e-mobil BW

Landesagentur für Elektromobilität und
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH

STRUKTURSTUDIE BW^{e} MOBIL 2011

Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität

Fraunhofer IAO

Wirtschaftsförderung Region Stuttgart

Baden-Württemberg

Strukturstudie BW^{e} mobil 2011

Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS)

INHALT

Vorwort 4

Kernergebnisse und Implikationen 5

1 Ausgangslage und Zielsetzung 6

2 Die Automobilindustrie auf dem Weg in die Elektromobilität 8

2.1 Elektromobile Antriebs- und Fahrzeugkonzepte 8

2.2 Komponenten von Elektrofahrzeugen und aktuelle Entwicklungsschwerpunkte 11

2.2.1 Energiespeicher 11

2.2.2 Komponenten des batterieelektrischen Antriebsstrangs 18

2.2.3 Sonstige Komponenten 27

2.3 Einflussfaktoren auf die Produktion 31

2.4 Heutige Märkte und Marktszenarios 35

2.4.1 Szenarios der Marktentwicklung 35

2.4.2 Lebenszykluskosten-Betrachtung 37

2.4.3 Konvergenz der Branchen 40

2.5 Überblick zur Förderung 44

3 Konsequenzen des Wandels für Baden-Württemberg 48

3.1 Die Bedeutung des Automobils für Baden-Württemberg 48

3.1.1 Automobilstandort Baden-Württemberg 48

3.1.2 Aktuelle Entwicklung bei Neuzulassungen 49

3.2 Struktur der Automobilindustrie in Baden-Württemberg 50

3.3 Die automobile Wertschöpfungsarchitektur und ihre Auswirkung auf die Beschäftigungsstruktur 51

3.3.1 Entwicklung der Herstellkosten batterieelektrischer Fahrzeugkonzepte 51

3.3.2 Marktentwicklung wesentlicher Antriebsstrangkomponenten 53

3.3.3 Konsequenzen für Baden-Württemberg 55

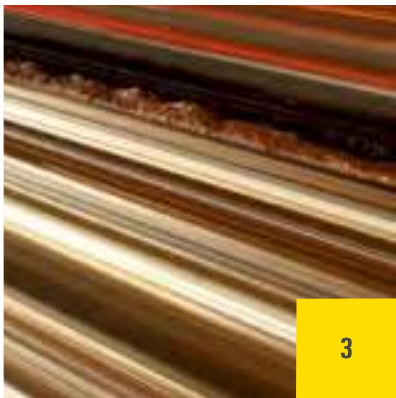
3.4 Die Produktionstechnik als Schlüsselfaktor im Wettbewerb 58

3.5 Ausbildung und Qualifizierung 61

4 Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität 62
4.1 Akteure und Kompetenzen im Bereich der Elektromobilität 62
4.1.1 Gesamtfahrzeug 62
4.1.2 Batterietechnik 62
4.1.3 Elektrifizierter Antriebsstrang 64
4.1.4 Leichtbau 66
4.1.5 Brennstoffzelle 68
4.1.6 Infrastruktur 69
4.1.7 Thermomanagement 71
4.2 Netzwerke und Cluster 71
4.3 Öffentlich geförderte Forschungsprojekte in Baden-Württemberg 72

5 Zusammenfassende Gesamtbetrachtung 74

Literaturverzeichnis 76
Abbildungsverzeichnis 86
Abkürzungsverzeichnis 88
Experteninterviews 91



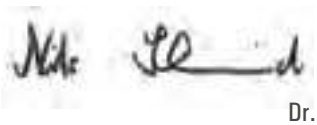
VORWORT

Baden-Württemberg ist die Innovationsregion Nr. 1 in Europa mit einzigartig gewachsenen Strukturen und einer besonderen Unternehmens- sowie einer exzellenten Forschungs- und Hochschullandschaft. Neben großen Automobilherstellern sind es im Land vor allem mittelständische Unternehmen, die einen maßgeblichen Beitrag zur Wertschöpfung der Automobilindustrie leisten. Innovative Produkte, Lösungen und Dienstleistungen aus dem Land finden weltweiten Absatz und Anerkennung.

Die kommenden Jahre werden durch striktere regulative Vorgaben hinsichtlich der notwendigen Verringerung schädlicher CO_2-Emissionen von Fahrzeugen geprägt sein. Gleichzeitig werden fossile Brennstoffe zunehmend knapper. Konzepte für eine nachhaltige Mobilität, in denen die Elektromobilität eine wichtige Komponente darstellt, 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: Durch entfallende und neue Komponenten und Technologien werden sich Wertschöpfungsanteile zwischen unterschiedlichen Akteuren und möglicherweise auch zwischen Wirtschaftsregionen neu verteilen.

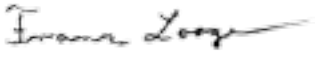
Baden-Württemberg ist für diesen Wandel gut aufgestellt. Bereits heute gibt es zahlreiche Aktivitäten und Clusterinitiativen im Land, die den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie fördern und zur Entwicklung gemeinsamer, branchenübergreifender Lösungsansätze beitragen. Die vorliegende Studie gibt einen Überblick über diese Aktivitäten und ermittelt, ausgehend von der heutigen Positionierung des Landes, zukünftige Potenziale und Risiken für die Automobilindustrie.



Dr. Nils Schmid MdL
Stellvertretender Ministerpräsident und
Minister für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg

Elektromobilität ist die Mobilität der Zukunft. Megatrends wie eine zunehmende Erderwärmung, die Endlichkeit unserer Ressourcen, das Wachstum unserer Städte sowie ein steigender Lebensstandard und der damit erstarkende Bedarf an Mobilität für Menschen und Güter macht eine Revolution unserer Fortbewegung unabdingbar. Der Weg hin zu einer nachhaltigen und intelligenten Mobilität in unseren Städten hat gerade erst begonnen. Er erfordert ein Umdenken und bedeutet gerade deshalb große Chancen, aber auch Risiken für alle beteiligten Akteure.
Um die Elektromobilität zur Marktreife zu bringen, muss die Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Systemzusammenhang gedacht werden. Mobilität erfordert zukünftig vor allem die Kompetenzen der Branchen Automobil, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Energiewirtschaft. Nur über eine systemische und eng verzahnte Zusammenarbeit dieser drei Schlüsselbranchen, unter Berücksichtigung des Querschnittsfelds der Produktion, können marktentscheidende Synergien entwickelt und die Industrialisierung der Elektromobilität weiter vorangetrieben werden. Baden-Württemberg hat durch seine traditionell gewachsene Automobilindustrie und seine gebündelte Kompetenz in den Branchen IKT und Energie die allerbesten Voraussetzungen, eine weltweit führende Rolle in der Elektromobilität einzunehmen.

Es wird nicht nur eine Vernetzung der Branchen wettbewerbsentscheidend sein. Kleine und mittlere Unternehmen bilden den Kern der wirtschaftlichen Stärke in Baden-Württemberg und sind gleichzeitig ihr Motor für Innovationen. Ihre Befähigung und aktive Einbindung in den Wandel hin zu Elektromobilität sind eine wesentliche Voraussetzung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit Baden-Württembergs und ein Garant für die Sicherung von Wertschöpfung und Arbeitsplätzen in der baden-württembergischen Automobilindustrie.



Franz Loogen
Geschäftsführer e-mobil BW

KERNERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN

- Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist in vollem Gange und keine Zukunftsvision mehr. Dabei wird die Elektrifizierung über die verschiedenen Ausprägungsformen des Hybrids (Mild-, Voll-, Plug-in-Hybrid, Range-Extender) bis zum reinen Elektrofahrzeug mit der Zeit zunehmen.

- Im Jahr 2020 werden weltweit circa 50 Prozent mehr PKW verkauft werden als zum heutigen Stand. Relativ betrachtet soll der Anteil von PKW mit reinem Verbrennungsmotor von heute rund 98 Prozent auf circa 67 Prozent im Jahr 2020 fallen. Der Anteil rein batterieelektrischer Fahrzeugkonzepte könnte zu diesem Zeitpunkt rund 5 Prozent betragen.

- Nahezu die Hälfte des weltweiten Marktpotenzials (Zuwachs) im Jahr 2020 entfallen auf Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs (elektrische Maschine, Leistungselektronik, Batteriesystem, Ladegerät), was einem Wert von circa 100 Mrd. Euro entspricht.

- In der Herstellung neuer Komponenten werden starke Kostensenkungspotenziale erwartet. Bis dahin werden rein batterieelektrische Fahrzeuge gegenüber herkömmlichen Verbrennern dennoch deutlich höhere Herstellkosten aufweisen. Für eine zukünftige Kaufentscheidung spielen neben dem Kaufpreis auch sämtliche Betriebskosten des Fahrzeugs (Kosten für Treibstoff, Strom, Steuern, Versicherung und Wartung) eine wichtige Rolle.

- Die Elektromobilität als branchenübergreifende Entwicklung wird nicht nur Einfluss auf die Automobilindustrie haben, sondern vielmehr zu einer Konvergenz der Branchen Automobil-, IKT- und Energiewirtschaft führen. Innovative Geschäftsmodelle und ein sich wandelndes Nutzerverhalten rücken zudem in den Fokus.

- Im Zuge des Wandels gehen Veränderungen im Bereich der Produktionstechnik und der Qualifizierung von Arbeitskräften einher. Neben neuen Kompetenzen in der Verarbeitung und Herstellung müssen aus diesem Grund Lehr- und Ausbildungs- bzw. Weiterbildungsinhalte erweitert und angepasst werden.

- Baden-Württemberg ist als Technologiestandort für die Elektromobilität gut aufgestellt. In der Forschung und Entwicklung (FuE) von elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten und der zugehörigen Ladeinfrastruktur entsteht durch die Zusammenarbeit von Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen ein solides Fundament, welches zukünftig weiter ausgebaut werden muss.

- Um zukünftig starke Beschäftigungseffekte im Land zu generieren, ist es wichtig, eine hohe Wertschöpfungstiefe bei den »neuen Antriebsstrangkomponenten« zu erzeugen. Hierbei müssen die Erkenntnisse aus FuE auf die industrielle Fertigung übertragen werden. Der im Land hervorragend aufgestellte Anlagen- und Maschinenbau kann und muss diesen Prozess begleiten.

- Große Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenziale für das Land bieten neben den konventionellen Technologien (Getriebe, Effizienztechnologien oder der Abgasanlage beim Verbrennungsmotor) auch die neuen Komponenten wie Leistungselektronik, elektrische Maschine und vor allem das Batteriesystem.

- Im Jahr 2020 könnten in Baden-Württemberg unter optimaler Ausnutzung bestehender Potenziale nahezu 10.000 neue Arbeitsplätze durch die »neuen Antriebsstrangkomponenten« entstehen. Der relativ hohe Wertanteil der neuen Komponenten, aber auch der relativ hohe Automatisierungsgrad in der Herstellung bieten generell gute Voraussetzungen für eine regionale Herstellung.

- Kleine und mittlere Unternehmen als wesentliche Akteure in der automobilen Wertschöpfungslandschaft Baden-Württembergs müssen aktiv in den Wissenstransfer großer Unternehmen und Forschungseinrichtungen eingebunden werden. Nur durch die Befähigung des Mittelstandes lässt sich eine wettbewerbsfähige »elektromobile« Wertschöpfungsstruktur ganzheitlich im Land etablieren.

Kapitel 1

AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Blickt man auf die vergangenen zwei Jahre zurück, so lässt sich erkennen, dass das Thema »Elektromobilität« an Fahrt gewinnt. Bei der IAA 2011 wurde dem Thema Elektromobilität bereits eine eigene Halle gewidmet. Alle namhaften Automobilhersteller präsentierten eine breite Palette verschiedenster elektromobiler Fahrzeugkonzepte für die kommenden Jahre, aber auch Konzeptfahrzeuge, welche einen weiteren Blick in die Zukunft ermöglichen. Der dafür zugrunde liegende Technologiewechsel weg vom Kraftfahrzeug mit konventionellem Antrieb hin zu alternativen und in diesem Sinne elektrifizierten Antriebskonzepten wird zu einer Vielzahl an Veränderungen führen.

Neben neu benötigten Werkstoffen und Produktionsverfahren ändern sich beispielsweise Qualifikationsanforderungen und Bildungsinhalte für angehende Arbeitskräfte. Die Struktur der bisherigen automobilen Wertschöpfungskette wird um neue Akteure erweitert. Eine Fülle an Geschäftsmodellen zwischen »alten« und gänzlich neuen Unternehmen im Markt, beispielsweise im Bereich der Batteriezellfertigung, lässt sich beobachten. Weiterhin rücken Aspekte wie die Informations- und Kommunikationstechnologie des Fahrzeugs, infrastrukturelle Arbeitsinhalte oder damit verbundene neue Marktchancen in den Mittelpunkt. Wurden Themenstellungen bisher nur rudimentär beachtet, so müssen die daraus resultierenden Herausforderungen an die Elektromobilität im Zuge des anstehenden Wandels gelöst und umgesetzt werden.

Gerade für das Automobilland Baden-Württemberg ist ein derartiger Umbruch – wenn dieser auch aus dem jetzigen Verständnis noch recht langsam anläuft – als große Herausforderung zu sehen. Um seine Spitzenposition auch weiterhin aufrechtzuerhalten, müssen die erwarteten Auswirkungen der Elektromobilität auf die automobile Wertschöpfung erfasst sowie die damit verbundenen Chancen und Risiken für das Land identifiziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Strukturstudie 2011, die eine Überarbeitung der vorangegangenen Studie (2009/2010) ist, sollen aus diesem Grund folgende Fragestellungen im Mittelpunkt der Betrachtung stehen:

- Welche technologischen Grundlagen und Entwicklungspfade existieren?
- Welchen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit kann die Produktionstechnik leisten?
- Welche neuen Betätigungsfelder entstehen?
- Wie werden sich die Märkte sowie die Herstellkosten »neuer Antriebsstrangkomponenten« entwickeln?
- Welches Marktpotenzial entsteht im Bereich alternativer Antriebskonzepte?
- Wie ist die Automobilindustrie in Baden-Württemberg strukturiert?
- Welche Auswirkungen auf die Wertschöpfungs- und Beschäftigungsstruktur hat die Elektromobilität in Baden-Württemberg?
- Welche Akteure, Kompetenzen, Cluster und Initiativen bestehen in Baden-Württemberg im Bereich der Elektromobilität?

Dabei wurden neben umfangreichen Sekundärdatenrecherchen auch mehrere persönliche sowie telefonische Interviews mit Experten aus Industrie und Forschung durchgeführt. Die Aussagen und Meinungen der Interviewpartner sind in den Kapiteln hervorgehoben und erlauben somit einen vertieften Einblick in das jeweilige Themenfeld.

Kapitel 2

DIE AUTOMOBILINDUSTRIE AUF DEM WEG IN DIE ELEKTROMOBILITÄT

2.1 ELEKTROMOBILE ANTRIEBS- UND FAHRZEUGKONZEPTE

»Elektromobile Antriebskonzepte« gewinnen zunehmend an Bedeutung. Dabei werden unter diesem Begriff sämtliche Personenkraftwagen, Nutzfahrzeuge sowie Zweiräder (Roller, Elektrofahrräder) 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 Verbrennungsmotors besitzen. Im Rahmen dieses Kapitels sollen dazu die unterschiedlichen Konzepte, technischen Grundlagen sowie mögliche Entwicklungspfade aufgezeigt werden.

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 sowie verbrauchsoptimierten Verbrennungsmotoren verstanden werden. Elektromobile Antriebskonzepte hingegen umfassen, wie in Abbildung 1 ersichtlich, Hybridfahrzeuge (parallel, leistungsverzweigt), Plug-in-Hybridfahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (serieller Hybrid) sowie reine Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge [Bundesregierung (2009)].

- Hybridfahrzeuge (paralleler Hybrid, leistungsverzweigter Hybrid)
  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, Daimler S400 Hybrid, Daimler E300 Blue Tec 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 klassischen Hybrid liegt in der Möglichkeit der Aufladung der Batterie über das Netz.
  Beispiele aktueller und geplanter Modelle: Fisker Karma, Prius Plug-in, Daimler S500 Plug-In, BMW i8

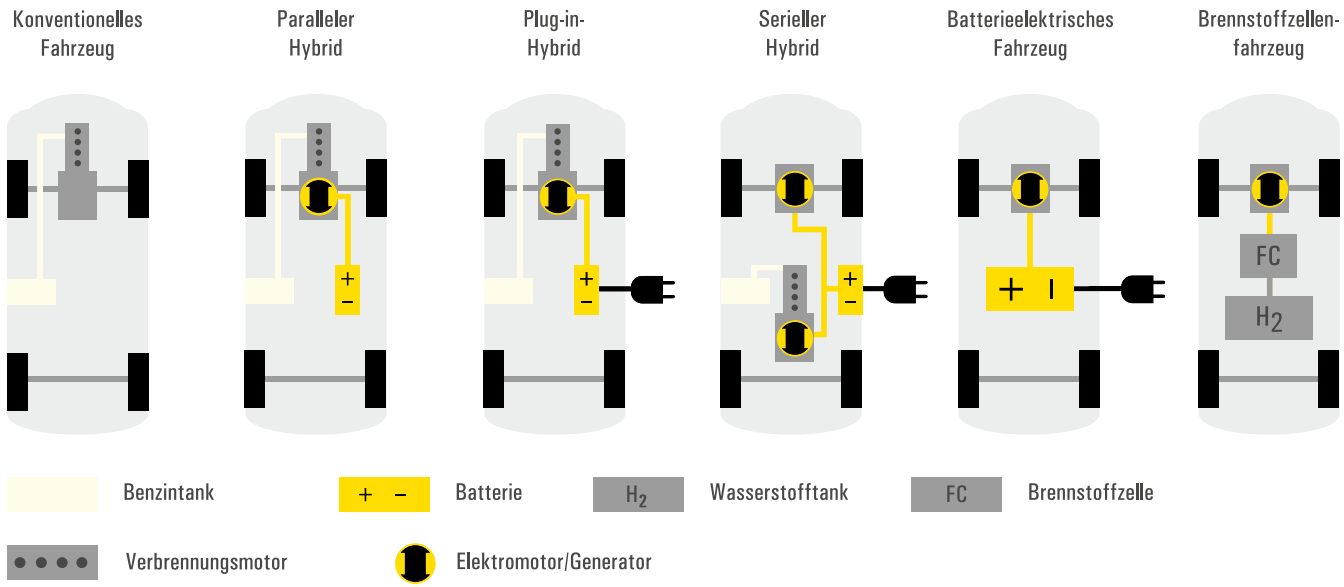


Abbildung 1: Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb[1]

1 Eigene Darstellung

- 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, auch serieller Hybrid genannt.
  Beispiele aktueller und geplanter Modelle: GM Volt, Opel Ampera, Audi A1 e-tron, Daimler Blue Zero E-Cell Plus

- Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
  Charakteristische Merkmale: Starker Elektromotor mit am Netz aufladbarer Batterie; kein Verbrennungsmotor, kein Treibstofftank, keine Abgasanlage; für die Batterieladung wird lediglich das Stromnetz und Rekuperation genutzt.
  Beispiele aktueller und geplanter Modelle: Mitsubishi i-MiEV, Nissan Leaf, Smart E-Drive, Tesla Roadster, Daimler A-Klasse E-Cell, Audi A2 e-tron, Renault Fluence Z.E.

- 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 Clarity, Daimler F-Cell (B-Klasse), Opel Hydrogen 4

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.

»Im Bereich der Elektromobilität wird sich in erster Linie der Range-Extender durchsetzen. Die Reichweitendefizite der Elektrofahrzeuge aufgrund der noch nicht vorhandenen hohen Energiedichte stellen ein Problem dar, das auch noch in den nächsten 10 Jahren bestehen wird.«

Dr. Andreas Gutsch, Projektleitung Competence E am KIT, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Pedelecs und elektrische Kleinräder
Elmoto

PKW-Individualverkehr
Smart E-Drive

Nutzfahrzeuge
Vito E-Cell

Arbeitsmaschinen
Atlas/Deutz Hybrid-Radlader

Öffentlicher Verkehr
Citaro G BlueTec Hybrid

Abbildung 2: Die Vielfalt elektromobiler Fahrzeugkonzepte[2]

2 Eigene Darstellung

»In Zukunft wird es definitiv eine große Vielfalt an Antriebstechnologien geben – sicher auch zum Leidwesen der Automobilindustrie, weil sie alle Technologien parallel entwickeln muss und nicht nur die klassischen zwei Technologien Otto- und Diesel-Motor.«

Prof. Dr. Werner Tillmetz, Mitglied des Vorstandes – Elektrochemische Speichertechnologien, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

War die Marktverfügbarkeit von elektromobilen Fahrzeugen in den vergangenen Jahren noch sehr gering, so verspricht eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte der Hersteller in den kommenden Jahren das Bild der Automobillandschaft entscheidend zu verändern. Neben weiteren Hybridvarianten (HEV) kündigen die Automobilbauer vor allem auch zahlreiche Modelle im Bereich Plug-in-Hybrid (PHEV) Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (REEV) und rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) an. Im Bereich der Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) 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.

