startet Projekt BIPoLplus“, http://www.uni-stuttgart.de/hkom/presseservice/pressemitteilungen/2013/020_e_mobil.html?__locale=de (letzter Zugriff 15.12.2014).
- 174 Vahle (2014)
VAHLE Elektrification Systems (2014): „e-Mobility – „Fill-up“ Electricity without Cable and Plug“, <http://www.vahle.de/en/products/e-mobility.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 175 VCD (2012)
Verkehrsclub Deutschland (2012): „Argumente für CO₂ Grenzwerte von PKW“, VCD, Berlin.
- 176 VDA (2013)
Verband der Automobilindustrie (2013): „Wissmann: Das Automobiljahr 2014 bringt Aufwärtsbewegung“, VDA, Berlin.
- 177 VDE (2010)
Verband der Elektrotechnik (2010): „Elektrofahrzeuge. Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf“, VDE, Frankfurt.
- 178 VDE (2011)
VDE Verlag (2011): „VDE-AR-E 2122-4-2 Anwendungsregel: 2011-03 Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Induktive Ladung von Elektrofahrzeugen“, <https://www.vde-verlag.de/normen/0122013/vde-ar-e-2122-4-2-anwendungsregel-2011-03.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 179 VDI/VDE (2014)
Verband der Ingenieure/Verband der Elektrotechnik(2014): „Trendbericht Elektromobilität in Japan“, VDI/VDE, Berlin.
- 180 VDMA (2014)
Maiser, E., Kampker, A., Thielmann, A. et al. (2014): „Roadmap Batterie Produktionsmittel“, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt a. M.
- 181 VDO (2014)
VDO (2014): „Electric Water Pump“, http://www.vdo.com/generator/www/com/en/vdo/main/products_solutions/cars/replacement_parts/hvac_blower_and_fan_systems/electric_water_pump/electric_water_pump_en.html (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 182 Velji (2010)
Velji, A., Kubach, H., Spicher, U. (2010): „Verbrennungsmotor gegen Elektromotor“, <http://web1.karlsruhe.de/Wirtschaft/img/standort/profile/down773a.pdf> (letzter Zugriff 05.11.2014).
- 183 Vollmer (2011)
Vollmer, A. (2011): „Standards für die Branche und die Welt“, in: AUTOMOBIL ELEKTRONIK 3/2011.
- 184 VW (2012)
Krebs, R., zitiert in Seiwert, M.; Rother, F. W. (2012): „VW rechnet mit rasch sinkenden Batteriepreisen“, <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/elektroautos-vw-rechnet-mit-rasch-sinkenden-batteriepreisen/6458322.html> (letzter Zugriff 02.12.2014).
- 185 VW (2014)
Volkswagen AG (2014): „Innovationsworkshop 2014: Volkswagen setzt konsequent auf Nachhaltigkeit und Vernetzung“, https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/Innovationsworkshop-2014-Volkswagen-setzt-konsequent-auf-Nachhaltigkeit-und-Vernetzung/view/1800852/7a5bbec13158edd433c6630f5ac445da?p_p_auth=0SEfMQjX (letzter Zugriff 13.11.2014).
- 186 Wallentowitz et al. (2010)
Wallentowitz, H. (2010): „Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs“, Springer, Berlin.