»Wir arbeiten gleichzeitig an verschiedenen Antriebskonzepten. Unser Ziel ist, dass sich die Module und Komponenten der unterschiedlichen Antriebskonzepte überdecken, sodass sie austauschbar und skalierbar werden. Nur so kann der noch unsicheren Marktentwicklung entgegnet werden.«

Peter Froeschle, Leiter Strategische Energieprojekte & Marktentwicklung Brennstoffzellen-/Batteriefahrzeuge, Daimler AG

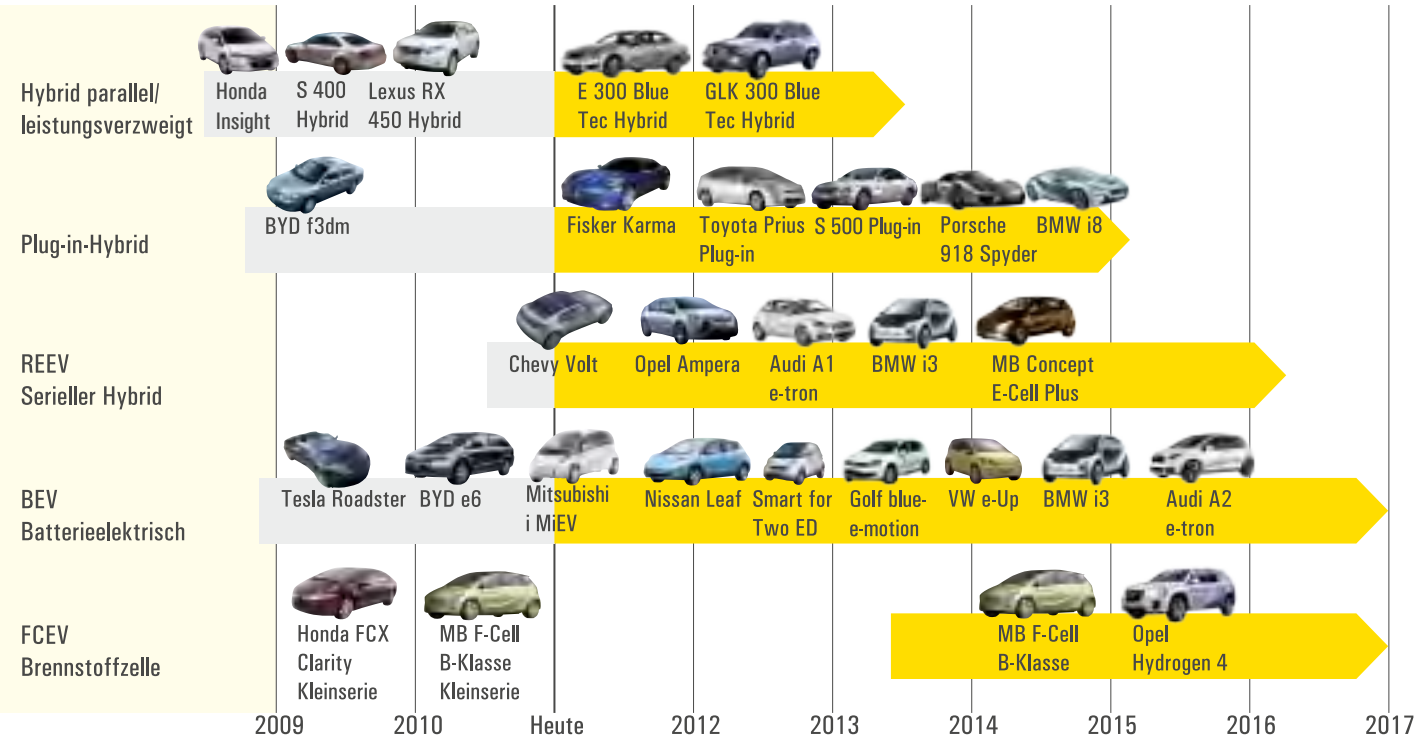


Abbildung 3: Auswahl aktueller und geplanter elektromobiler Fahrzeugkonzepte[3]

3 Eigene Darstellung

2.2 KOMPONENTEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN UND AKTUELLE ENTWICKLUNGSSCHWERPUNKTE

2.2.1 ENERGIESPEICHER

Ein Elektroantrieb muss die benötigte elektrische Energie immer aus einer geeigneten Energiequelle beziehen – diese setzt er dann hocheffizient mit einem Wirkungsgrad von über 90 Prozent in Antriebsleistung um. Der Energiespeicher ist damit die Kernkomponente der Elektromobilität, da er sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Reichweite des Fahrzeugs maßgeblich bestimmt.

2.2.1.1 ENERGIESPEICHER ALLGEMEIN

Nach dem aktuellen Stand der Technik stehen verschiedene Alternativen zur Auswahl: Zu nennen sind insbesondere verschiedene Arten von wiederaufladbaren Sekundär-Batterien (Blei-Säure, NiMH, Li-Ion), der Energieträger Wasserstoff zusammen mit dem Energiewandler Brennstoffzelle sowie Kondensatoren. Wesentliche Kriterien zur Auswahl stellen die gravimetrische Energiedichte [Wh/kg] sowie die Leistungsdichte [W/kg] dar. Diese werden üblicherweise in einem sogenannten Ragone Plot dargestellt (siehe Abbildung 4).

Vergleicht man die Energiedichte von Batterien mit der von Benzin oder Wasserstoff, so wird ein gravierender Nachteil der Sekundärzellen sichtbar (vgl. Abbildung 5). Diese relativ geringe Energiedichte resultiert in der Anforderung, schwere Batteriepacks in das Fahrzeug zu verbauen, um akzeptable Reichweiten zu erzielen. Vorteile hingegen sind unter anderem die relativ zum Verbrennungsmotor überragende Effizienz des Elektroantriebs (Effizienz Verbrennungsmotor max. 30 Prozent vs. Effizienz Elektromotor 90 Prozent) sowie die lokale Emissionsfreiheit.

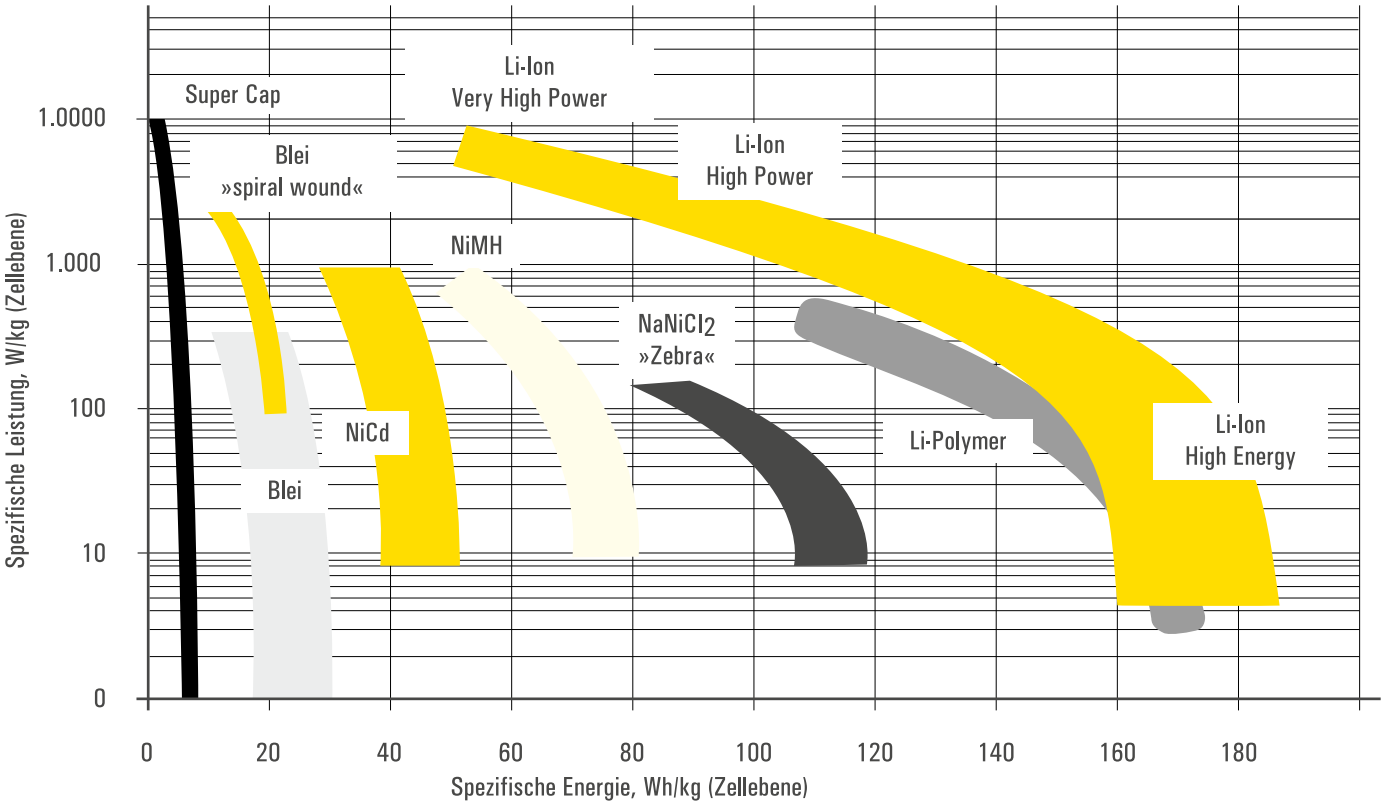


Abbildung 4: Ragone Plot[4]

4 Sauer (2009)

Wasserstoff 33.306 Wh/kg

Benzin 11.944 Wh/kg

Lithium-Ion 180 Wh/kg

NiMH 80 Wh/kg

Abbildung 5: Die gravimetrische Energiedichte unterschiedlicher Energieträger im Vergleich[5]

Neben der Energiedichte müssen bei der Auswahl eines geeigneten Energieträgers weitere Faktoren berücksichtigt werden. Hierzu zählen: Leistungsdichte, Sicherheit, kalendarische Lebensdauer, Zyklenfestigkeit, nutzbare Kapazität (Depth-of-Discharge, DoD), Selbstentladungsrate und natürlich die Kosten. Jeder Typ von Energiespeicher weist spezifische Vorteile, aber auch Nachteile auf [Oertel (2008)]. Es wird somit klar, dass es momentan nicht den einen Energiespeicher gibt, sondern verschiedene Speicher ihre jeweiligen Vorteile in unterschiedlichen Bereichen ausspielen können. Abbildung 6 fasst die wesentlichen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Energiespeicher sowie deren Weiterentwicklungsmöglichkeiten zusammen. Im Anschluss daran wird aufgrund der Relevanz im automotiven Bereich näher auf die Lithium-Batteriezellen-Technologie eingegangen.

5 Eigene Darstellung

	Wasserstoff/ i. V. m. Brennstoffzelle	Li-Ion	Supercaps	NiMH	Blei-Säure
Vorteile	- Energiedichte dreimal so hoch wie Benzin (33.3kWh/kg)	- Hohe spezifische Energie - Hohe Zell-Nennspannung - Gute Zyklenfestigkeit und Lebensdauer mit (Thermo- und Batteriemanagement) möglich - Kein »Memory-Effekt« - Geringe Selbstentladung	- Zuverlässig und robust - Hohe kalendarische Lebensdauer, sehr hohe Zyklenzahl - Sehr große Leistungsdichte	- Zuverlässig und robust, tiefentladefähig - Lange Standzeit im entladenen Zustand - Bei tiefen Temperaturen entladefähig	- Niedrige Herstellungskosten (Materialpreis, Technik) - In großen Stückzahlen und diversen Dimensionen verfügbar
Nachteile	- Wirkungsgrad (48%) gering, allerdings noch besser als Verbrennungsmotor - Speicherung von Wasserstoff problematisch - Infrastruktur noch nicht vorhanden - Hohe Kosten für Brennstoffzellensystem - Wärmeabfuhr der Niedertemperatur-Brennstoffzelle problematisch	- Hohe Kosten - Reaktiv mit Luft und Feuchtigkeit - Aufwendiges Batteriemanagement (elektrisch und thermisch)	- Hohe Selbstentladung (parasitäre, interne Ströme) - Großer Spannungshub - Sehr kleine Energiedichte - Hoher Überwachungsaufwand - Großes Gefahrenpotenzial im Abuse-Fall	- Hohe Selbstentladung (besonders bei erhöhter Temperatur) - Schlechte Zykleneffizienz - Nur bedingt schnellladefähig - Relativ geringe Energiedichte	- Im allgemeinen geringe Zyklenfestigkeit - Nicht tiefentladefähig - Niedrige Energiedichte - Schlechte Ladezustandserhaltung (Sulfatisierung) - Geringe Lebensdauer
Weiterentwicklungsmöglichkeiten	- Einsatz neuer, kostengünstiger Katalysatoren - Weiterentwicklung der Hochtemperatur-Brennstoffzelle für den mobilen Bereich - Einsatz neuer Speichermöglichkeiten für Wasserstoff - Kostengünstige und gut verfügbare Verfahren zur Wasserstoffherstellung	- Kurzfristige Weiterentwicklungen am Li-Ion - Speicher betreffen die Elektrodenmaterialen zur Erhöhung der Speicherdichte, Elektrolyte, Separatoren, Gehäuse zur Verbesserung der Performance und Sicherheit - Batteriemanagement zur Erzielung hoher kalendarischer Lebensdauer und Zyklenzahl bei gleichzeitig hoher Entladetiefe	- EEStor Inc. (Austin/ Texas): Kondensator mit ferroelektrischer keramischer Schicht (Bariumtitanat) als Dielektrikum (abgeschätzte Energie dichte bis 340 Wh/kg, noch keine Produkte)	- Verringerung der Selbstentladung durch verbesserte Separatormaterialien	- Durch den Ersatz der Blei-Anode durch eine Kohlenstoffelektrode (Fa. Axion) ist ein preiswerter »Batterie-Supercap« realisierbar - Kürzere Ladzeiten - Höhere Leistungsdichte - Verbesserte Zyklenlebensdauer
Fazit	- Gute Eignung für Energiespeicherung/ Wandlung im stationären Bereich - Mobiler Bereich bisher auf Spezialanwendungen beschränkt - Kostenreduktion notwendig für automobilen Einsatz - Kostengünstige und umweltschonende Herstellung von Wasserstoff muss realisiert werden	- Höchstes Potenzial, allerdings noch hohe Kosten für den Einsatz bei Elektrotraktion - Geringe Stückzahl für geringe Anzahl an E-Fahrzeugen zunächst problematisch - Optimierte Produktion und Serienreife bei Consumer Products	- Die Kombination von Supercaps mit Speichern hoher Energiedichte bietet Potenzial	- Auf Grund der relativ geringen Energiedichte, der hohen Selbstentladung und der schlechten Schnellladefähigkeit sind NiMH-Akkumulatoren nur bedingt für PHEV und BEV geeignet - Das System ist allerdings ausgereift und sehr robust	- Blei-Säure-Akkumulatoren sind aufgrund der geringen Energiedichte und geringen Lebensdauer für PHEV und BEV nicht geeignet

Abbildung 6: Verschiedene Energiespeicher im Vergleich[6]

6 Eigene Darstellung

2.2.1.2 LITHIUM-BATTERIEZELLEN

AUFBAU UND CHARAKTERISTIKA

Die Lithium-Batterie besitzt unter anderem aufgrund ihrer verhältnismäßig guten Energiedichte (50 bis 200 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 Zyklenfestigkeit (etwa 3.000 Zyklen bis 80 Prozent DoD) sowie eine hohe Zykleneffizienz (etwa 96 Prozent bei 80 Prozent 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 Elektrolyten 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.

CONSUMER-BEREICH

Im Consumer-Products-Bereich werden Lithium-Ionen-Batterien seit Langem eingesetzt. Meist finden hierbei eine Lithium-Kobalt-Oxid ($LiCoO_2$)-Kathode, eine Lithium-Graphit-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. Da für die neuen Konzepte und Materialien sowie Anforderungen auch neue Prozesse und Verfahren notwendig werden, ist bislang offen, inwieweit die bisherigen Hersteller von Consumer-Lithium-Batterien von ihrem Know-how im Umgang mit den Ausgangsmaterialien und der Produktion kleinerer Zellen profitieren können.

AUTOMOBILE ANWENDUNGEN

Für das Elektromobil sind nicht nur neue Zellchemien, sondern auch neue Zelltypen gefragt. Der Trend geht hier zu größeren Zellen. Neben der bisher oft verwendeten Rundzelle sind für den Fahrzeugbereich meist prismatische Zellen oder Pouch-Zellen (sogenannte Coffee-Bags) in Entwicklung.

Aus dem in Abbildung 4 erkennbaren Zielkonflikt zwischen Leistungsdichte und Energiedichte resultiert je nach gewählter Zellchemie und Zellaufbau eine Differenzierung in Hochenergie- und Hochleistungsbatterien: Während die erste eine hohe Reichweite des Fahrzeugs ermöglicht (beispielsweise bei einem batterieelektrischen Fahrzeug erwünscht), erlaubt die zweite eine starke Leistungsaufnahme und -abgabe (wie sie beispielsweise bei Rekuperation oder Boost-Funktionen im Hybrid gefordert sind).

Zu berücksichtigen ist hierbei auch die bei den Konzepten unterschiedliche nutzbare Batteriekapazität. Diese wird bei Hybriden etwa auf 10 Prozent und eine sehr hohe Zyklenanzahl ausgelegt (d.h., man verwendet nur etwa 10 Prozent der nominal verfügbaren Kapazität), bei batterieelektrischen Fahrzeugen bis über 80 Prozent und eine geringere Anzahl an Ladezyklen.

UNTERSCHIEDLICHE ZELLCHEMIEN

Neben der $LiCoO_2$-Batterie existiert eine Vielzahl an Ansätzen, welche durch den Einsatz neuer Materialien für Kathode und Elektrode wesentliche Verbesserungen der Eigenschaften der Batterie erreicht haben, insbesondere bezüglich der Energiedichte. Beispielhaft sei die Lithiumeisenphosphat-Zelle erwähnt, welche sich auch dadurch auszeichnet, dass kein »Thermal Runaway« (unkontrollierter Temperaturanstieg als exotherme Reaktion durch freigesetzten Sauerstoff, welcher bis zur Explosion der Zelle führen kann) bei erhöhter Temperatur der Zelle stattfindet.
Abbildung 7 zeigt einen Überblick über vier unterschiedliche Li-Ion-Batterietypen und deren jeweilige Eigenschaftsausprägung. Hohe Materialkosten für Anode und Kathode, aber auch für verwendete Aluminium- und Kupferfolien sowie Elektrolyt und Separator bis hin zu aufwendigen Produktionsverfahren und hohen Maschinenkosten resultieren in hohen Preisen für Lithium-Ionen-Fahrzeugzellen.

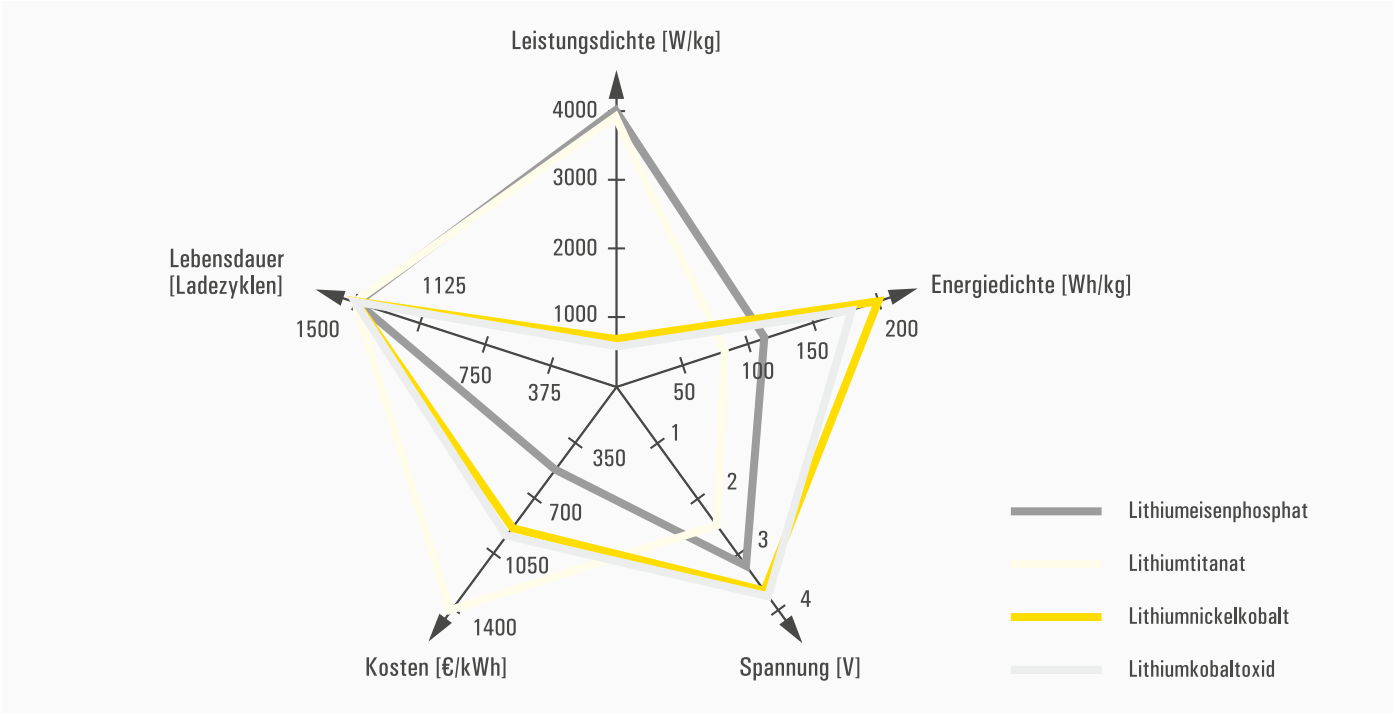


Abbildung 7: Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterietypen[7]

ENTWICKLUNGSTENDENZEN

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

- Steigerung der Sicherheit, beispielsweise durch neue Elektroden: Anodenmaterialien (TiO_2, Metalllegierungen), Kathodenmaterialien ($LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$), Separatoren (keramisch), Elektrolyt (polymere Elektrolyte, ionische Flüssigkeiten, keramische Elektrolyte)
- Erhöhung der Energiedichte der Anode durch Steigerung des Lithium-Anteils: beispielsweise durch neue Anodenmaterialien wie Silizium-Anodenmaterial ($LiSi_5$) oder Zinn
- Ersatz organischer Lösungsmittel und Separatoren durch Anorganik und Keramik
- Alternative Materialstrukturen: Beispielsweise durch Nanopartikelektroden und nanostrukturierte Elektroden (für Anode und Kathode)
- Hochenergieakkumulatoren (Metall-Luft-Zellen wie beispielsweise Lithium-Luft- oder Lithium-Schwefel-Zellen
- Reduktion des Gefährdungspotenzials und Auswirkungen durch interne und externe Kurzschlüsse, Überladung, Tiefentladung und Wärmezufuhr
- Verringerung der Kosten, beispielsweise durch neue Elektroden: Anodenmaterialien (TiO_2), Kathodenmaterialien ($LiMn_2O_4$, $LiFePO_4$)
- Erhöhung der Lebensdauer und Zyklenbeständigkeit: beispielsweise durch neue Zellchemien ($LiNiCoMnO_2$, $LiNiCoAlO_2$)
- Optimierung der Leistungsfähigkeit auch bei niedrigeren Temperaturen
- Belebung alternativer Konzepte (Redox Flow)

7 Eigene Darstellung in Anlehnung an Tübke (2008a)

2.2.1.3 ZUKÜNFTIGE ZELLCHEMIEN

Batterietechnologien neuer Generationen basieren häufig auf metallischen Anoden, beispielsweise Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft. Hierdurch lassen sich signifikant höhere Energiedichten erreichen. Eine Herausforderung dabei 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 und Lithium-Sauerstoff für die langfristige Perspektive diskutiert. 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-ZELLE

Die 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 1.675 Wh/kg sowie eine Leistungsdichte von 3.900 W/kg. Die Zellspannung liegt etwa zwischen 2,2 und 2,5 Volt. Ungelöst ist bisher ein parasitärer Shuttle-Mechanismus, der neben der erwünschten chemischen Reaktion abläuft. Dieser führt zu einer hohen Selbstentladung der Zelle und einer schlechten Effizienz.

Aktuell erreichte tatsächliche Werte liegen bei 350 Wh/kg und 300 Vollzyklen (Sion Power Corporation). Entwicklungen richten sich insbesondere auf die Reduzierung der Kostenstruktur der Elektroden, Erhöhung der tatsächlichen Energiedichte (bis etwa 600 Wh/kg werden hier für möglich angesehen), Erhöhung der Zyklenfestigkeit (angestrebt > 2.000 Zyklen) und des Weiteren auf die Lösung des Problems des sogenannten »Shuttle Mechanismus« [Tübke (2011); Hagen (2011)].

LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIEN

Lithium-Sauerstoff-Batterien versprechen aktuell die größten Energiedichten und damit Reichweiten bei gleichem Gewicht. Die Anode besteht aus reinem Lithiummetall, während die Kathode aus einem poröses Mn_3O_4/C-Gemisch besteht und durch von außen zugeführte Luft ersetzt wird. Die theoretisch erreichbare Energiedichte liegt bei 5.200 Wh/kg mit Berücksichtigung des Sauerstoffs (11.140 Wh/kg ohne Berücksichtigung des Sauerstoffs). Die Zellspannung liegt dabei bei etwa 2,9 Volt.
Aktuelle Werte erreichen bisher etwa 700 Wh/kg bei 300 Vollzyklen (PolyPlus Battery in Berkeley, CA) [Tübke (2011)]. Es wird erwartet, dass kommerziell einsetzbare Systeme mindestens noch 20 Jahre Entwicklungszeit benötigen [Möller (2011)].

HOCHVOLT-BATTERIEN

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 4,5 bis 5 Volt. Hochvolt-Materialien gelten bereits als anwendungstechnisch fortgeschritten (beispielsweise $LiNiMnCoO_2$, $LiCoPO_4$, $LiNiPO_4$), müssen allerdings noch in den Bereich zukünftiger Technologien im Automobilbau eingegliedert werden [Hartnig (2011)].
Der Spannungsbereich lässt sich allerdings nicht beliebig erhöhen, da insbesondere derzeitige Materialien bei höheren Spannungen instabil werden und auch hochvoltstabile Elektrolyte nicht vorliegend sind [Möller (2011)].

LITHIUM-METALL-POLYMER-BATTERIE

Der Separator/Elektrolyt besteht aus einem Polymer, welches das dendritische Wachstum des Lithiums beim Wiederaufladen verhindern und die Sicherheit der Batterie gewährleisten soll.
Ein Vorteil der LMP-Batterie liegt bei einem hohen Wirkungsgrad, welcher bis zu 99,7 Prozent betragen kann. Die Lithium-Metall-Polymer-Batterie (LMP) ist bereits seit einiger Zeit bekannt, konnte aber bisher aufgrund ungelöster Probleme keine Anwendung im Automobilbau finden. Ein Grund war beispielsweise, dass Strom in den Zellen bislang erst ab 60 Grad Celsius fließen konnte.
Die Technologie wurde auch bekannt, als die Firma DMB mit einer 600-km-Fahrt von München nach Berlin damit warb, die Probleme der Technologie gelöst zu haben: durch einen speziellen schichtartigen Aufbau (mittels 4-Layer-Technologie) sowie eine neuartige Materialkombination. Die generelle Sicherheit und Funktionsfähigkeit konnte durch die Bundesanstalt für Materialforschung und DEKRA bestä-

tigt werden.[8] Experten aus Wissenschaft und Forschung bezweifeln allerdings die Darstellung des Reichweitenrekords [vgl. u. A. Winter (2011)].

2.2.1.4 SUPERCAPS

Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (auch Ultracaps oder Supercaps) besitzen eine große Oberfläche und eine geringe Dicke des Dielektrikums. Supercaps zeichnen sich insbesondere durch eine wesentlich verbesserte Leistungsaufnahme und -abgabe (gravimetrische Leistungsdichte bis 20.000 W/kg) und hohe Wirkungsgrade (Zykleneffizienz 98 Prozent bei 80 Prozent DoD) im Vergleich zu Batterien aus. Ebenso verfügen sie über eine hohe Zyklenfestigkeit (ca. 500.000 Zyklen bei 80 Prozent DoD). Demgegenüber stehen hohe Kosten und eine geringe Energiedichte (gravimetrische Energiedichte von etwa 4 Wh/kg) [vgl. u. A. Frost & Sullivan (2009); Tübke (2011)]. Supercaps könnten eine interessante Erweiterung zu bestehenden Li-Ion-Energiespeicher darstellen und eine Unterstützung im »Stop-and-Go« bieten, aber auch allgemein bei kurzzeitigen starken Ladevorgängen (Rekuperation) und Entladevorgängen (Boost-Funktion) die Batterie entlasten. Die hohe Leistungsdichte könnte allerdings einen Einsatz in Mild-Hybriden unterstützen. Durch die geringe Energiedichte eignen sich bisherige Systeme allerdings nicht zur Energiespeicherung von rein elektrischen Fahrzeugen.

2.2.1.5 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 Vorratstanks zugeführt und das entstehende Produkt ebenfalls in einen Vorratsbehälter abgeführt. Zum Laden wird die Pumprichtung des Elektrolyten umgedreht. Man unterscheidet Redox-Flow-Batterien mit zwei flüssigen elektroaktiven Komponenten sowie Hybrid-Flow-Batterien mit einer flüssigen und einer festen elektroaktiven Komponente. Als Elektrolyt kann bei der Redox-Flow-Batterie Vanadium, Vanadium-Bromid, Polysulfid-Bromid oder Eisen-Chrom eingesetzt werden. Bei der Hybrid-Flow-Batterie ist hingehen Zink-Brom oder Cer-Zink im Einsatz. Die Elektrolyte sind meist kohlenstoffbasiert oder aus Graphit und teils als Filz ausgeprägt. Als Separator kommt zumeist Nafion (112, 125) oder auch Polystyrensulfonsäure-Membran zum Einsatz. Je nach Materialpaarung der Elektrolyte ergeben sich unterschiedlich erreichte Spannungsebenen von etwa 1,0 bis 2,2 V (Graphitelektroden mit wässrigem Elektrolyt bei max. 1,7 V) [Tübke (2011)].

Aktuelle Entwicklungsziele sind insbesondere neue Elektrolytsysteme für höhere Energiedichten, aber auch Elektrodenoptimierung für mehr Leistung sowie Reduzierung der Anlagen- und Wartungskosten durch bspw. neue Membranen. Die Energiekapazität wird im Wesentlichen von der Tankgröße für die Elektrolytlösung bestimmt und ist leicht skalierbar. Der Wirkungsgrad liegt bei bis zu 80 Prozent. Das System bietet einen flexibler Aufbau (Trennung von Energiespeicher und -wandler) und zeichnet sich durch eine lange Lebensdauer und eine hohe Zyklenfestigkeit ($>$ 10.000) aus. Ebenfalls liegen ein geringer Wartungsaufwand, schnelle Ansprechzeit (μs-ms), gute Überlade- und Tiefentladetoleranz sowie keine Selbstentladung vor. Die wässrigen Elektrolyte führen allerdings auch zu einer geringen Energiedichte sowie hohen Kosten im Hochenergiebereich [Tübke (2011)]. Die Energiedichte ist abhängig von der Löslichkeit der Redoxpaare und liegt aktuell bei etwa 70 Wh pro Liter Elektrolytflüssigkeiten bei einer Vanadium-Bromid-Verbindung.

Im angestrebten Leistungsbereich bieten Redox-Flow-Batterien ein aussichtsreiches Entwicklungspotenzial, um durch dezentrale, netzintegrierte Stromspeicher die Netzkapazitäten besser auszunutzen und Engpässe zu vermeiden. Sie ist damit insbesondere für stationäre Anwendungen interessant.

8 Die Bundesanstalt für Materialforschung hat bisher sicherheitstechnische Untersuchungen auf Grundlage des UN-Prüfhandbuchs zur Beförderung gefährlicher Güter durchgeführt. Hierbei ist untersucht worden, ob die Technologie bei extremen Klima- und Luftdruckschwankungen, elektrischen Kurzschlüssen, Überladung oder Falschpolung sowie bei starken mechanischen Einflüssen wie Schwingungen, Stoß und Aufprall sicher sei. Ebenfalls wurde der von der DEKRA durchgeführte Reichweitentest bestanden, der die Be- und Entladung der Batterie, die Ermittlung des Fahrwiderstandes und der Maximalgeschwindigkeit sowie die allgemeine technische Sicherheit des Fahrzeugs überprüft [Pudenz (2011)].

2.2.2 KOMPONENTEN DES BATTERIEELEKTRISCHEN ANTRIEBSSTRANGS

2.2.2.1 BATTERIESYSTEM

Für einen Einsatz in Kraftfahrzeugen müssen die Sekundärzellen zu Batteriesystemen zusammengefasst werden. Hierzu werden Module aus den Einzelzellen gebildet. Die Zellen können in Reihenschaltung zur Spannungserhöhung zusammengefasst werden. Übliche Werte für Batteriesysteme in Fahrzeugen betragen bis zu 400 V. Diese Module werden anschließend in einem Gesamtsystem gebündelt, um die Kapazität zu erhöhen [Blazejak (2009)]. Neben den Zellmodulen umfasst ein gesamtes Batteriesystem auch noch Komponenten zum elektronischen, elektrischen, thermischen und mechanischen Zusammenschluss (vgl. Abbildung 8).

Aus unterschiedlichen Zelltypen leiten sich unterschiedliche Anforderungen an das Gesamtsystem ab, beispielsweise hinsichtlich Kühlung und Packaging. 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.

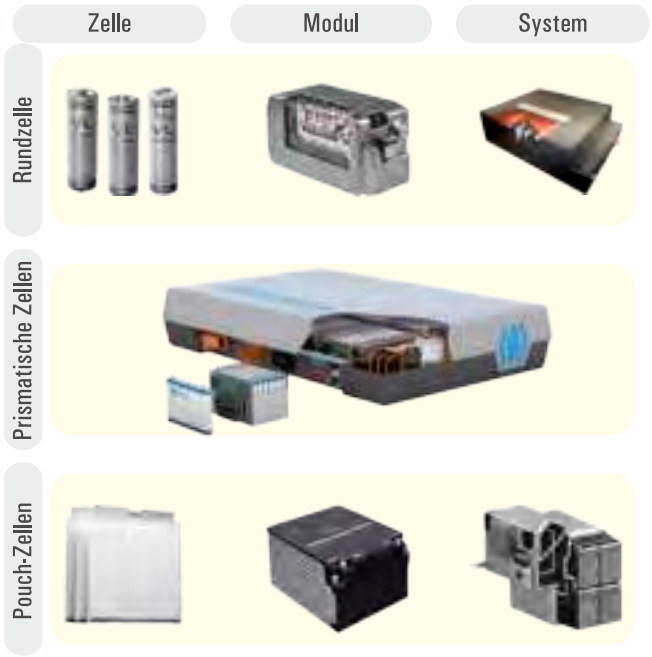


Abbildung 8: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung[9]

BATTERIEMANAGEMENT

Das Batteriemanagement überwacht den Ladezustand der einzelnen Zellen, regelt die Kommunikation zwischen den Modulen sowie der Gesamtbatterie, analysiert relevante Sensordaten und steuert Maßnahmen zur Behebung unerwünschter Abweichungen durch beispielsweise Ansteuerung der Batteriekühlung, Ladungsausgleich zwischen Zellen (Cell-Balancing) bis hin zu Sicherheitsabschaltung bei kritischem Zustand.

Das Elektrolytsystem der Lithium-Ionen-Zelle ist nicht überladefähig und damit empfindlich gegen Über- oder Tiefentladung. Produktionsunterschiede führen zu unterschiedlichen Zelleigenschaften, welche im Laufe der Zeit weiter auseinanderdriften. Das Batteriemanagement organisiert diese Unterschiede und wird deshalb als Schlüsselkomponente zum dauerhaften Einsatz von Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen gesehen.

BATTERIE-THERMOMANAGEMENT

Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterien erfordern neben einem Batteriemanagement auch ein aktives thermisches Management zur Übernahme von Kühlung und Erwärmung der Batterie.

Die Alterung einer Lithium-Ionen-Batterie hängt insbesondere von der Nutzung (Lade-, Entladeströme, Tiefentladungen) und Einsatzbedingungen ab und bestimmt die nutzbare Lebensdauer. Der Automobilbau fordert ein End-of-Life (80 Prozent Restkapazität/DoD) für die Nutzungsdauer eines Fahrzeugs (10 bis 15 Jahre) bei Einsatztemperaturen von etwa 40 °C [Brotz (2007); Fehrenbacher (2009)].

9 Eigene Darstellung; Bildmaterial: Saftbatteries (2011) I Batteriemodul (2011) I Johnson Controls (2011) I SB LiMotive (2011) I ELAB 2011

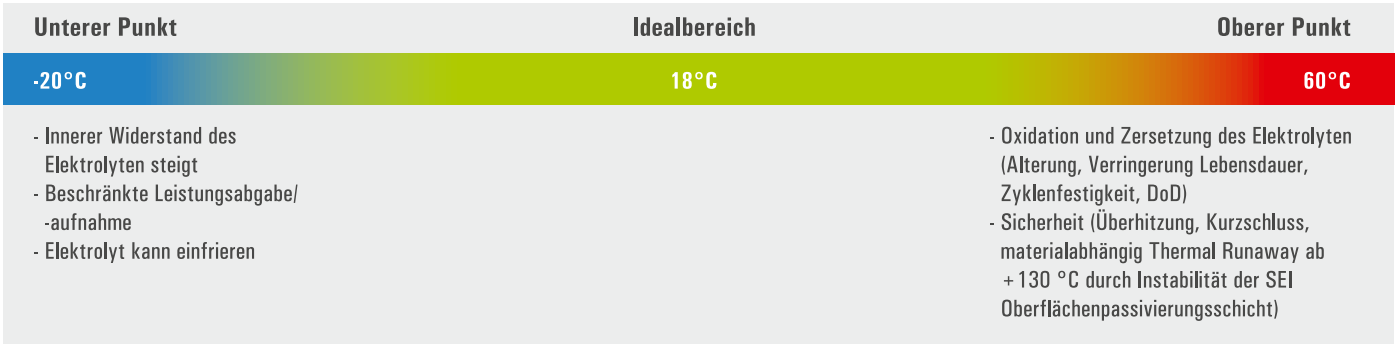


Abbildung 9: Die Wohlfühltemperatur von Batteriezellen[10]

2.2.2.2 ELEKTRISCHE MASCHINE

Die elektrische Maschine kann den Verbrennungsmotor als Antriebsquelle erweitern und verbessern (Verbesserung des Wirkungsgrades 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 als auch als Generator zur Energierückgewinnung betrieben werden können.

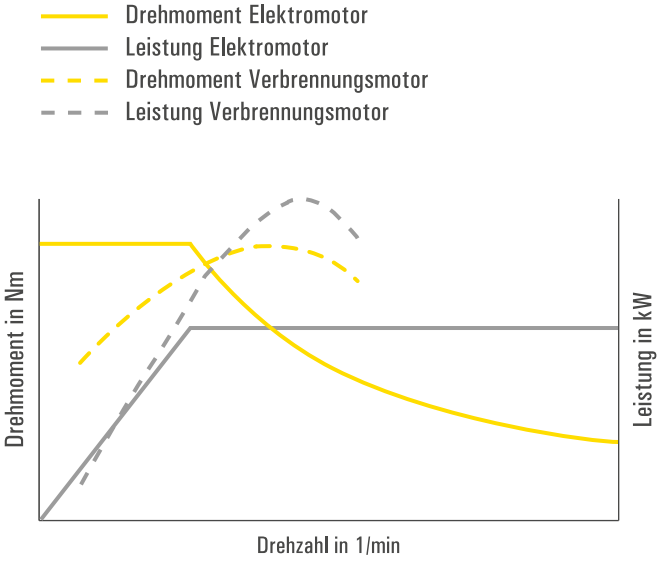


Abbildung 10: Drehmoment und Leistungskennlinien im Vergleich[11]

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 und sinkt dann erst ab (Feldschwächebereich). Deshalb kann auf eine Kupplung verzichtet werden und man benötigt nur ein Übersetzungsgetriebe. Weitere Vorteile sind der hohe Wirkungsgrad (bis 95 Prozent), problemloser Teillastbereich, Drehmoment ab Stillstand, Rekuperationsmöglichkeit, Robustheit, hohe Lebensdauer, geringe Wartungskosten, gute Skalierbarkeit und relative Geräuscharmut. Darüber hinaus kann der Motor eine gewisse Zeit auch über der eigentlichen Nennleistung (Überlastbereich) betrieben werden, ohne Schaden zu nehmen.

DREHSTROMMOTOREN

Drehstrommaschinen sind Wechselstrommaschinen mit einem 3-phasigen Wechselstrom. Die Drehfeldwicklungen befinden sich im Stator (auch Ständer) 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-phasige 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 folgt.

10 Vgl. Tübke (2008a)
11 Eigene Darstellung

MOTORTOPOLOGIE

Grundsätzlich lassen sich gemäß dem Laufverhalten von Stator und Rotor die Drehstrommaschinen in Synchron- und Asynchronmotoren unterteilen. Da bei Letzterem zwischen der Felderzeugung des Magnetfeldes im Rotor und im Stator ein Zeitverzug besteht, läuft der Rotor zeitlich verzögert und damit asynchron. Dafür punktet der Motor mit guter Leistungsdichte, einem einfachen Aufbau und einfacher Regelung sowie damit, dass er ohne Magnete auskommt. Der Synchronmotor hingegen weist einen noch höheren Wirkungsgrad und Leistungsdichte aus. Die Drehzahl des Rotors folgt der vorgegebenen Frequenz und dem magnetischen Drehfeld im Stator synchron. Dies erfordert allerdings einen höheren Regelaufwand. Die Ausführung des Rotors kann mit teuren Permanentmagneten (vergrabene oder Oberflächen-Magnete) erfolgen oder durch eine Fremderregung in Spulen (Aufbau eines Magnetfelds durch stromdurchflossene Spulen) zulasten des Wirkungsgrades. In Abhängigkeit der Motortopologien ergeben sich spezifische Rotor- und Statorkonstruktionen, diese sind in Abbildung 11 dargestellt [Franke (2011a)].

AUSFÜHRUNGSFORMEN

Die verschiedenen Ausführungsformen werden nachfolgend skizziert [vgl. u. A. Freialdenhoven (2009); Mathoy (2010); Hofmann (2010)].