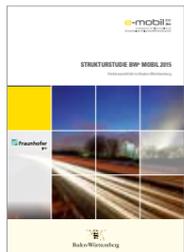
- 187 Wallentowitz (2011)
Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. (2011): „Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges“, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- 188 Webasto (2012)
Webasto (2012): „Elektrische Hochvolt-Heizung für Hybrid- und Elektroautos“, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/automotive/articles/382423/> (letzter Zugriff 11.11.2014).
- 189 White House (2014)
White House (2014) „Fact Sheet: U.S.-China Joint Announcement on Climate Change and Clean Energy Cooperation“, The White House, Washington.
- 190 Wind (2012)
Wind, J. (2012): „Antriebssysteme für elektrisch angetriebene Fahrzeuge“, http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2012/Wind_Antriebssysteme_elektrische_Fahrzeuge.pdf (letzter Zugriff 05.09.2014).
- 191 Winter (2011)
Winter, M. (2011): „Engpass ist der Elektrolyt“, in: ATZ Elektronik 3/2011.
- 192 WiWo (2014)
WiWo (2014): „Das bessere Öl“, in: Wirtschaftswoche, Ausgabe 48.
- 193 Zanker et al. (2011)
Zanker, C., Lay, G., Strahlecker, T. (2011): „Automobilzulieferer in Baden-Württemberg unter Strom?“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- 194 ZSW (2014)
Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (2014): „Weltweit über 400.000 Elektroautos unterwegs – Presseinformation 04/2014“, ZSW, Ulm.
- 195 ZSW (2014a)
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (2014): „Weltweit einmaliges Batterie-forschungszentrum in Ulm nun komplett“, <http://www.zsw-bw.de/uploads/media/pi13-2014-ZSW-EinweihungErweiterungLaB.pdf> (letzter Zugriff 15.12.2014).

Publikationen der e-mobil BW



Elektromobilität weltweit – Baden-Württemberg im internationalen Vergleich

Die Studie gibt einen Überblick über die Entwicklung nachhaltiger Mobilitäts-technologien an maßgeblichen Technologie- und Forschungsstandorten in Europa, Nordamerika und Asien und vergleicht diese mit der Entwicklung am Standort Baden-Württemberg. Dabei werden Chancen und Risiken des Technologiewandels für baden-württembergische Akteure identifiziert und Handlungsempfehlungen formuliert.



Strukturstudie BW mobil 2015 – Elektromobilität in Baden-Württemberg

Die Studie gibt einen umfassenden, gegenüber den beiden vorherigen Ausgaben aktualisierten Überblick über bedeutende Themenfelder der Elektromobilität. Dazu zählen technische Komponenten und Systeme, Wertschöpfungs- und Beschäftigungsentwicklungen mit besonderem Fokus auf Baden-Württemberg sowie Einschätzungen und Erfahrungen seitens der Wirtschaft, Politik und Anwender.



Entwicklung der Beschäftigung im After-Sales – Effekte aus der Elektromobilität

Die Studie befasst sich mit den Auswirkungen der Elektrifizierung auf den After Sales und zwar insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden Beschäftigungseffekte. Mit Hilfe von drei Referenzszenarien werden verschiedene quantitative und qualitative Auswirkungen im Kraftfahrzeuggewerbe und in der Teileindustrie erforscht. Zudem werden verschiedene Anpassungsstrategien aufgezeigt.



Elektromobilität in Kommunen – Auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft

Modellkommunen zeigen wie es geht: engagiert, ideenreich und mit großer Durchsetzungskraft haben die drei Modellkommunen der e-mobil BW – Ludwigsburg, Offenburg und Schwäbisch Gmünd – in den letzten vier Jahren an nachhaltigen Mobilitätslösungen für „ihre“ Stadt gearbeitet. Die Broschüre stellt ihre Best Practice Beispiele und Erfolgsgeschichten vor.



Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende – Entwicklungsstand und Perspektiven

Ziel der Studie ist die Darstellung der mit Wasserstoff, Brennstoffzellen und Energiespeicherung verbundenen Entwicklungen und Entwicklungspläne im Gesamtkontext der Energiewende. Im Fokus stehen mobile und stationäre Anwendungen sowie Energieproduktion und -speicherung. Aus der vergleichenden Analyse aktueller Studien werden grundlegende Handlungsempfehlungen erarbeitet.



Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität – Entwicklungsstand und Forschungsbedarf

Die Studie gibt einen umfassenden Überblick über die aktuelle Ausgangslage der Wasserstoff-Infrastruktur sowie die verfügbaren technischen Konzepte und Komponenten der Tankstellen. Zudem sind konkrete Vorschläge für den weiteren Forschungs- und Handlungsbedarf von Industrie, Verbänden und öffentlicher Hand enthalten.



Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg

Die Studie gibt einen Überblick über den Stand der Technik, stellt den Aufbau der Wertschöpfungskette mit den jeweiligen Kompetenzen im Land dar und schätzt die zukünftigen Umsatz- und Beschäftigungspotenziale ab. Zudem enthält die Studie einen Leitfaden für Unternehmen zur Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Baden-Württemberg.



Akademische Qualifizierung – Analyse der Bildungslandschaft im Zeichen von Nachhaltiger Mobilität

Die umfassende Studie verschafft Unternehmen einen Überblick über das deutschlandweite Hochschulangebot im Themenfeld der Nachhaltigen Mobilität. Des Weiteren werden darin Anforderungen der Unternehmen an die Hochschulen und deren Absolventen dargestellt und es sind Empfehlungen enthalten, wie die Politik dazu beitragen kann, die Informations- und Kommunikationsprozesse zwischen Hochschulen und Unternehmen effektiver zu gestalten.



Systemanalyse BW mobil 2013

Die Studie „Systemanalyse BW mobil 2013“ gibt in der zweiten, neu überarbeiteten Auflage einen Überblick über die Bedeutung der IKT- und Energieinfrastruktur für zukünftige Mobilitätslösungen unter Berücksichtigung der rasanten Entwicklungen der entsprechenden Technologien.



Neue Wege für Kommunen

Mit der Publikation „Neue Wege für Kommunen - Elektromobilität als Baustein zukunftsfähiger kommunaler Entwicklung in Baden-Württemberg“ wird den verantwortlichen Akteuren in den Kommunen im Land ein anschaulicher Einstieg in das Thema nachhaltige Mobilität gegeben und mit Beispielen aus der Praxis gezeigt, wie Elektromobilität vor Ort für die Bürgerinnen und Bürger umgesetzt werden kann. Es werden Handlungsoptionen, Konzepte und Ideen für Kommunen dargestellt, die sie bei der Initiierung oder beim Ausbau der Einführung der Elektromobilität unterstützen.



Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen – Einführung und Überblick

Die Potentialanalyse beleuchtet die technologischen Besonderheiten der Leichtbauwerkstoffe im Hinblick auf ihre spanende Bearbeitung und betrachtet die gesundheitlichen Aspekte, die bei der Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen zu beachten sind.



Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Ökologische Aspekte

Die Studie untersucht das Thema Nachhaltigkeit im Leichtbau unter den Gesichtspunkten Ökologie und Gesundheit. Neben der Ökobilanz, bei der die Auswirkungen auf die Umwelt betrachtet werden, spielen auch gesundheitliche Aspekte der Herstellung und Nutzung von Leichtbauprodukten eine wichtige Rolle.



Publikationen der e-mobil BW



Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Chancen für Baden-Württemberg

Mit dieser Studie wird ein ganzheitlicher Überblick über die technologischen Aspekte des Leichtbaus gegeben und die Relevanz dieser Schlüsseltechnologie für Baden-Württemberg dargestellt. Dabei werden Chancen und Risiken aufgezeigt und die Branchen identifiziert, die bereits Entwicklungen forciert vorantreiben. Betrachtet werden zum einen Konstruktionsweisen und Werkstoffe für Leichtbau, zum anderen wird ein Einblick in die Entwicklungen der verschiedenen Branchen gegeben.



Leichtbau in Baden-Württemberg – Kompetenzatlas

Der Kompetenzatlas präsentiert in gebündelter Form die Forschungskompetenzen im Bereich Leichtbau in Baden-Württemberg, gibt einen Einblick in die Komplexität und Vielfalt des Themengebiets Leichtbau und stellt die verschiedenen Kompetenzträger mit ihren Forschungsschwerpunkten vor. Präsentiert werden 11 außeruniversitäre Forschungsinstitute, 28 Universitätsinstitute und 13 Hochschulen für angewandte Forschung, deren Aktivitäten und Kompetenzen für die Entwicklung und Herstellung leichter Strukturen erforderlich sind.