Asynchronmaschine (ASM): Ein Merkmal der Asynchronmaschine, auch Induktionsmaschine genannt, ist die Kurzschlusswicklung im Rotor (Läufer). Der aus Blechen aufgebaute Rotor besitzt meist eine

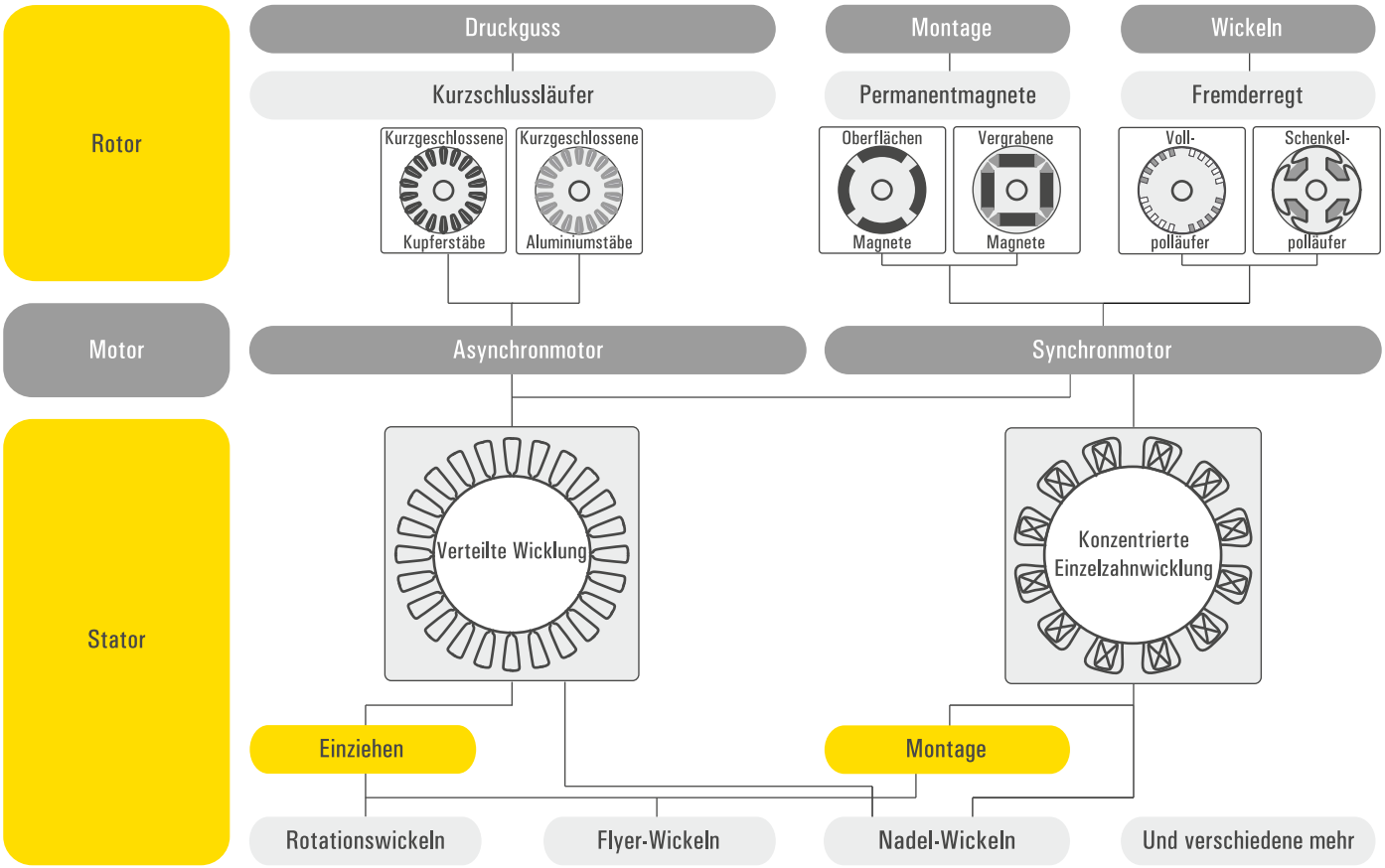


Abbildung 11: Motortopologien[12]

12 Eigene Darstellung nach Franke (2011a)

Stabwicklung, in der die Stäbe durch zwei Kurzschlussringe verbunden sind. Hierdurch kommt es zu teils sehr hohen Strömen im Rotor. Das erreichte Drehmoment ist proportional zur Differenz (Schlupf) der Umlaufgeschwindigkeit zur Netzfrequenz. 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 fremderregten Synchronmaschine). Die Asynchronmaschine hat einen sehr einfachen und preiswerten Aufbau bei geringem Volumen und Gewicht. Ebenfalls wird nur eine relativ kostengünstige Steuerung und Impulsgeber benötigt. Die ASM ist eine sogenannte High-Speed-Maschine (im Gegensatz zur High-Power-Maschine) und erfordert damit ein Getriebe. Bei höheren Drehzahlen zeigt die Asynchronmaschine allerdings einen quadratisch abnehmenden Drehmomentverlauf. Hochpolige Motoren erfordern des Weiteren sehr präzise und kleine Luftspalte für gute Stromphasenwinkel. Auch führen die Rotorverluste bei tiefen Drehzahlen und hohen Drehmomenten zu hohen Rotortemperaturen. Der Wirkungsgrad liegt allerdings unterhalb des Wirkungsgrads der Synchronmaschine. Sie gilt als sicher, ökonomisch und eignet sich für urbane Anwendungen. Einsatz findet sie bisher beispielsweise beim Tesla Roadster.

Permanenterregte Synchronmaschine (PSM): Der Statoraufbau einer permanentmagneterregten Synchronmaschine ähnelt dem einer Asynchronmaschine. Neben verteilten Wicklungen können hier auch konzentrierte Wicklungen Anwendung finden. Der Rotor (auch Läufer oder Polrad genannt) ist des Weiteren mit Permanentmagneten versehen. Diese können an der Oberfläche fixiert sein (Oberflächenmagnete) oder sich in Taschen innerhalb des Rotors befinden (vergrabene Magnete). Sie weist einen einfachen mechanischen und elektrischen Aufbau auf (keine Bürsten, keine Schleifkontakte, keine komplizierten Wicklungen). Auch sind hochpolige Motorentypen leicht herstellbar. Die Maschine entwickelt bei kurzgeschlossenen Wicklungen ein hohes Bremsmoment (Sicherheitsfunktion, kann aber auch Risiken bergen) und besitzt einen sehr guten Wirkungsgrad im unteren Drehzahlniveau und Teillastbereich. Sie zählt damit zu den High-Power-Maschinen. 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 fremderregten Synchronmaschinen. Der notwendige Einsatz von seltenen Erdmetallen führt allerdings zu hohen Materialkosten und zu Abhängigkeiten von Importen. Ebenfalls ist ein kostspieliger Rotorlagegeber notwendig. Jeder permanentmagneterregte Motor weist allerdings auch 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. Ebenfalls sind sehr hohe Kurzschlussströme und Leerlaufspannungen bei Umrichterdefekten möglich. Auch in der Serienfertigung ist von einem aufwendigen Fertigungsprozess auszugehen. Die permanentmagneterregte Synchronmaschine ist aktuell die am weitesten verbreitete Maschine bei Hybriden. Aber auch als Traktionsmotor wird sie vermehrt eingesetzt.

Stromerregte Synchronmaschine (SSM): Fremderregte Synchronmaschinen werden insbesondere bei größeren Synchronmotoren umgesetzt. Während der Stator den gleichen Aufbau wie eine PSM hat, weist der Rotor eine Magnetisierung durch Stromzufuhr von außen auf (anstelle der Magnete beim PSM). Hierzu besitzt der Rotor Schenkelpole, welche mit Wicklungen versehen sind oder Vollpole mit eingezogenen Wicklungen. Die Magnetisierung des Rotors (auch Läufer oder Polrad genannt) erfolgt über die stromerregten Pole. Die Erregerwicklungen werden über Schleifringe (teils Bürsten) mit Strom versorgt. Bei größeren Maschinen (Durchmesser über 400 mm) kann auch eine berührungslose Übertragung erfolgen. Im Unterschied zu Gleichstrommotoren muss allerdings nur wenig Strom in den Rotor übertragen werden. Stromerregte Synchronmotoren erreichen für etwa 30 Sekunden das 2,5-Fache und für 5 Sekunden das bis zu 4-Fache des Nennwerts. Ein großer Vorteil ist, dass keine Magnete dafür eingesetzt werden müssen. Ebenfalls weist die Maschine keinen Leistungsabfall bei höheren Drehzahlen auf. Sie besitzt auch einen sehr hohen Wirkungsgrad, allerdings eine geringere Leistungsdichte als PMS. Zudem bestehen eine kleine Wirkungsgradverschlechterung und die Notwendigkeit einer zusätzlichen Leistungselektronik zur Bereitstellung des Erregerstroms im Rotor. Eine Sonderbauform der stromerregten Synchronmaschine ist die Hybrid-Synchronmaschine: Durch den zusätzlichen Einsatz von Permanentmagneten kann eine Erhöhung des Reluktanzmoments erreicht werden. Dies ist vorteilhaft, um im Notbetrieb ein ausreichendes Drehmoment auch ohne Stromerregung zu ermöglichen.

Synchrone Reluktanzmaschine (SyR): Reluktanzmotoren basieren auf dem Prinzip, dass sich ein magnetisierbarer (aber selbst nicht magnetischer) Körper in der Richtung des äußeren Felds ausrichtet. Bei der synchronen Reluktanzmaschine erfolgt die Erregung durch eine

zur angelegten Spannung nacheilende Stromkomponente. Der Stator weist Wicklungsspulen (verteilt oder konzentriert) auf. Der Rotor besteht ebenfalls aus einer Vielzahl geblechter Segmente, die mit unmagnetischen Elementen verbunden sind. Es sind keine Rotorwicklungen oder Magnete nötig. Die synchrone Reluktanzmaschine weist eine einfache Bauart und äußerste Robustheit auf. Eine hohe Drehmomentausbeute ist allerdings mit Geräuschentwicklung verbunden, da das Drehmoment durch Pulsströme erreicht wird, welche auch radial wirkende Kräfte und damit eine Geräuschentwicklung hervorrufen. Dies ist konstruktiv zu lösen. Durch die Bauform ergibt sich eine sehr hohe Eigensicherheit. Um die fehlende Dauermagnetisierung zu kompensieren, bieten sich Möglichkeiten zur Kombination des Reluktanzprinzips und der permanenten Erregung an. Hierbei sind Sonderformen wie ein vormagnetisierter Reluktanzmotor oder hybrider Reluktanzmotor möglich. Die hybriderregte Maschine enthält deutlich weniger Magnetmaterialien als die PSM. Trotzdem erreicht man einen Drehzahlbereich konstanter Leistung wie bei der Asynchronmaschine, aber mit höherem Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich. Allerdings reicht die Kurzzeit-Überlastbarkeit nicht an die Eigenschaften einer PMS heran. Für eine hohe Querreaktanz sind wie bei der ASM sehr präzise und kleine Luftspalte einzuhalten. Ebenfalls werden auch sehr hohe Anforderungen an das reduzierte Material gestellt und die Motortopologie weist eine komplexe Regelung auf.

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 gravierende unterschiedliche Anforderungen aus dem Industriebereich sowie dem Automobilbau an die Produktion elektrischer Maschinen gestellt werden. Beispielhaft zu nennen sind im Automobilbau eine höhere Lieferqualität (100 Parts-per-million, d.h. Anzahl Fehlerteile bei 1 Mio. produzierten Einheiten) und Liefertreue (100 Prozent) sowie eine stärkere Automatisierung (Lohnanteil etwa 5 Prozent), allerdings auch eine reduzierte Lebensdauer (etwa 4.000 Stunden) [Franke (2011a)]. Durch die unterschiedlichen Motorkonzepte und neuen Anforderungen ergeben sich auch neue Herausforderungen an die Unternehmen und notwendigen Fertigungsverfahren, welche es nun für die automobile Serienfertigung zu entwickeln gilt.

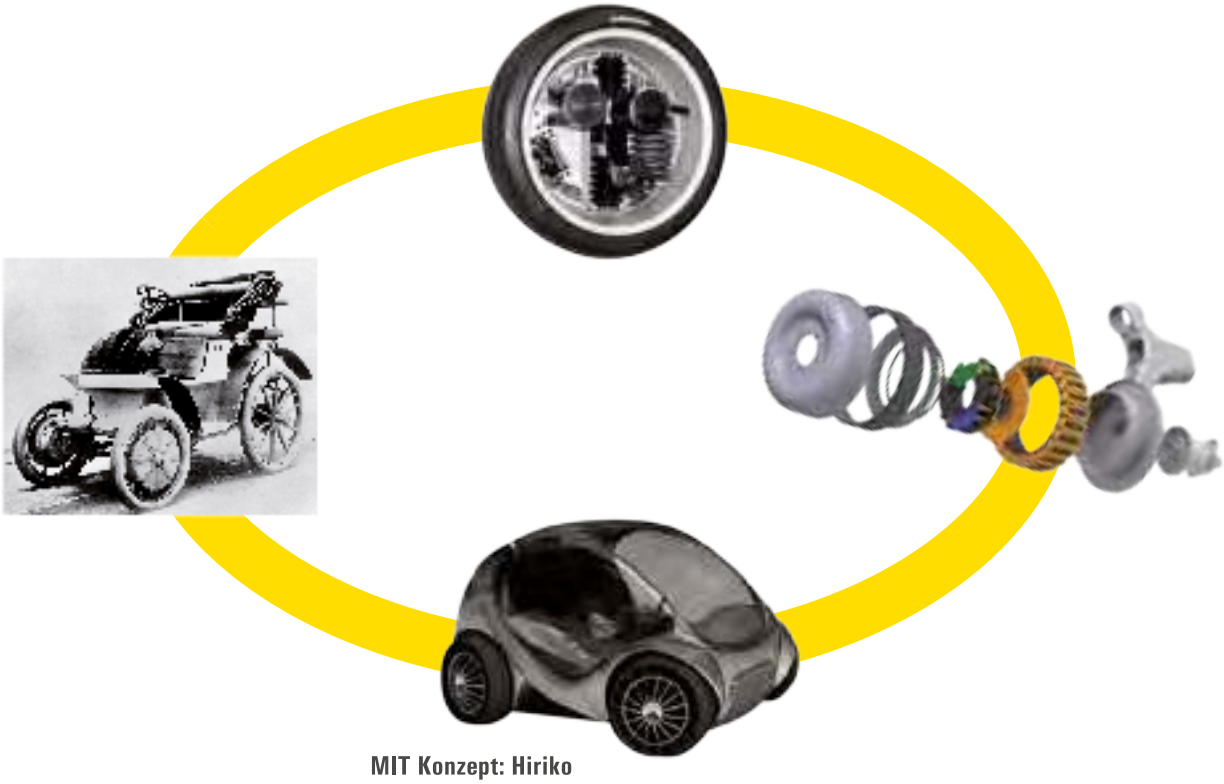
Aktuell sind bereits einige Automobilhersteller aktiv, Elektromotoren in Eigenregie (Beispiel BMW) oder in Zusammenarbeit mit einem Zulieferer (Beispiel Daimler mit Bosch) zu entwickeln und zu fertigen. Die Fertigung der Elektromotoren könnte damit zur Kernkompetenz der Automobilhersteller werden. Automobilhersteller könnten dabei beispielsweise Maschinenkomponenten wie Rotor und Stator in Eigenregie fertigen, die Leistungselektronik zukaufen und den Zusammenbau und die Integration ins Fahrzeug übernehmen [Schäfer (2010)].

NEUE KONZEPTE

Die geringe Baugröße und Flexibilität der Anbindung ermöglicht eine Vielzahl neuer Konzepte für die Positionierung der elektrischen Maschine im Fahrzeug und damit neue Fahrzeugarchitekturen. So ist beispielsweise eine zentrale Anordnung, vergleichbar mit heutigen Verbrennungsmotoren, ebenso möglich wie eine Aufteilung der Antriebsleistung auf zwei kleinere Motoren an Vorder- und Hinterachse, bis hin zu vier Radnabenmotoren in den Rädern des Fahrzeugs (Beispiel: Active Wheel von Michelin, Fraunhofer oder MIT, siehe nachfolgende Abbildung).

Radnabenmotoren bieten dabei zahlreiche Vorteile wie eine radselektive Ansteuerung von Zusatzfunktionen (z. B. Torque Vectoring oder ESP ohne komplexe Zusatzsysteme), gute Gewichtsverteilung, große Freiheiten für Automobilkonzepte und eine aufgeteilte Bremsenergierückgewinnung an allen vier Rädern. Allerdings sind noch einige Herausforderungen z. B. im Hinblick auf die Problematik der ungefederten Masse insbesondere im höheren Geschwindigkeitsbereich zu lösen. Es wird auch erwartet, dass Radnabenmotoren generell teurer sind und einen höheren Aufwand für die Gewährleistung der Sicherheit und Lebensdauer darstellen. Hinzu kommen ein hoher Verkabelungsaufwand, wenn die Leistungselektronik weiterhin im Fahrzeugchassis

Michelin
Active Wheel mit integrierter Feder-Dämpfer-Einheit



Lohner Porsche
Elektrofahrzeug mit Radnabenantrieb (1900)

Fraunhofer IFAM
Verbundlenker-Hinterachse mit integriertem Radnabenantrieb

MIT Konzept: Hiriko
Stadtfahrzeug mit vier einzeln lenkbaren Rädern und integrierten Radnabenmotoren

Abbildung 12: Radnabenantriebe: Historischer Rückblick und aktuelle Konzepte[13]

13 Eigene Darstellung

sitzt, sowie eine hohe mechanische Belastung der Maschine. Neben Zweirädern könnten insbesondere Nutzfahrzeuge mit geringen Geschwindigkeiten (wie beispielsweise Baumaschinen, Flurförderfahrzeuge, Stadtbusse) von einem guten Aufwand-Nutzen-Verhältnis und Packagevorteilen profitieren [Schäfer (2010)].

2.2.2.3 LEISTUNGSELEKTRONIK

Das Leistungselektronikmodul hat die Aufgabe, den Energiefluss im Fahrzeug zu ermöglichen. Zu den Aufgaben gehören dabei das Konvertieren einer Spannung auf ein anderes Niveau (Herauf- oder Heruntersetzen einer Spannung), das Invertieren einer Spannung (Umrichten der Wechselspannung auf Gleichspannung oder umgekehrt) oder eine Kombination aus beiden. Neben der Regelung des Antriebs müssen auch die Rekuperation bzw. der Ladevorgang sowie Spannungswandlung innerhalb des Bordnetzes über die Leistungselektronik dargestellt werden. Die Leistungselektronik stellt damit bedeutende Komponenten mit Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Hybrid- und Elektrofahrzeuge dar.

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

Im Hybrid- oder Elektrofahrzeug werden wie im vorherigen Kapitel beschrieben fast ausschließlich Drehstromantriebe eingesetzt. Hierzu muss die elektrische Energie aus dem Energiespeicher an die Erfordernisse der Elektromaschine angepasst werden. Die Steuerung der Energie zwischen Batterie und elektrischer Maschine erfordert eine elektronische Stelleinrichtung, den Wechselrichter (auch Inverter). Dabei wird die Energie der Batterie (Gleichstrom) für den Betrieb des Elektromotors (mehrphasige Wechselspannung) umgewandelt, da für das Ansteuern des Motors eine variable Wechselspannung in einer variablen Frequenz zur Drehzahlstellung benötigt wird.

Der Inverter besteht aus einem Leistungsmodul (mit Hochleistungs-Halbleiterschaltungen, z. B. IGBTs, SJ MOSFET), Kondensatoren, Steuerungselektronik (Controller, Software), Leistungsanschlüssen, Kühlung, Gehäuse. Die am häufigsten eingesetzte Schaltungs-Topologie ist die B6-Brückenschaltung mit 6 Leistungsschaltern. Zur Glättung der Eingangsspannung wird ein Zwischenkreiskondensator (meist Folienkondensator) benötigt. Aufgrund der hohen Spannung und notwendigen Kapazität kann der Kondensator ein beträchtliches Bauvolumen erreichen. Er hat damit einen hohen Einfluss auf die Leistungsdichte des gesamten Wechselrichters. Der Kondensator stellt

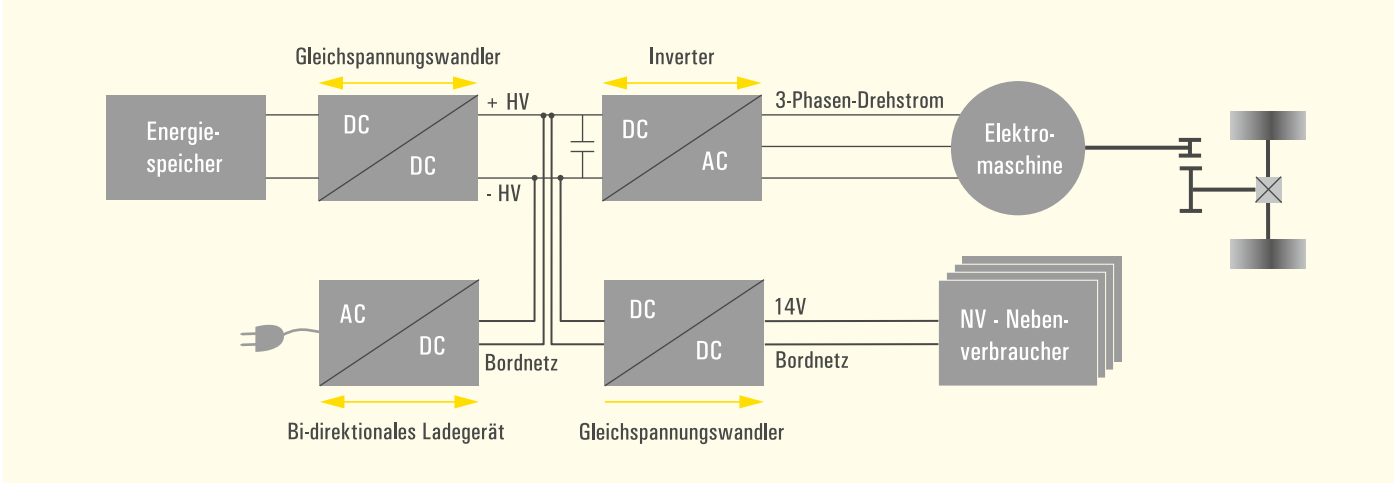


Abbildung 13: Mögliche Topologie Leistungselektronik mit HV-Batterie und NV-Bordnetz[14]

14 Eigene Darstellung in Anlehnung an Hofmann (2010)

auch ein kritisches Bauteil dar, welches neben dem Leistungsmodul die Zuverlässigkeit des Wechselrichters entscheidend mitbestimmt. Beide Komponenten (Leistungsmodul und Kondensator) verursachen auch einen Großteil der Kosten des Inverters [Cebulski (2011)].

Abbildung 14 zeigt im schematischen Aufbau den Pulswechselrichter und seine wesentlichen Bestandteile.

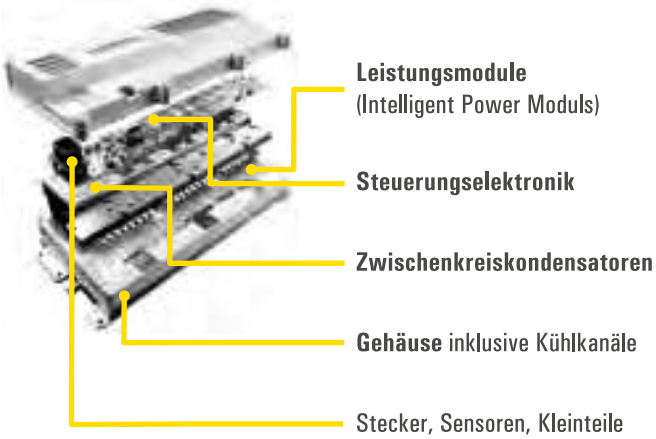


Abbildung 14: Pulswechselrichter und seine wesentlichen Bestandteile[15]

Entwicklungen gehen dahin, die Haltbarkeit des Leistungshalbleitermoduls hinsichtlich der Anzahl an Lastwechsel auch bei höheren Chiptemperaturen deutlich zu verbessern und höhere Schaltfrequenzen zu erreichen. Beispielsweise wird versucht, dies durch neue Fertigungsverfahren oder neue Halbleitermaterialien (SiC, GaN) zu erreichen. Ebenso wird versucht, die Leistungsdichte weiter zu erhöhen (beispielsweise durch einen dreidimensionalen Aufbau), aber auch geringere Verluste oder weichschaltende Topologien umzusetzen [De Donker (2011)].

Aktuell befindet sich der Inverter meist in einem separaten Gehäuse. Dies bedingt 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 an der Anpassung des Wechselrichters an den Elektromotor gearbeitet. Auch könnte damit 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 Wechselrichter bilden auch Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler oder Konverter-Module) Komponenten zur Spannungsanpassung. Der DC/DC-Wandler erzeugt aus einer variablen Eingangs-Gleichspannung mithilfe von leistungselektronischen Elementen eine veränderte Ausgangs-Gleichspannung. Wichtigstes Kriterium dabei ist der Betrag und die Güte der verwendeten bzw. zu erzeugenden Spannungen und Ströme [Cebulski (2011)].

Der Gleichspannungswandler dient beispielsweise der 14-V-Bordnetz-Versorgung aus dem Hochvolt-Bordnetz eines Elektrofahrzeugs. Während darüber hinaus eine Hochvolt-Batterie direkt an das Hochvolt-Bordnetz angeschlossen werden kann, muss bei einer Niedervolt-Batterie ebenfalls eine entsprechende Spannungsanpassung über einen DC-DC-Wandler erfolgen und die Batteriespannung entsprechend auf eine höhere Spannungsebene gesetzt werden (Beispiel Toyota Prius von 202 V auf 650 V) [Cebulski (2011); März (2011)].

LADEGERÄT

Um ein batterieelektrisches Fahrzeug 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 weiterhin den Verlauf des Ladezustands (SOC State-of-Charge). Deutlich zu sehen ist hierbei, dass bereits innerhalb kurzer Zeit etwa 70 Prozent SOC erreicht werden, das Erreichen der 100-Prozent-Marke allerdings mit zusätzlicher Zeit und abnehmender Ladestromstärke verbunden ist.

15 Eigene Darstellung I Bildmaterial: SEMIKRON 2011

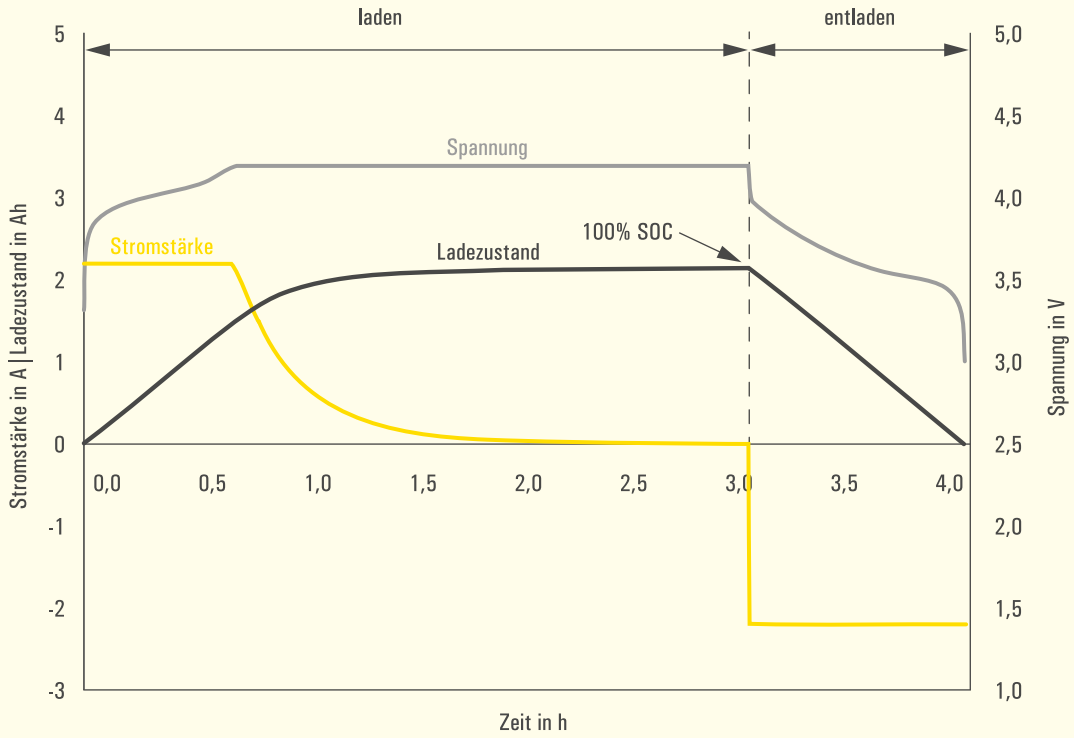


Abbildung 15: Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ionen-Zelle bei Schnellladung[16]

Das Ladegerät kann entweder im Fahrzeug (On-Board-Charging) installiert sein, was die bisher geläufige Ausführung ist. Oder es kann auch als externes Gerät in der Ladesäule verbaut sein (Off-Board-Charging). Das Off-Board-Charging wird meist bei der Schnellladung eingesetzt. Hierbei wird beispielsweise bereits in der Ladestation Gleichstrom für die Batterie erzeugt.

Je nach umgesetztem Konzept erfolgt die Anpassung als Umrichtung oder als Spannungswandlung, wofür auch separate Ladegeräte notwendig sind. Die dafür notwendigen Topologien befinden sich derzeit genauso wie die Standardisierung der Ladeprozesse und Steckersysteme in intensiver Diskussion und Erforschung.

Eine interessante Entwicklung sind sogenannte »Integrated Chargers«. Diese nutzen die vorhandene Infrastruktur an Spannungsrichtern und Wandlern im Fahrzeug für den Ladeprozess aus und verursachen deutlich geringere Kosten.

2.2.2.4 GETRIEBE

Aufgrund der Drehmomentcharakteristik eines Verbrennungsmotors benötigen herkömmliche Fahrzeuge Kupplung und Getriebe. Effizienz- und Komfortoptimierungen haben diese sehr komplex und teuer werden lassen, dafür bieten aktuelle Achtgang-Automatiken oder Doppelkupplungsgetriebe keine Komfort-Nachteile mehr gegenüber stufenlosen Getrieben (beispielsweise CVT Continuously Variable Transmission).

HYBRIDGETRIEBE

Die Integration eines zusätzlichen Elektromotors bei leistungsverzweigten und 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: Toyota setzt ein einzelnes Planetengetriebe ein, BMW, Daimler und GM hinge

16 Lutz (2008)

gen verwenden zwei Planetengetriebe, Kupplungen und Bremsen. VW, Audi und Porsche positionieren den Elektromotor zwischen Kupplung und konventionellem Automatikgetriebe.

GETRIEBE BEI ELEKTROFAHRZEUGEN

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-Torque-Maschinen möglich. Diese Konzepte kommen mit einem einfach gebauten und kostengünstigen Übersetzungsgetriebe aus. Einige Entwicklungsrichtungen weisen allerdings zu High-Speed-Motoren, welche ein gestuftes Getriebe erfordern. Mehrstufige Getriebe werden häufig lediglich zweistufig ausgeführt. Der Verzicht auf die komplexe Getriebekomponente trägt generell zur Kostenreduktion und einer Wirkungsgraderhöhung des gesamten Antriebs bei. Während hybridelektrische Fahrzeuge meist eine komplexere und sehr aufwendige und teure Getriebeeinheit benötigen, weisen batterieelektrische Fahrzeuge meist einfache und damit kostengünstige Lösungen auf.

2.2.3 SONSTIGE KOMPONENTEN

2.2.3.1 NEBENAGGREGATE

In heutigen Verbrennungsmotoren werden die Nebenaggregate nahezu ausschließlich mit konstanter Übersetzung zur Kurbelwelle betrieben. Die energetische Versorgung dieser Komponente muss gewährleistet und bei einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden. Sie beträgt 20 bis 25 Prozent der mechanisch verrichteten Arbeit und damit etwa 7 Prozent der Gesamtenergie eines Fahrzeugs [vgl. u. A. Friedrich (2007)].

Es sind momentan eine Vielzahl von Nebenaggregaten zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Verbrennungsmotors (Schmierölpumpe, Kühlmittelpumpe, Kraftstoffördersystem, Kühlerventilator, mechanisches Aufladegerät) oder der Realisierung einer Abgasreinigung (Sekundärluftpumpe, Katalysatorvorheizung) notwendig. Diese werden bei batterieelektrischen Fahrzeugen nicht benötigt. Allerdings werden durch den Verbrennungsmotor auch weitere Aggregate angetrieben, auf die man in batterieelektrischen Fahrzeuge nicht verzichten kann bzw. möchte, wie beispielsweise die Lenkhilfspumpe, 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) oder Bremssystemen (elektrohydraulische Bremse, »Brems-Blending« als Kombination Rekuperation über den Generator sowie Reibbremssysteme oder elektromechanische Bremse) gefragt.

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 elektrischen Antriebsstrangs entstehen nun neue Anforderungen an die Auslegung der Nebenaggregate.

2.2.3.2 KLIMATISIERUNG

Fahrzeuge mit einer signifikanten elektrischen Antriebskomponente stellen maßgeblich aus zwei Perspektiven eine große Herausforderung für das Thermomanagement dar: Zum einen entfällt durch den Wegfall oder die Minimierung des Verbrennungsmotors eine »kostenlose« Wärmequelle und Antriebseinheit für den Klimakompressor. Zum andern schlägt sich insbesondere beim batterieelektrischen Elektrofahrzeug die für die Klimatisierung aufzuwendende Energie für den Fahrer deutlich spürbar auf die Reichweite des Fahrzeugs nieder. Wird das Klimasystem eines batterieelektrischen Automobils unter Voraussetzung einer bestimmten Größe der Batterie gemäß heutiger Verfahren betrieben, nimmt die mit dem Fahrzeug erzielbare Reichweite ab. Dieser Effekt ist, wie in Abbildung 16 dargestellt, umso größer, je höher die Leistungsaufnahme der Heiz- bzw. Kühlkomponenten ausfällt

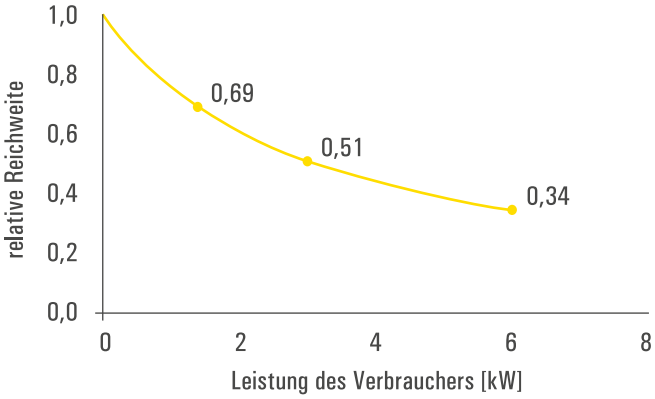


Abbildung 16: Abnahme der mit einem batterieelektrischen Fahrzeug erzielbaren Reichweite mit zunehmendem Leistungsbedarf des Klimasystems[17]

Im Winter kann die benötigte Energie zum Heizen dabei einen gravierenden Anteil des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen und entsprechend die Reichweite der Fahrzeuge verkürzen. Messungen der AMS gemäß TÜV Süd-E-Car-Cycle ergaben folgende Werte: Smart ED: 47 Prozent Reichweiten-Verlust, Mitsubishi i-MieV: -43 Prozent, Karabag Fiat 500: -20 Prozent [Bloch 2011)].

Da in batterieelektrischen Fahrzeugen kein verbrennungsmotorisches Antriebsaggregat zur Temperierung vorhanden ist, müssen sie mit zusätzlichen Heizsystemen ausgerüstet werden. Solche Heizsysteme können Luft- oder Wasser-PTC (Positive-Temperature-Coefficient) Elemente, Wärmepumpen oder Brennstoffheizer sein. Alle Heizelemente 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. Zur Installation von Luftauslässen für personennahe Gebläse eigenen sich etwa der Sicherheitsgurt, die Kopfstütze und das Seitenmodul des Sitzes oder die Türverkleidung [Klassen (2011)]. 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 [Frigge (2011)].

Zusätzlich zur Verwendung geeigneter Komponenten im Fahrzeug führt das Vorkonditionieren der Fahrzeugkabine vor Antritt einer Fahrt über die Stromversorgung aus dem Netz oder einer Ladestation auf Parkplätzen zu einem geringeren Leistungsbedarf während der Fahrt. Bei

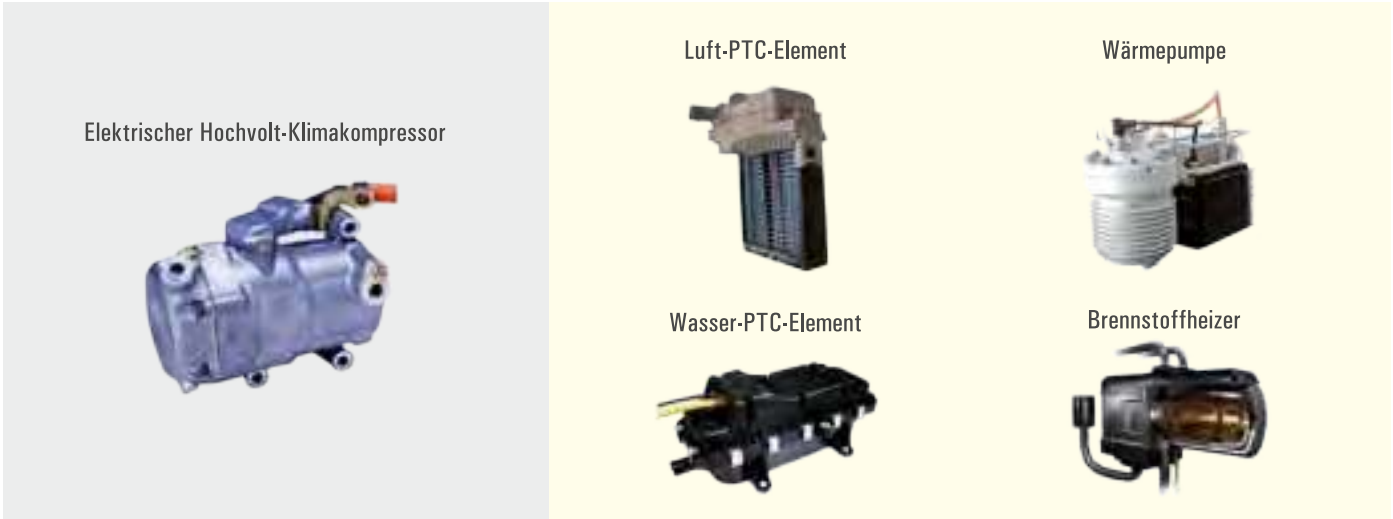


Abbildung 17: Kühl- (links) und Heizelemente (rechts) für batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Range-Extender[18]

17 Großmann (2010) I Annahme: Durchschnittlicher Antriebsenergieverbrauch von 16,7 kWh/100km im NEFZ.
18 Eigene Darstellung in Anlehnung an Frigge (2011)

der Anwendung dieser Maßnahme hat die Klimatisierung einen geringeren Einfluss auf die erzielbare Reichweite, da weniger Energie aus der Traktionsbatterie zum Heizen bzw. Kühlen des Innenraums und thermischer Speichermassen im Automobil auf die gewünschte Temperatur benötigt wird.

2.2.3.3 RANGE-EXTENDER

Spätestens durch den Opel Ampera sind sogenannte serielle Hybride (auch genannt Range-extended electric vehicles) und die dahinter stehende Technik weitläufig bekannt. Aber auch Audi, Mercedes-Benz, Fisker oder Lotus arbeiten an der Umsetzung entsprechender Konzepte. Hierbei gilt es insbesondere folgende Anforderungen zu verwirklichen:

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

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

2.2.3.4 WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLE

Wasserstoff ist aufgrund seiner hohen Energiedichte in Kombination mit einer Brennstoffzelle eine interessante Energiealternative zur Batterie. Insbesondere für Elektrofahrzeuge, die auf Langstrecken zum Einsatz kommen sollen und/oder ein besonders hohes Gewicht haben. Ein Durchbruch dieser Technologie am Markt setzt allerdings den Aufbau einer entsprechenden Wasserstoff-Infrastruktur voraus.
Seit Jahren wird intensive Forschung auf diesem Gebiet betrieben, wodurch bereits große Fortschritte erreicht werden konnten. So werden beispielsweise Prototypen im Fahrzeugbereich bereits seit Jahren am Markt getestet. Ein Großserienstart wurde aus verschiedenen Gründen bisher nicht realisiert. Dazu zählen neben technologischen Aspekten insbesondere infrastrukturelle und wirtschaftliche Gründe. Eine Vielzahl von Herstellern führt bereits Kleinserienversuche durch (Daimler, Honda, Opel etc.) und hat die Serienproduktion für 2014/15 angekündigt. Bis dahin soll der Ausbau der notwendigen Infrastruktur in Deutschland vorangetrieben werden. Industrieseitig haben sich Allianzen gebildet und das Ziel formuliert, bis 2014 zunächst die Metropolregionen mit der notwendigen Wasserstoffinfrastruktur auszustatten und dann bis 2020 deutschlandweit 1000 H_2-Tankstellen aufzubauen.

Hervorzuheben ist hierbei die Clean Energy Partnership (CEP). 15 Partner (BMW, Daimler, Ford, VW, Toyota, Linde, Shell, Statoil und weitere) erproben die Systemfähigkeit von Wasserstoff im täglichen Einsatz. Dazu zählen nicht nur der kontinuierliche Betrieb leistungsfähiger Wasserstofffahrzeuge und deren schnelle und sichere Betankung. Die CEP kümmert sich ebenso um die saubere und nachhaltige Erzeugung von Wasserstoff, um den Wasserstofftransport und die Speicherung von H_2 im flüssigen und im gasförmigen Zustand. Hervorgegangen aus der »Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie« (VES) wurde die CEP im Dezember 2002 als Industriekonsortium mit Unterstützung von Politik und Industrie unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums etabliert [Cleanenergypartnership (2011)].

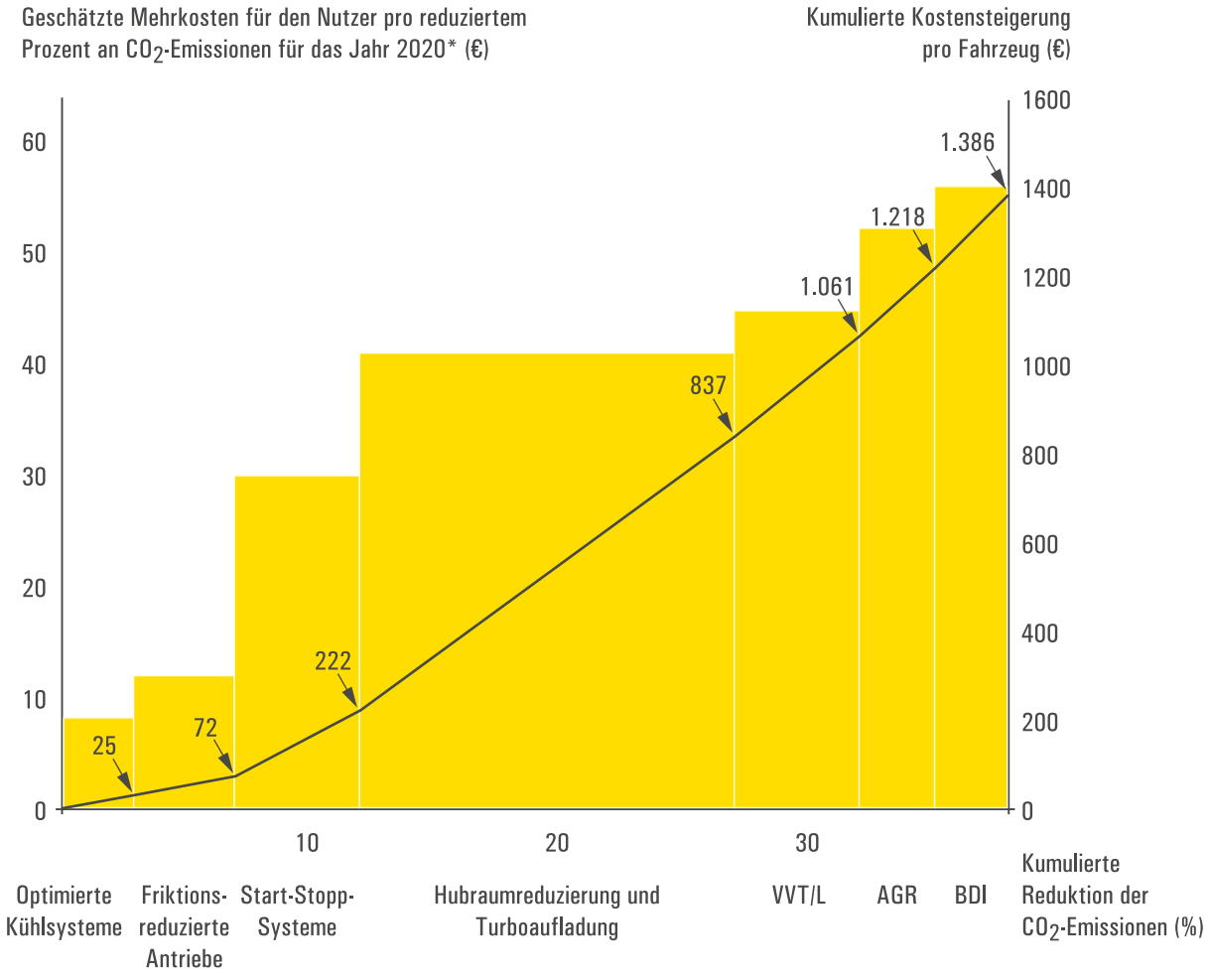
Baden-Württemberg kann dabei – gestützt durch seine traditionell starke Wasserstoff- und Brennstoffzellenbranche – eine Vorreiterrolle einnehmen. Hier werden bereits bis Anfang 2012 landesweit fünf H_2-Tankstellen in Betrieb sein, die zum Teil durch Landesgelder gefördert werden.