LivingLab BW[®] mobil – Projektübersicht

Die Broschüre stellt alle Projekte des baden-württembergischen Schaufensters Elektromobilität LivingLab BW[®] mobil im Detail vor.



Baden-Württemberg Kompetenz in Elektromobilität

Umfassender Anbieter- und Marktüberblick: Der Kompetenzatlas Elektromobilität stellt Unternehmen, Forschungsinstitute und Hochschulen aus Baden-Württemberg im Bereich Elektromobilität vor. Zudem informiert er über Initiativen und Verbände und zeigt gleichzeitig Kooperations- und Einstiegsmöglichkeiten auf.

🇩🇪 🇬🇧 Auch als englische Version verfügbar.



Imagebroschüre e-mobil BW GmbH Starten wir jetzt in die elektromobile Zukunft

Die Imagebroschüre der Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg e-mobil BW GmbH informiert kurz und kompakt über die Tätigkeitsbereiche der Innovationsagentur.

🇩🇪 🇬🇧 Auch als englische Version verfügbar.



Infolyer – Cluster Brennstoffzelle BW

Der Flyer informiert kurz und kompakt über die Vision, Ziele und Zielgruppen des Clusters Brennstoffzelle BW

🇩🇪 🇬🇧 Der Infolyer ist zweisprachig (deutsch/englisch).



Infolyer – Cluster Brennstoffzelle BW

Auf einen Blick: Im Infolyer erhalten Sie einen schnellen Überblick über die Ziele und Leistungen sowie die Vision und Partner des Clusters Brennstoffzelle BW.

🇩🇪 🇬🇧 Der Infolyer ist zweisprachig (deutsch/englisch).



Infolyer – Schaufenster Elektromobilität LivingLab BW[®] mobil

Nachhaltige Mobilität erfahrbar machen: Der Infolyer informiert kurz und auf den Punkt über das baden-württembergische Schaufenster Elektromobilität LivingLab BW[®] mobil.



Infolyer – e-mobil BW GmbH Starten wir jetzt in die elektromobile Zukunft

Auf einen Blick: In dem Infolyer finden Sie kurz und kompakt die Ziele und Leistungen der e-mobil BW – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH.

🇩🇪 🇬🇧 Der Infolyer ist zweisprachig (deutsch/englisch).



Infolyer – Cluster Elektromobilität Süd-West

Der Spitzencluster auf einen Blick: Im Infolyer erhalten Sie einen schnellen Überblick über die Ziele und Leistungen sowie die Vision und Partner des Clusters Elektromobilität Süd-West.

🇩🇪 🇬🇧 Der Infolyer ist zweisprachig (deutsch/englisch).





Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bauer, Florian Rothfuss, Dr. Jennifer Dungs, Florian Herrmann,
Andrej Cacilo, Sarah Schmidt, Marius Brand, Florian Klausmann, Daniel Borrmann

Koordination Studie

e-mobil BW GmbH
Imke Nehmiz
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Daniel Borrmann

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: © istockphoto.de: MichaelUtech
Die Quellnachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Druck

Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker

Auslieferung und Vertrieb

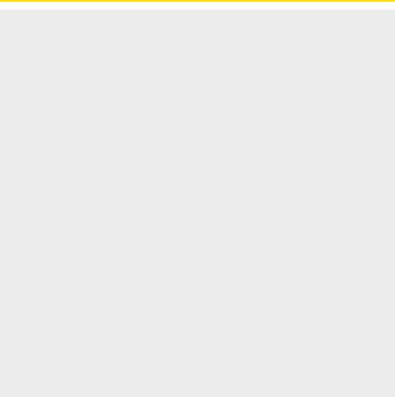
e-mobil BW GmbH
Leuschnerstr. 45
70176 Stuttgart
Telefon: 0711 / 892385-0
Telefax: 0711 / 892385-49
E-Mail info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

3. geänderte Auflage im Juni 2015

© 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.





e-mobil BW GmbH

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | www.e-mobilbw.de