2.2.3.5 OPTIMIERUNG VERBRENNUNGSMOTOR

Weitgehend einhellig wird unter Experten der Verbrennungsmotor als die dominierende Technologie für die nächste(n) Dekade(n) gesehen. Er findet sowohl in klassischen Verbrennungsfahrzeugen als auch in Hybriden Einsatz. Es wird davon ausgegangen, dass weiterhin viel Geld und Entwicklungsaufwand in diese Technologie investiert wird. Entwicklungen in diesem Bereich zielen momentan insbesondere auf eine CO_2-Emissionsoptimierung und Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Es wird von Einsparpotenzialen in Höhe von bis zu über 30 Prozent ausgegangen [vgl. u. A. McKinsey (2011b); BCG (2011)]. Maßnahmen und

Ansätze zum Heben dieses Potenzials finden sich in unterschiedlichen Bereichen. Die Komplexität der Verbrennungssysteme und auch die Kosten für die Module werden durch diese Optimierungsmaßnahmen allerdings auch steigen. Den Einfluss einer Effizienztechnologie sowohl auf die CO_2-Reduktion als auch auf die damit anfallenden Kosten vermittelt Abbildung 18.

Allein durch Verbesserung der Verbrennungsmotoren können Emissionen um etwa 40 Prozent gesenkt werden



Abgestufte durchschnittliche Kosten pro reduziertem Prozent an CO_2-Emissionen	0% – 10% 17 €	10% – 20% 33 €	20% – 30% 43 €	30% – 40% 52 €

Abbildung 18: Potenziale zur Verbrauchsreduktion (kumulierte Kosten über der kumulierten CO_2-Einsparung)[19]

19 Eigene Darstellung in Anlehnung an BCG (2011) I Anmerkung: VVT/L = Variable Steuerung der Einspritzsequenzen und des Ventilhubs I AGR = Abgasrückführung I BDI = Benzindirekteinspritzung I *Der geschätzte Nettobasispreis 2020 beinhaltet eine einprozentige Reduktion der Herstellkosten zwischen 2010 und 2020 und einen Preisaufschlag der Hersteller zwischen 50 und 100 Prozent. Die Schätzung bezieht sich auf nordamerikanische Fahrzeuge des D-Segments. Die Betrachtung von Fahrzeugen anderer Segmente wird vermutlich geringe Abweichungen aufweisen.

Die technologischen Entwicklungslinien des Verbrennungsmotors lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Downsizing mit teilweise mehrfacher Aufladung über Turbolader oder mechanischen Lader (Kompressor)
- Downsizing über Reduktion der Zylinderanzahl
- Benzindirekteinspritzung
- Reduzierung der Motorreibung
- Variabler Ventiltrieb (VVTL: Variable Valve Timing and Lift)
- Zylinderdeaktivierung
- Start-Stopp-System
- Sonstige Verfahren: Combined Combustion (Diesotto), HCCI, CAI
- Sonstige CO_2-Optimierungen: Elektronik, Abgasrückführung, optimierter Kühlkreislauf

Der Verbrennungsmotor wird in den kommenden Jahren verstärkt Einsatz als Range-Extender finden. Für diesen speziellen Anwendungsfall gilt es für die Konstrukteure und Forscher, Motoren zu entwickeln, die trotz langer Laufpausen und kurzfristig hoher Belastung zuverlässig arbeiten.

2.3 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE PRODUKTION

SYSTEMKOMPONENTEN

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt wie bereits ausgeführt zu einer Vielzahl von neuen Antriebskonzepten und Fahrzeugmodellen und hat damit einen unmittelbaren Einfluss auf die Komplexität und Vielfalt der Varianten sowie Anzahl und Art neuer oder nicht mehr benötigter Komponenten.
Neue Komponenten wie Batteriesystem, elektrische Maschine, Leistungselektronik und Ladegerät führen zu erweiterten Umsatzpotenzialen für die Unternehmen, wenn die erforderlichen Kompetenzen und Produktionskapazitäten im Haus aufgebaut werden können. Zu Beginn der aktuellen Entwicklung der elektrischen Antriebsstränge hatte die Automobilindustrie allerdings weder den technologischen Erfahrungshintergrund noch die Produktionskapazität, um kurzfristig Elektromotoren und Batteriesysteme für ihren Bedarf selbst zu produzieren [Roland Berger (2011b)]. Eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst die Fertigung dieser Systemkomponenten:

- Stückzahlvariabilität: Die Diffusion der Elektrofahrzeuge steht noch am Anfang und ermöglicht nur eine sehr geringe Stückzahl. Allerdings erfolgt nach einem (erwarteten) langsamen Anlauf die Notwendigkeit einer hohen Skalierbarkeit der Produktion, um die hohen Stückzahlen im Automobilbau abzudecken.
- Technologische Reife: Die beschriebenen Systemkomponenten stehen noch am Beginn ihrer automobilen Entwicklung und weisen folglich hohe Weiterentwicklungsmöglichkeiten auf. Die sehr kurzen Innovationszyklen müssen von den produzierenden Unternehmen bei der Investition in Anlagetechnologien mit einbezogen werden.
- Anlagen, Prozesse, Kompetenzen: Sie unterscheiden sich stark von den Anforderungen, die bisher im Automobilbau vorherrschend waren, entsprechend sind zeitliche und finanzielle Ressourcen für den Anlauf einer Produktion notwendig.

Dabei können die Produktionstechnik und der Aufbau wichtiger Produktionskompetenz einen wesentlichen Betrag dazu leisten, zukünftig die Herstellkosten bei den Komponenten zu senken und somit zu einer erforderlichen Reduktion der Herstellkosten am Gesamtfahrzeug beitragen. Wettbewerbsfähige Preise wiederum bilden die Grundlage für den Aufbau eines signifikanten Marktes (siehe hierzu Kapitel 3.4).

PRODUKTIONSSTANDORTE

Basierend auf den bisher verkauften niedrigen Stückzahlen (rein-)elektrischer Antriebe bestehen auch im Jahr 2011 nur geringe aufgebaute Produktionskapazitäten an den weltweiten Standorten der Automobil- und Zulieferindustrie. Aktuell findet sich eine starke Fokussierung von Anlagen für automobile Systemkomponenten mit hohen Kapazitäten vor allem im asiatischen Raum – beispielhaft seien hier die Länder Japan und Korea, aber auch China für den Bereich der Batteriezellfertigung genannt [Roland Berger (2010)].
Es kann allerdings von einem verstärken Aufbau von Produktionskapazitäten in Europa und vor allem den USA ausgegangen werden – dies zeigen bereits die Entwicklungen der letzten Jahre. Beispielsweise wurde ein Großteil der Fördergelder des American Recovery Act für den Aufbau von Produktionskapazitäten der Systemkomponenten (insbesondere Batterien, aber auch Elektromotoren und Leistungselektronik) vorgehalten [vgl. Roland Berger (2010)]. Im Jahr 2015 sollen im Bereich Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien deutliche Überkapazitäten in der Produktion vorherrschen [Roland Berger (2011a)].
Generell ist davon auszugehen, dass die Produktionskapazitäten für die Systemkomponenten nahe am Absatzmarkt bleiben. Das heißt in dem Land, in welchem die Elektromobilität (durch staatliche Förde-

Abbildung 19: Aspekte bei der Auswahl eines Fertigungsstandortes für Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs[20]

20 Eigene Darstellung in Anlehnung an Roland Berger (2011b)

rung oder Reglementierung, aber auch Kundenbedürfnisse) eine hohe Nachfrage erfährt, wird die Produktionskapazität hochgefahren werden. Entsprechend müssen sich auch Zulieferer regional positionieren. Dies setzt für die produzierenden Unternehmen nicht nur ein gutes Verständnis über die technologischen Anforderungen ihrer Kunden (weitere Zulieferer oder auch OEM) vor Ort voraus, sondern auch über die Art der Zusammenarbeit und Regeln im Umgang mit den jeweiligen Geschäftspartnern.

Für eine endgültige Entscheidung bezüglich der Produktionsstandorte müssen in Zukunft, wie in Abbildung 19 dargestellt, mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Neben qualifizierten Arbeitskräften spielen Faktoren wie Ressourcennähe und Transportwege, aber auch der möglicherweise recht hohe Automatisierungsgrad und damit einhergehend zunehmend wegfallende Lohnkostenvorteile einer Herstellung in Niedriglohnländern eine Rolle [Roland Berger (2011b)].

PRODUKTIONSTECHNOLOGIE UND KOMPETENZEN

Die Produktionstechnologie der neu benötigten Systemkomponenten unterscheidet sich in vielfacher Hinsicht bezüglich der Anforderungen, die bisher im Automobilbau vorherrschend waren. Entsprechend sind Firmen, welche aktuell einen hohen Stellenwert in der Automobilindustrie besitzen, nicht automatisch in diesem Bereich gesetzt. Es ergeben sich gänzlich neue Technologiefelder, welche bisher nicht im Kompetenzfokus der automobilen Unternehmen gestanden sind, wie beispielsweise Beschichtungsverfahren für Elektrodenherstellung. In diesen Bereichen ergibt sich die Möglichkeit für neue Firmen aus anderen Industriebereichen, in die automobile Welt vorzustoßen.

»Ich bin überzeugt, dass technologische Weiterentwicklungen am Produkt nur zu einem wirtschaftlichen Erfolg führen, wenn die Produktionstechnologie parallel dazu aufgebaut wird.«

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Institutsleitung wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hierbei kann ein Vorsprung durch Produktionskompetenz in einem automobilfremden Bereich das Potenzial bergen, in die automobile Welt übertragen werden zu können. Ein Beispiel hierfür könnte der Elektromotor sein, und eine Vielzahl deutscher Produzenten könnte von ihrer langjährigen Erfahrung in diesem Bereich profitieren. Selbstverständlich müssen hier Produktionstechnologien hinsichtlich der automobilen Anforderungen angepasst werden, welche sich bezüglich Kosten, Bauraumgröße sowie (Ausfall-)Sicherheit deutlich von den bisherigen Anforderungen in anderen Industriebereichen unterscheiden.

Des Weiteren ergibt sich eine Verschiebung der Gewichtung bisheriger Produktionstechnologien. Wenn beispielsweise die Produktionstechnologien eines OEM für den Verbrennungsmotor aktuell im Bereich Metallbearbeitung liegen, ist davon auszugehen, dass durch den Wandel zum Elektromotor die Montagetätigkeiten bei ihm überwiegen werden [Franke (2011b)]. Während die Fertigungszeiten der Produktionsschritte Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen eines Hybridantriebs noch um 1 bis 26 Prozent (ausgehend von einem konventionellen Verbrennungsantrieb) steigen, erfolgt durch den reinen Elektroantrieb eine Reduktion zwischen 47 und 78 Prozent [Abele (2009)].

Das Forschungsvorhaben ELAB »Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung« (vgl. www.elab.iao.fraunhofer.de) untersucht diese Veränderungen durch die Elektrifizierung in einer umfassenden Analyse der sich ändernden Prozesse, Produktionstechnologien, Kompetenzen und Ressourcen. Im Rahmen der Forschungsarbeit ist die zentrale Fragestellung zu beantworten, welche Beschäftigungswirkungen in qualitativer wie quantitativer Hinsicht aus dem Trend zu alternativen Antriebskonzepten in einer idealtypischen Automotive-Antriebsstrangproduktion resultieren. Das von der Hans-Böckler-Stiftung sowie IG-Metall BW und der Daimler AG geförderte Projekt wird von dem Fraunhofer IAO in Zusammenarbeit mit dem DLR und IMU-Institut bearbeitet. Die Ergebnisse werden im Frühjahr 2012 veröffentlicht.

Erweitert wird der Trend zur Elektronik/Elektrik durch eine erhöhte Substitution mechanischer durch elektrische Komponenten sowie eine generelle Verringerung der Bauteileanzahl (beispielsweise Ersatz des Verbrennungsmotors und des Getriebes mit etwa 1.400 Teilen durch einen Elektromotor und Getriebe mit etwa 200 Teilen [Bain (2010a)]. Unklar ist bislang, wie sich die Positionierung der OEMs und Zulieferer gestalten wird und welche Aufgabenschwerpunkte und damit unterschiedliche Produktionstechnologien bei den jeweiligen Unternehmen aufgebaut werden müssen.

POSITIONIERUNG DER PRODUZIERENDEN UNTERNEHMEN

Insgesamt muss, wie beschrieben, von einer weitreichenden Verschiebung und neu benötigten Produktionskompetenzen und -technologien ausgegangen werden. Die Folge ist eine Reorganisation der Wertschöpfungskette und entsprechend eine Neuausrichtung der beteiligten Unternehmen bezüglich ihrer Strategie, Kompetenzen, Technologien und Ressourcen. Dies gilt sowohl für bisherige Zulieferer und OEM, insbesondere aber auch für neue Unternehmen der Zulieferindustrie bis hin zum Anlagenbauer.

»Etablierte Automobilzulieferer verfolgen Diversifizierungsstrategien und bilden Joint Ventures zur Herstellung von sowohl mechanischen als auch elektrischen Antriebskomponenten, um Risiken zu minimieren und in allen Marktbereichen gleichermaßen zu partizipieren.«

Martin Kreuter, Corporate Development, New Business – Industry Innovation, Bayer MaterialScience

Inwieweit von einer gravierenden Verschiebung der Wertschöpfungsanteile zwischen OEM und Zulieferer ausgegangen werden kann, wird sicherlich stark von der strategischen Ausrichtung der Unternehmen abhängen. Aktuell zeigen die OEM hinsichtlich der für sie als Kernkompetenz definierten Komponenten ein sehr unterschiedliches Bild, welches sich am Beispiel des Elektromotors verdeutlichen lässt: VW setzt hier auf eine eigene Fertigung, während Daimler ein Joint Venture mit Bosch gegründet hat und Ford komplett auf Zulieferer setzt [Roland Berger (2011b)]. Allerdings muss die praktische Umsetzung einer Vielzahl an Kooperationsvereinbarungen innerhalb eines Unternehmens erst noch bewiesen werden. Neben der Gründung der Firmen Li-Tec und Dt. Accumotive kündigte Daimler in den letzten Jahren (nur im Bereich Batteriezelle und Batteriesystem) auch die Zusammenarbeit mit folgenden weiteren Firmen an: Continental, JohnsonControl Saft, Hitachi, Cobasys und BYD. Auch Volkswagen steht der Vielschichtigkeit kaum nach durch Kooperationen mit Sanyo, Toshiba, BYD, Varta Microbatteries sowie Bosch (ebenfalls nur Batterie).

Eine mögliche Strategie für eine starke und unabhängige Positionierung eines OEMs sowie Kooperation mit Partnerunternehmen und Zulieferern wäre möglicherweise:

- Kurzfristig: Aufbau eines Joint Ventures mit einem etablierten Partner (auch außerhalb der Automobilindustrie), welcher langjährige Erfahrung und hohes Know-how in der benötigten Kernkomponente besitzt und ebenfalls Produktionskapazität einbringen kann
- Mittelfristig: Aufbau eigener »Inhouse«-Kompetenz, um unabhängig von externen Unternehmen zu bleiben sowie Aufbau eigener Produktionslinien, um kostenoptimiert und ausgelastet bei höheren Stückzahlen selbst zu produzieren
- Langfristig: Ausgliederung der Komponenten oder Subkomponenten, welche sich zum Commodity entwickelt haben und keine Differenzierung zum Wettbewerb mehr ermöglichen, um eigene Kosten zu reduzieren sowie Wettbewerb zwischen zuliefernden Firmen auszunutzen

2.4 HEUTIGE MÄRKTE UND MARKTSZENARIOS

2.4.1 SZENARIOS DER MARKTENTWICKLUNG

Im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität wurde als Ziel definiert, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutsche Straßen zu bringen [Bundesregierung (2009)]. Dieses Ziel gilt für den Bestand an Fahrzeugen und ist daher besonders im Hinblick auf die zukünftig notwendige Ladeinfrastruktur relevant. Der Entwicklungsplan betrachtet rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV), einschließlich Range-Extender (REEV), die hauptsächlich als PKW, jedoch auch als Nutzfahrzeuge zum Einsatz kommen [Bundesregierung (2009)] (siehe Abbildung 20).
Im zweiten Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, veröffentlicht im Mai 2011, wurden für die Erreichung dieses Ziels mehrere Anreizmaßnahmen vorgestellt. Werden derartige Maßnahmen nicht realisiert, gehen die Analysen der NPE lediglich von 450.000 Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 aus [NPE (2011a)].

Um eine Marktentwicklung abzuschätzen, wurde eine Metastudie durchgeführt, welche die Ergebnisse vorhandener Studien analysiert und aggregiert. 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. Im Vergleich zur Situation von 2009 unterscheiden sich die Marktszenarios grundsätzlich in der erwarteten dynamischen Entwicklung des Automobilmarktes. Dies ist größtenteils den sehr guten volkswirtschaftlichen Fundamentaldaten wie weltweitem Wirtschaftswachstum und weltweiter Beschäftigung zum Zeit-

Ziel: 1 Million Elektrofahrzeuge bis 2020 [in Tsd.]

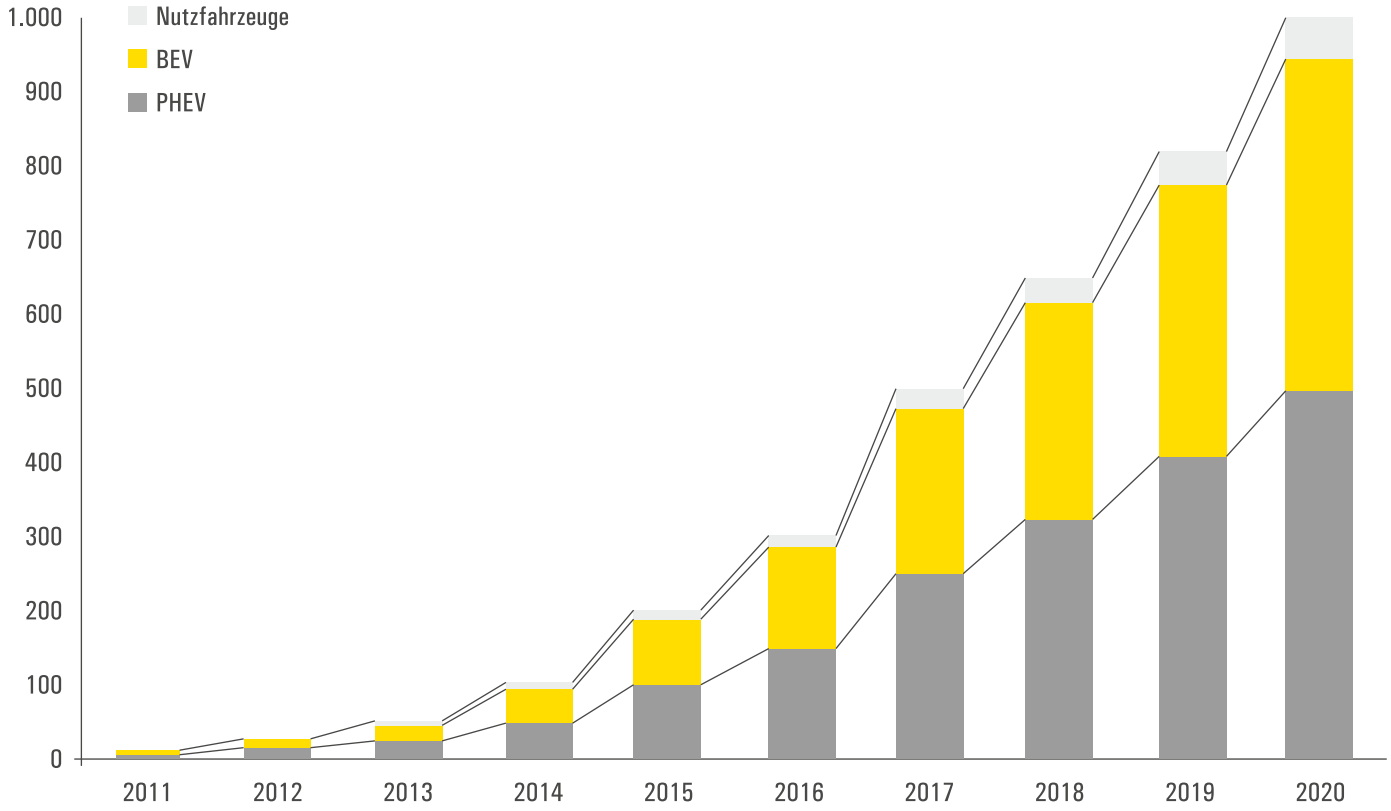


Abbildung 20: Markthochlaufkurve der NPE[21]

21 NPE (2011a)

punkt der Erstellung dieser Studie geschuldet.
Je nach untersuchter Studie hängt die Entwicklung des Automobilmarktes (bzw. die Szenarioentwicklung über die Diffusion alternativer Antriebskonzepte) von unterschiedlichen Faktoren ab.

Der Ölpreis spielt in den Studien von der Boston Consulting Group [BCG (2011)] und bei Bain [Bain (2010b)] eine große Rolle. So ist der Preis pro Barrel bei der Boston Consulting Group der Hauptentscheidungsfaktor, was die Entwicklung der Elektromobilität angeht. Bemerkt werden sollte hier, dass die Ölpreisentwicklung nicht proportional zum Benzinpreis (bzw. Dieselpreis) verläuft [Welt online (2011)].

Die CO_2-Grenzwerte werden in den Studien von McKinsey [McKinsey (2011c)] und Bain [Bain (2010b)] als Einflussfaktor behandelt. Es wird auf eine hohe regulatorische Dynamik hingewiesen. In der EU wird für Neuwagen eine Emissionsreduktion auf durchschnittlich 95 Gramm pro Kilometer bis zum Jahr 2020 gefordert [AISBL (2011)]. China hat sich selbst hehre Ziele gesteckt [Chinese Embassy (2010)], wenngleich diese nicht international bindend sind. So sollen die CO_2-Emissionen, gemessen am Wirtschaftswachstum, bis 2020 im Vergleich zu 2005 um 40–45 Prozent reduziert werden [Reuters (2011)]. In den USA wurde das Ziel definiert, die Treibhausgase bis zum Jahr 2050 um 83 Prozent zu reduzieren [EERE (2009)]. Nach Einschätzung von Roland Berger sind insbesondere die Reduktionsziele der EU so strikt, dass die Optimierung der Verbrennertechnik nicht ausreichen wird, um diese zu erfüllen [Roland Berger (2009)]. Dies birgt weiteres Potenzial für alternative Antriebstechnologien.

Auch die Subventions- und Förderpolitik spielt in den Studien von Bain [Bain (2010b)] und PRTM [(PRTM (2011)] eine erhebliche Rolle. Für eine umfassende Diskussion wird auf das Kapitel zur internationalen Fördersituation verwiesen.

Weiterhin muss die Kostenentwicklung zentraler Komponenten, insbesondere der Batterie, in die Szenarioentwicklung eingehen. Dies wurde an zentraler Stelle von PRTM [PRTM (2011)] und der Internationalen Energieagentur [IEA (2011)] berücksichtigt.
Hervorgehoben werden in den untersuchten Studien mehrfach die Schwellenländerländer wie China, Indien und Brasilien. Diese zeichnen sich durch hohes Wachstum aus und haben großes Marktentwicklungspotenzial.

Die von der chinesischen Regierung forcierten Pläne, den heimischen Markt zu einem der führenden für Elektrofahrzeuge zu machen, spiegeln sich in umfassenden Subventionen und Anreizen für Verbraucher wider. Überdies wurden chinesische Unternehmen zu einer Allianz über die gesamte Wertschöpfungskette geformt und dem gemeinsamen (Regierungs-) Ziel untergeordnet [GTAI (2011)].
Für Indien wird erwartet, dass der Subkontinent bis 2020 zum drittgrößten Automobilmarkt aufsteigt. Auf dem indischen Markt wird vor allem die Dominanz kleinerer PKW erwartet [JD Power (2011)].
Brasilien hat Deutschland in Bezug auf die Größe des Automobilmarktes im Jahr 2010 überholt. Für das südamerikanische Land wird in den nächsten Jahren mit hohen Zuwachsraten gerechnet, da bisher nur einer von sieben Einwohnern einen PKW besitzt. Überdies haben alternative Antriebstechnologien in Brasilien seit der Ölkrise 1973 eine besondere Bedeutung, wobei der Fokus aber eher auf Ethanol-Kraftstoffen als auf PKW mit Elektrokomponenten liegt.

Welchem Wandel die Prognosen über die Nutzung von Fahrzeugen mit elektrischer Antriebskomponente unterworfen sind, zeigt die Varianz in den Einschätzungen unterschiedlicher Beratungshäuser. Auch können technologische Durchbrüche schwer antizipiert werden. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Metastudie spiegeln dennoch deutlich den Wandel des Automobilmarktes hin zur Elektromobilität wider.

Insgesamt wird in der Metastudie eine weltweite Steigerung der PKW-Verkäufe von 2010 mit ca. 60 Millionen auf ca. 87 Millionen in 2020 erwartet. Dies entspräche einem jährlichen Wachstum von rund 3,7 Prozent.

Stark überproportional wachsen die Anteile der Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten. Während 2010 lediglich Hybridfahrzeuge nennenswerte Verkaufszahlen aufwiesen (ca. 1,2 Mio.), werden für 2020 folgende Verkaufszahlen erwartet:

- REEV[22]: 4,2 Mio. Einheiten
- BEV: 4,6 Mio. Einheiten
- PHEV: 4,9 Mio. Einheiten
- HEV: 14,6 Mio. Einheiten

Relativ betrachtet geht die Metastudie davon aus, dass der Anteil der PKW mit reinem Verbrennungsmotor von derzeit ca. 98 Prozent auf ca. 67 Prozent fallen wird (siehe Abbildung 21).

22 Die Zahlen von REEV und PHEV wurden in den betrachteten Studien meist anderen Fahrzeugklassen zugeschlagen und erst bei der Metastudienerstellung getrennt.

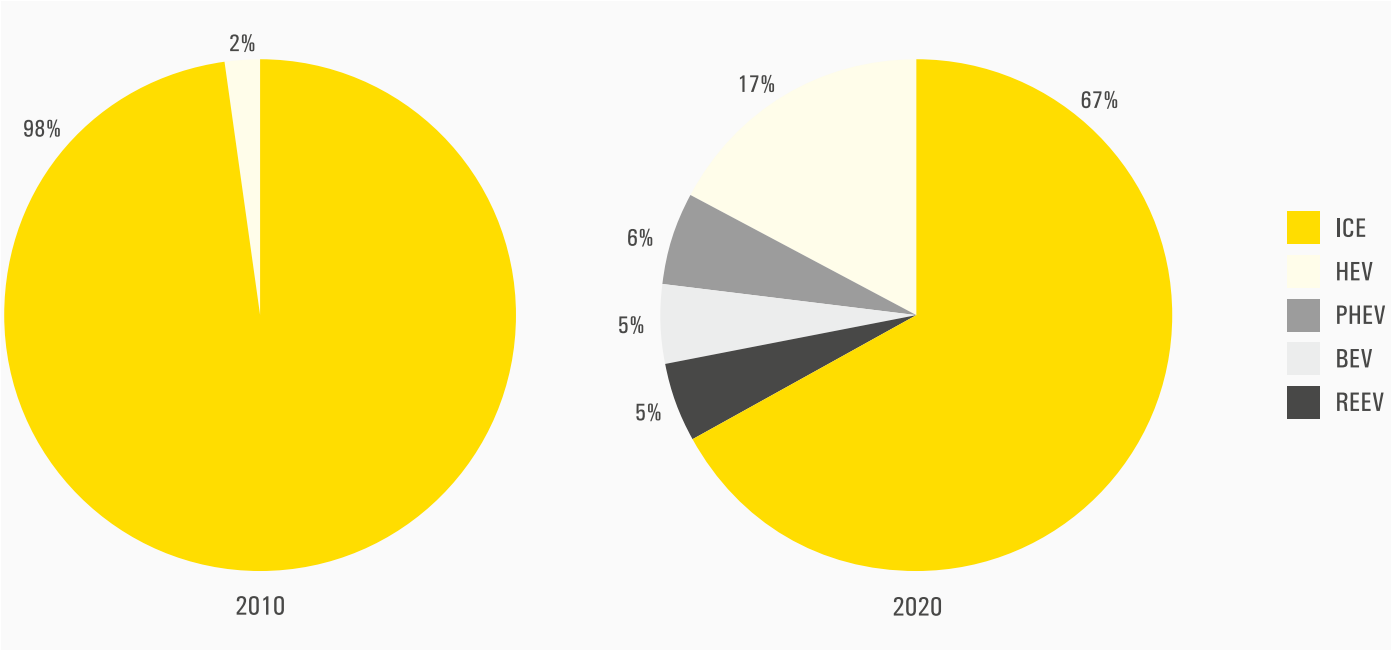


Abbildung 21: Ergebnisse der Metastudie »Marktentwicklung Antriebskonzepte«[23]

Auch nach 2020 hat die Bundesregierung Ziele für die Verbreitung von Elektromobilität in Deutschland definiert: bis zum Jahr 2030 sollen sechs 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 Prozent gegenüber 1990 vorsieht [Bundesregierung (2010)]. Die Europäische Union geht noch weiter und möchte eine Emissionsreduktion von bis zu 95 Prozent bis 2050 erreichen [Europäische Kommission (2011)]. Bleiben die staatlichen Umweltschutzziele in Deutschland und der Welt bestehen, ist in jedem Falle auch weiterhin mit einem deutlichen Anstieg des Marktanteils alternativer Antriebstechnologien zu rechnen.

2.4.2 LEBENSZYKLUSKOSTEN-BETRACHTUNG

Die Marktdurchdringung elektromobiler Antriebskonzepte hängt stark von deren Wirtschaftlichkeit für Produzenten und Betreiber ab. Gegenüber herkömmlichen verbrennungsmotorbasierten Fahrzeugen verursachen Elektrofahrzeuge in der Herstellung signifikante Mehrkosten. Der Grund dafür liegt vor allem in den hohen Kosten für Batterien. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine genaue Abschätzung über die Entwicklung dieser zusätzlichen Herstellkosten nur bedingt möglich. Durch steigende Produktionsvolumina oder weitere Durchbrüche in der Batterietechnologie könnten diese Zusatzkosten laut Einschätzung der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) zukünftig drastisch gesenkt werden [NPE (2011a)].
Auch für das Jahr 2020 rechnet die NPE jedoch noch mit erheblich höheren Anschaffungspreisen für Elektrofahrzeuge als für konventionelle Fahrzeuge [NPE (2011a)]. Aufgrund der unterschiedlichen Kostenstruktur konventioneller und elektrischer Fahrzeuge wird es für einen Durchbruch der Elektromobilität entscheidend sein, Nutzer für die Gesamtkosten unterschiedlicher Antriebstechnologien über den gesamten Lebenszyklus zu sensibilisieren. Während Fuhrparkbetreiber bereits heute Entscheidungen auf Grundlage von Gesamtkostenrechnungen treffen, ist beim Privatnutzer häufig noch der Anschaffungspreis das wichtigste Kriterium für die Kaufentscheidung.

Unter die sogenannten Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost = LCC) oder auch Total Cost of Ownership (TCO) fallen nicht nur der eigentliche Kaufpreis, sondern auch sämtliche Betriebskosten wie

23 Eigene Darstellung I McKinsey (2011c) I BCG (2011) I Bain (2010) I IEA (2011) I JD Power (2010) I Scotiabank (2011) I PRTM (2011) I Eigene Berechnungen

beispielsweise Kosten für Treibstoff, Strom, Steuern, Versicherung und Wartung. Die Hauptunterschiede in den Lebenszykluskosten konventioneller und batterieelektrischer Fahrzeuge sind in Abbildung 22 dargestellt.

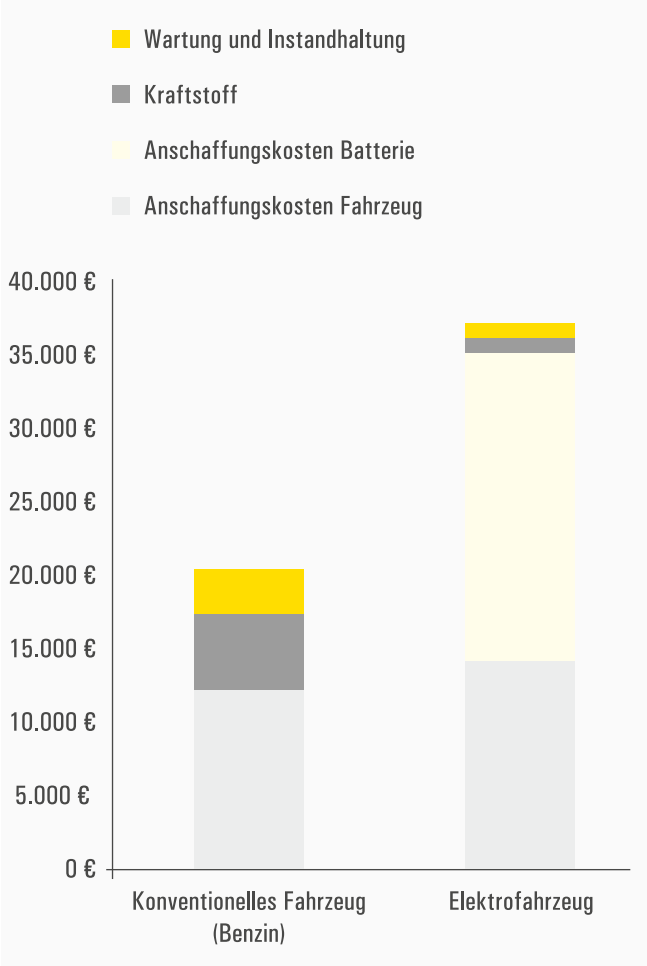


Abbildung 22: Verteilung der Lebenszykluskosten (Hauptkostentreiber) von konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen für eine Nutzungsdauer von 5 Jahren[24]

Konventionelle und batterieelektrische Fahrzeuge verfügen demnach über eine völlig unterschiedliche Kostenstruktur, die sich maßgeblich in den hohen Differenzen zwischen den Anschaffungskosten (Elektrofahrzeug deutlich teurer als konventionelles Fahrzeug) und den Betriebskosten (Elektrofahrzeug deutlich günstiger als konventionelles Fahrzeug) begründen.

In Abbildung 23 wird erkennbar, dass batterieelektrische Fahrzeuge erst bei einem Ölpreis ab ca.130 US-$ pro Barrel für den Kunden attraktiver werden als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (bei einem angenommenen Batteriepreis von 500 US-$ pro kWh; Fahrleistung: 14.500 km).

Eine Möglichkeit, die Kostenstruktur von Elektrofahrzeugen der für den Nutzer gewohnten Kostenstruktur herkömmlicher Fahrzeuge anzupassen ist die Entwicklung von Batterieleasing-Modellen. Dabei wird die teure Komponente Batterie aus den Anschaffungskosten eines Fahrzeugs herausgenommen und über eine monatliche Leasingrate finanziert. Renault bietet dieses Finanzierungsmodell beispielsweise für das Elektrofahrzeug Fluence Z.E. an, welches seit September 2011 auf den Markt ist. Abbildung 24 zeigt, dass bei konservativen Annahmen für Energie- und Benzinkosten das Elektrofahrzeug zwar noch teurer als der herkömmlich angetriebene Fluence Dynamique ist, sich durch das Batterieleasing Anschaffungs- und Betriebskosten beider Antriebskonzepte aber ähnlich verhalten.

Ob innovative Finanzierungsmodelle wie das Batterieleasing die Akzeptanz und Kaufbereitschaft der Nutzer steigern, wird sich bei der Markteinführung erster Serienmodelle in den nächsten Jahren zeigen. Ein groß angelegter Flottenversuch mit unterschiedlichen Elektrofahrzeugen in der 90er-Jahren im Schweizer Mendrisio verdeutlicht, dass innovative Vertriebsmodelle erfolgsentscheidend sein können. Nach Einführung des Batterieleasings wurden dort deutlich mehr Fahrzeuge abgesetzt als durch den klassischen Verkauf zuvor [Piffaretti (2011)]. Als einer der ersten deutschen Hersteller kündigte Smart an, den Electric Drive ab 2012 in einer Kombination aus Fahrzeugkauf und Batterieleasing anzubieten [Automobilwoche (2011)].

Aufgrund der Kostenvorteile von Elektrofahrzeugen in den Betriebskosten werden sich diese finanziell zuerst dort rechnen, wo eine hohe Fahrzeugauslastung gegeben ist. Eine erste nennenswerte Durchdringung von Elektrofahrzeugen, die über die Privatkäufe der Early Adopters hinausgeht, ist daher zunächst in Fahrzeugflotten zu erwarten. Dies könnten Carsharing- und Firmenflotten, aber auch Lieferfahrzeuge, Taxis und kommunale Fahrzeugflotten sein.

»Zentral für die Durchsetzung von Elektroautos sind deren TCO relativ zu den Verbrennern. Andere Faktoren wie der Ölpreis gehen über die relativen TCO in die Kaufüberlegungen ein.«

Marco Piffaretti, Managing Director, Protoscar SA

24 Eigene Darstellung I Annahme: Batteriegröße 16 kWh, Laufleistung: 10.000 km/Jahr

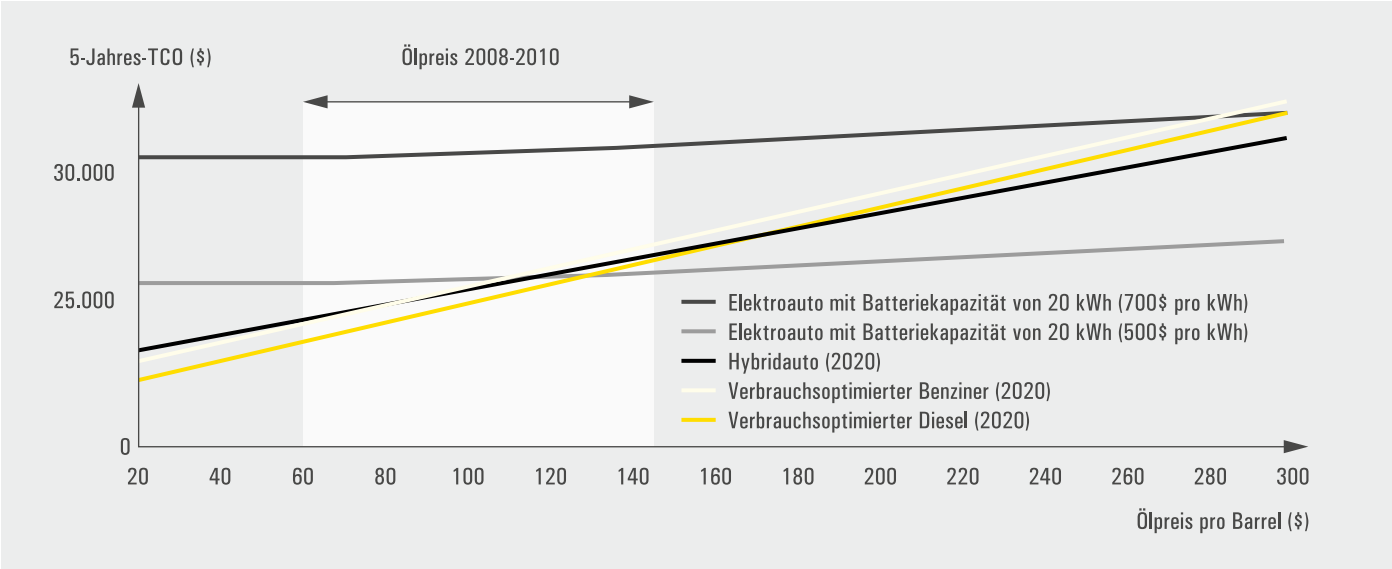


Abbildung 23: 5-Jahres-TCO für 5 verschiedene Fahrzeuge (gekauft in 2020 und in Deutschland 14.500 km pro Jahr gefahren)[25]

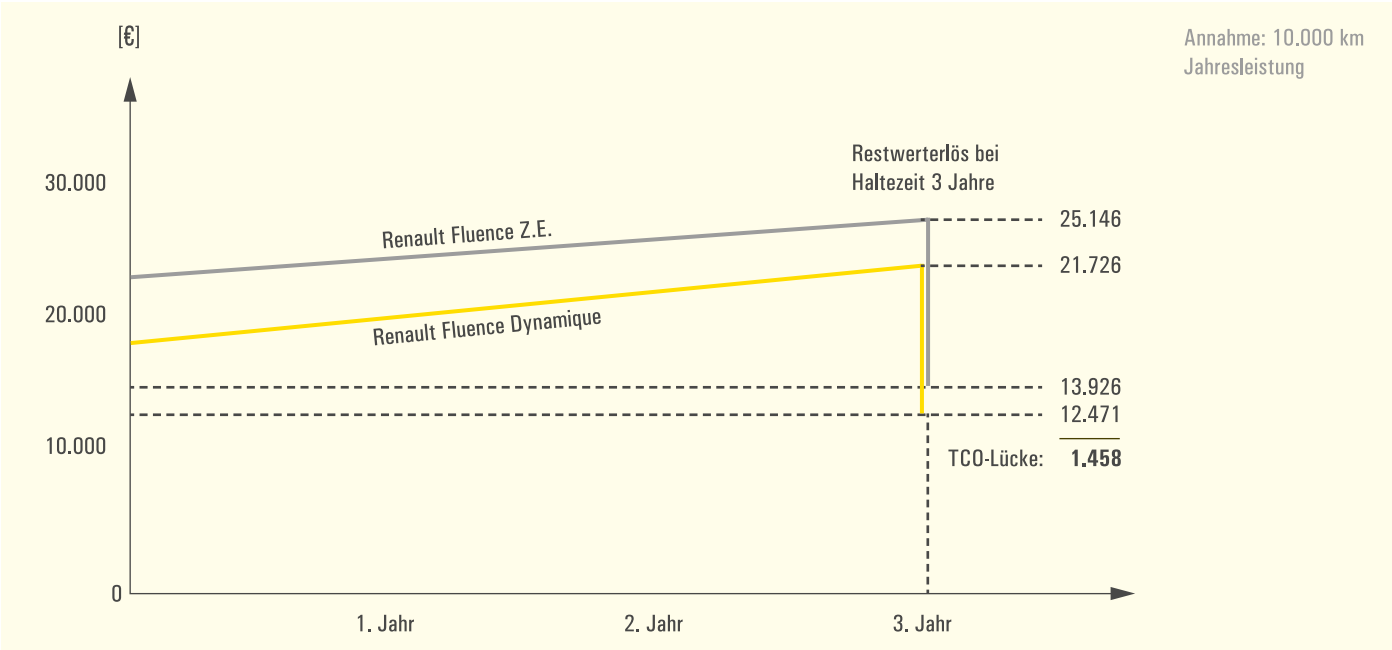


Abbildung 24: Kostenvergleich Renault Fluence Z.E. (batterieelektrisch) und Renault Fluence Dynamique (Ottomotor)[26]

25 BCG (2009) I Annahmen: gefahrene Strecke pro Jahr: 14.500 km und keine Änderungen im Besteuerungsmodell. Die Kalkulation enthält eine Analyse des Wertverlusts des Fahrzeugs, der Benzinkosten, des Stromverbrauchs, der Batteriekosten, Mehrwertsteuern und CO_2-basierten Steuern; Versicherungs- und Wartungskosten wurden nicht beachtet.
26 Eigene Darstellung vgl. Herstellerangaben Renault; Nettopreise; Annahmen: Benzinkosten 1,35 €/l, Stromkosten 17 ct/kWh, Fahrleistung 10.000 km/Jahr

2.4.3 KONVERGENZ DER BRANCHEN

Den größten Herausforderungen im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs sieht sich die Automobilindustrie ausgesetzt. Die Entwicklung neuer Komponenten und Systeme, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, wird letztlich in völlig neuartigen Fahrzeugkonzepten münden. Für die Automobilindustrie bedeutet diese Entwicklung, wenn auch deren zeitlicher Verlauf noch von Unsicherheit behaftet ist, den wohl größten Wandel seit ihrer Entstehung durch die Entwicklung des Verbrennungsmotors.

Doch auch außerhalb der klassischen Automobil- und Zulieferindustrie hat die Entwicklung der Elektromobilität bereits begonnen. Elektromobilität als branchenübergreifende Entwicklung wird daher nicht nur Einfluss auf die Technologieentwicklungen einzelner Industriezweige haben, sondern wird und muss für die Entwicklung erfolgreicher Lösungen zu einer Konvergenz der Branchen führen.

ENERGIE

Elektrofahrzeuge müssen batterie- und netzverträglich geladen werden und werden somit zu einem Thema für die Energiebranche. Ladestationen im privaten, öffentlichen und semi-öffentlichen Bereich verbinden Fahrzeug und Stromnetz und bilden damit das Tankstellennetz der Zukunft. Elektrofahrzeuge unterscheiden sich maßgeblich von herkömmlichen Verbrauchern im Stromnetz, da sie, anders als Haushaltsgeräte oder industrielle Verbraucher, mobile Lasten darstellen und so zu unterschiedlichen Zeiten an unterschiedlichen Orten geladen werden. Die durch die Bundesregierung für das Jahr 2020 geforderte eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen würde Studien zufolge lediglich zu einem Anstieg des Stromverbrauchs um 0,5 Prozent führen.[27] Das zeitlich und örtlich konzentrierte Laden einiger zehn oder hundert Fahrzeuge sowie der Vorgang des Schnellladens könnten jedoch zu lokalen Lastspitzen und damit zu Netzüberlastungen führen.
Folglich bedarf die Integration von Elektrofahrzeugen ins Netz intelligenter Steuerung. Die vermehrte Einspeisung erneuerbarer Energien erfordern eine neue Ausrichtung der Strominfrastruktur sowie Speicherkapazitäten und flexible Verbraucher, welche das schwankende Angebot ausgleichen können. Durch das zeitlich gesteuerte Laden und möglicherweise in fernerer Zukunft auch die Rückspeisung von Energie aus Fahrzeugbatterien in das Stromnetz können Elektrofahrzeuge dem Netzbetreiber positive oder negative Regelleistung zur Verfügung stellen und somit als ausgleichendes Element zur Netzstabilisierung genutzt werden [Systemanalyse BW^{e} mobil (2010)].
Auch wenn sich aus dem Laden von Elektrofahrzeugen für Energieversorger noch kein direktes tragfähiges Geschäftsmodell ableiten lässt, kooperieren bereits heute Fahrzeughersteller mit Energieversorgern in gemeinsamen Pilotprojekten, um neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit und Geschäftsmodelle für die Zukunft zu erproben (siehe auch Kapitel 2.5).

INFORMATIONS- UND KOMMUNIKATIONSTECHNOLOGIE

Bereits in konventionellen Fahrzeugen wird die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) im Fahrzeug immer wichtiger. Fahrzeuge der Oberklasse besitzen bereits heute bis zu 40 Prozent computergesteuerte Komponenten, der Wertschöpfungsanteil der IKT im Fahrzeug wird in Zukunft weiter steigen [Systemanalyse BW^{e} mobil 2010].

Neben der zunehmenden Anzahl von Fahrerassistenz- und Steuersystemen in konventionellen Fahrzeugen erfordern Elektrofahrzeuge zusätzliche IKT-Komponenten inner- und außerhalb des Fahrzeugs:

- In hybriden und vollelektrischen Antriebssträngen kommen erweiterte und neue Elektronikkomponenten, Steuer- und Bussysteme zum Einsatz (siehe Kapitel 2.2.2).
- Zwischen privaten und öffentlichen Ladestationen und Fahrzeugen muss eine sichere Kommunikation und Identifikation erfolgen.
- Nutzer erhalten IT-unterstützt Zugang zu Ladestationen und Fahrzeugen im Sharing-Einsatz.
- Die Entwicklung intermodaler Verkehrskonzepte erfordert die Vernetzung unterschiedlicher Verkehrsträger durch eine Datenfusion, -verarbeitung und -bereitstellung für den Nutzer.
- Zur Integration von Elektrofahrzeugen in Flotten (Carsharing, Firmen- und kommunale Fuhrparks, Taxi- und Lieferflotten etc.) müssen Flottenmanagementsysteme an die speziellen Anforderungen angepasst und erweitert werden.
- Orte wie Parkhäuser und Tiefgaragen, an denen zukünftig lokal und zeitlich konzentriert viele Elektrofahrzeuge geladen werden, benötigen Ladeinfrastruktur mit übergreifenden Lade- und Lastmanagementsystemen, um die Stromnetzstabilität nicht zu gefährden.
- Die Einspeisung erneuerbarer Energien in intelligente Netze (Smart Grids) zur Nutzung in Elektrofahrzeugen sowie das gesteuerte Laden dieser Fahrzeuge zur Netzstabilisierung erfordert innovative Regel- und Steuermechanismen.

27 Annahmen: Verbrauch von 0,2kWh/km, Fahrleistung 15.000km/Jahr

Sowohl im Fahrzeug als auch für die Verbindung von Fahrzeug und Energieinfrastruktur, zur Vernetzung des Nutzers und zur Entwicklung übergreifender Mobilitätsmanagementsysteme erfährt die IKT eine immer stärkere Bedeutung und bildet das Bindeglied zwischen Automobil- und Energiebranche.

NEUE GESCHÄFTSMODELLE

Bei der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle für elektromobile Antriebskonzepte gilt es spezifische Nachteile von Elektrofahrzeugen wie eine verminderte Reichweite zu kompensieren und die Vorteile der Elektromobilität optimal auszuschöpfen (vgl. Abbildung 26).

Diese liegen dabei zum Beispiel in niedrigeren Betriebskosten (in erster Linie geringere Kosten für Treibstoff und Wartung) sowie in guten Leistungsdaten. So können mit Elektrofahrzeugen ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl und kräftige Beschleunigungen (im unteren Geschwindigkeitsbereich) erreicht werden. Die Umweltverträglichkeit der Fahrzeuge durch deren lokale Emissionsfreiheit und einen geringen Geräuschpegel führt zudem zu Imagevorteilen gegenüber herkömmlichen Verbrennern.
Diese Eigenschaften machen batterieelektrische Fahrzeuge zum idealen Stadtauto. Gerade in Ballungsräumen wird der Zielkonflikt zwischen der zwingenden Notwendigkeit der Mobilität von Menschen und Gütern sowie den negativen Auswirkungen des Verkehrs (wie bei-

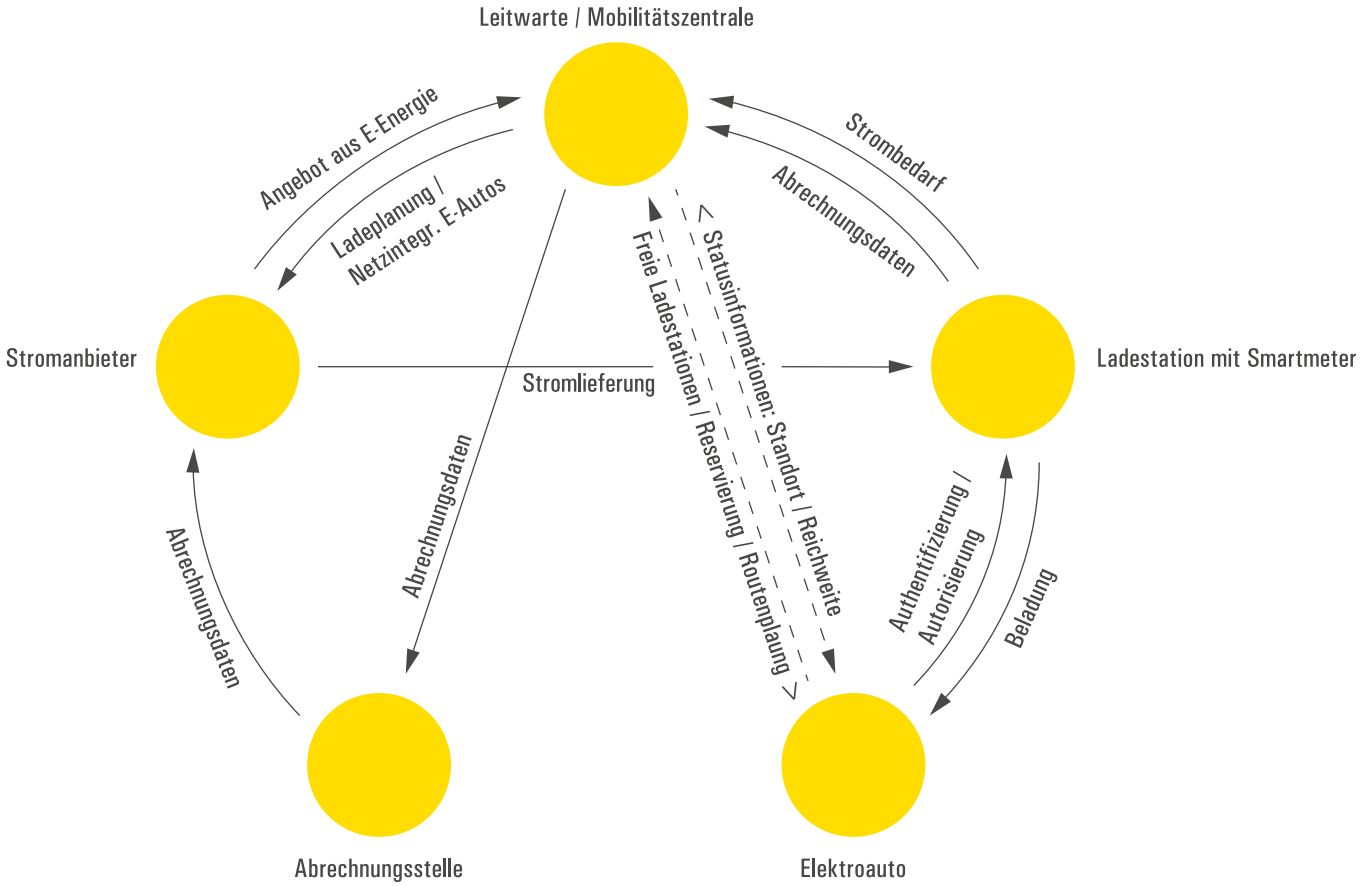
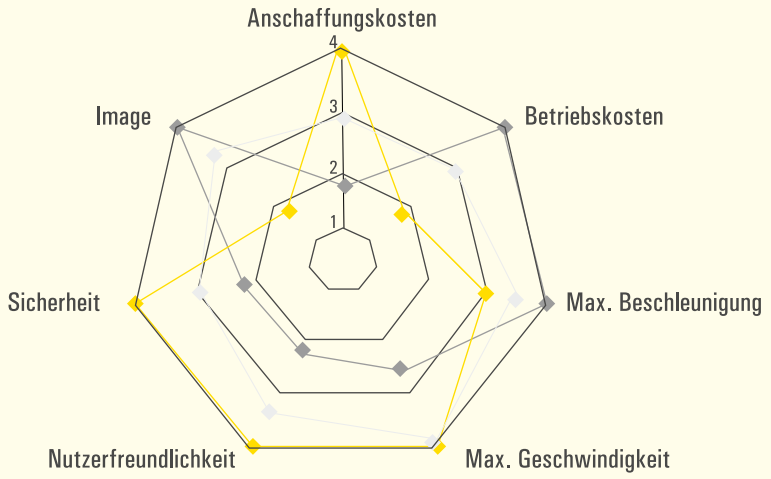


Abbildung 25: IKT als Schlüssel für erfolgreiche Elektromobilität[28]

28 Abbildung nach: BMWi (2011)

spielsweise Lärm, Schadstoffbelastung von Mensch und Umwelt sowie Ressourcen- und Raumbedarf) besonders deutlich. Eine bestimmte Marktdurchdringung vorausgesetzt, verspricht die Elektromobilität gerade für Städte enorme Vorteile. Batterieelektrische Mobilität kann demnach für die nähere Zukunft als »urbane Mobilität« betrachtet werden und zur Steigerung der Qualität urbanen Lebens beitragen.



Herkömmliches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
Hybridfahrzeug
Reines batterieelektrisches Fahrzeug

1 = negative Bewertung; 4 = positive Bewertung

Anschaffungskosten: anfängliche Kaufkosten (inkl. Steuern, andere einmalige Kosten)
Betriebskosten: alle Betriebskosten, inkl. Steuern, Wartung, Versicherung
Nutzerfreundlichkeit: umfasst Aspekte der Reichweite pro Tankfüllung bzw. Ladung, Auflade- bzw. Tankzeiten, Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur
Sicherheit: Crashsicherheit sowie Transport-, Energiespeicherungssicherheit
Image: Umweltfreundlichkeit, Nachhaltigkeit

Abbildung 26: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebskonzepte[29]

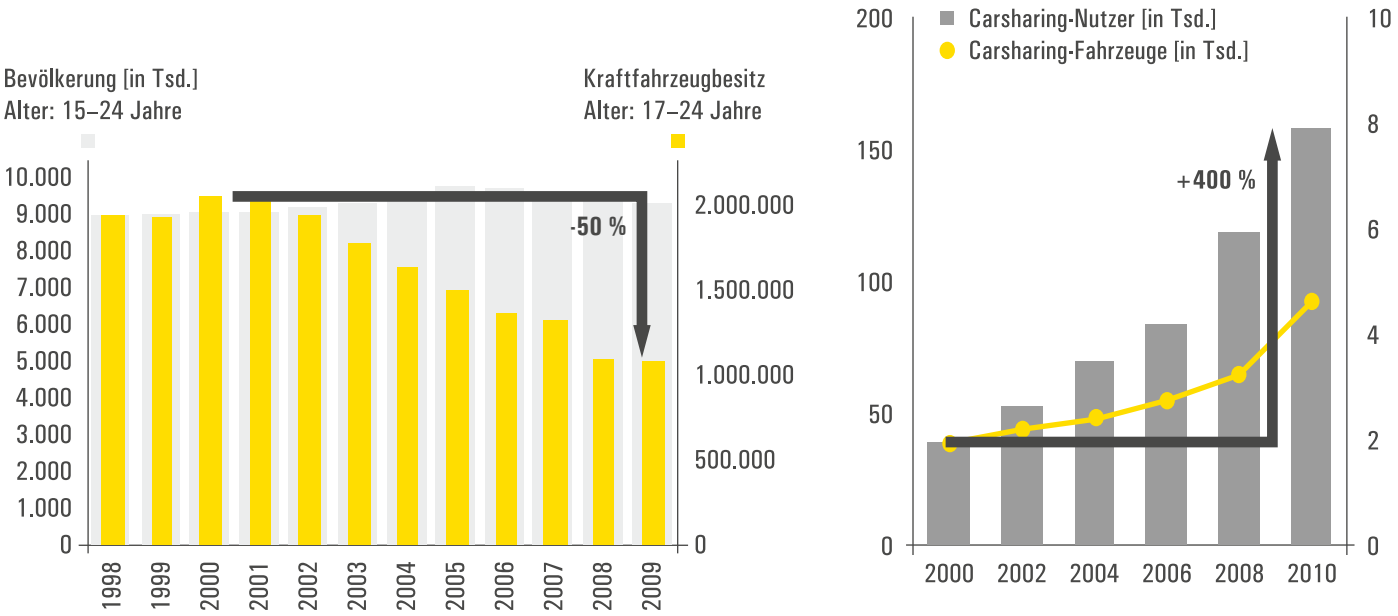


Abbildung 27: Entwicklung von Fahrzeugbesitz und Carsharing-Nutzung 2000-2010 in Deutschland

29 Eigene Darstellung I Anmerkung: Die geringere Sicherheit beim rein batterieelektrischen Fahrzeug bezieht sich in erster Linie auf Fahrzeuge, welche auf einen Elektrobetrieb umgerüstet wurden (Konversionsfahrzeuge).
30 Eigene Darstellung, Datenbasis: Kraftfahrtbundesamt und Bundesverband Carsharing

Längere Distanzen können mit hybriden Antriebskonzepten zurückgelegt werden.

Nicht nur die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bringt die Automobil-, IKT- und Energiebranche in Bewegung. Bereits heute deutet sich an, dass dem Privatbesitz von Fahrzeugen auf lange Sicht weniger Bedeutung beigemessen werden könnte. Erstes Anzeichen dafür ist der rückläufige Fahrzeugbesitz jüngerer Nutzer in den letzten Jahren bei gleichzeitig starker Zunahme in der Nutzung von Fahrzeug-Sharing-Angeboten, wie Abbildung 27 zeigt.

Die Industrie hat diesen Trend erkannt: Daimler ist mit seinem bekannten Carsharing-Angebot car2go (www.car2go.com) den Schritt vom Hersteller zum Mobilitätsdienstleister gegangen. Auch BMW bietet neuerdings in Kooperation mit dem Autovermieter Sixt unter dem Titel Drive-Now ein ähnliches Konzept an (www.drive-now.com). Weitere etablierte Carsharing-Anbieter integrieren erste Elektrofahrzeuge in ihre Fahrzeugflotten, wie Abbildung 28 zeigt. Diese Entwicklung bietet Chancen für neue Betreiber- und Geschäftsmodelle im Bereich individueller, aber geteilter Mobilität. Für die Integration alternativer Antriebskonzepte mit der notwendigen Ladeinfrastruktur in derartige Sharing-Konzepte bedarf es einer engen Kooperation aller drei Branchen der Automobil-, IKT- und Energiewirtschaft.

Setzt sich diese noch ganz am Anfang stehende Entwicklung fort, werden sich große Auswirkungen in den Anforderungen an neue Fahrzeugkonzepte ergeben, aber auch die Wertschöpfungsstruktur der Fahrzeuge wird sich ändern. Neue Potenziale ergeben sich im Bereich Mobilitätsdienstleistungen und Betreibermodellen für gemeinsam genutzte Mobilitätsressourcen, die sich bei Elektrofahrzeugen auch auf die Infrastruktur erstrecken. Die Position des Mobilitätsdienstleisters kann dabei durch Fahrzeughersteller, Energieversorger, Autovermieter oder neue »Mobilitäts-Integratoren« besetzt werden. In jedem Fall führt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, verbunden mit dessen intelligenter Integration in das Stromnetz und der Entstehung neuer Mobilitätskonzepte, zu einer Konvergenz der Branchen Automobilindustrie, IKT und Energiewirtschaft, deren enge und vernetzte Kooperation für die Gestaltung der Mobilität von morgen unerlässlich ist.

Anbieter	Stadtmobil	cambio	DB Carsharing	Zipcar	Car2go	Yélomobile
Standorte	Deutschland	Deutschland, Belgien	Deutschland	USA, Kanada, England	Deutschland, USA, Niederlande	Frankreich
Nutzer	> 25.000	> 38.000	> 65.000	> 500.000	> 34.000	> 450
Fahrzeuge	> 1.000	> 1.200	> 2.000	> 8.000	> 800	> 50

Abbildung 28: Auswahl von Carsharing-Anbietern mit Elektrofahrzeugen in ihren Flotten[31]

31 Eigene Darstellung I Anmerkung: Die Anzahl der ausgewiesenen Fahrzeuge stellt die Gesamtheit der jeweiligen Flotte dar. Elektrofahrzeuge, welche derzeit noch einen geringen Teil an der Gesamtflotte ausmachen, wurden nicht weiter aufgeschlüsselt.

2.5 ÜBERBLICK ZUR FÖRDERUNG

Die vorteilbringenden Charakteristika von Elektrofahrzeugen wie die lokale Emissionsfreiheit und niedrige Betriebskosten der Fahrzeuge werden heute noch von einer Kostenstruktur begleitet, die im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nicht wettbewerbsfähig ist. Um Elektromobilität im Markt durchzusetzen, bedarf es deshalb intelligenter Planung und geeigneter Förderungsinstrumente.

»Noch wichtiger als die finanzielle Unterstützung der Politik ist es, langfristige Ziele für die Industrie zu setzen, sodass die Planungs- und Investitionssicherheit erhöht wird.«

Marco Piffaretti, Managing Director, Protoscar SA

SITUATION IN DEUTSCHLAND

Die Förderlandschaft in Deutschland ist vielfältig. Über die im Folgenden angesprochenen themenspezifischen Förderungsmöglichkeiten hinaus bestehen Programme, die thematisch nicht an die Elektromobilität gebunden sind, für Unternehmen aus der betreffenden Branche jedoch offenstehen.[32] Durch den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität von 2009 wurden die deutschen Förderungsaktivitäten strukturiert. Mit den Mitteln des Konjunkturpakets II werden bis Ende 2011 Fördergelder für die Elektromobilität in Höhe von 500 Mio. Euro von den beteiligten Ministerien für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie Bildung und Forschung (BMBF) bereitgestellt. Zur besseren Koordination wurde 2010 die Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung eingerichtet [BMWi (2010)], die als zentrale Anlaufstelle fungiert. Im gleichen Jahr wurde mit der Nationalen Plattform Elektromobilität ein Konsortium aus Industrie, Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften und Gesellschaft ins Leben gerufen, das in sieben Arbeitsgruppen für die Elektromobilität relevante Fragestellungen behandeln soll [BMU (2010)]. Dabei wurden mehrere Empfehlungen für eine Förderung der Elektromobilität über die Laufzeit des Konjunkturpakets II hinaus gegeben. Als ein Resultat veröffentlichte die Bundesregierung das Regierungsprogramm Elektromobilität [Bundesregierung (2011)], durch das bis 2013 eine weitere Milliarde Euro vor allem in die Grundlagenforschung[33] gehen soll. Ebenso sollen Schaufensterprojekte gefördert werden, um die Sichtbarkeit der Elektromobilitätstechnologien zu verbessern und die Akzeptanzsteigerung in Deutschland zu fördern [NPE (2011a)]. Um letzteres Ziel zu erreichen, werden neben monetären Anreizen außerdem Sonderparkplätze, die Freigabe von Busspuren oder Sonderfahrspuren für Elektrofahrzeuge diskutiert [Bundesregierung (2011)].

Experten heben besonders den im internationalen Vergleich einzigartigen systemischen Ansatz in Deutschland hervor. So wird neben der Grundlagenforschung und der angewandten (Batterie-)Forschung auch die Erprobung neuer Mobilitätskonzepte im Zusammenspiel mit Energieunternehmen gefördert.

»Deutschland ist durch den Systemansatz in der Förderung internationaler Vorreiter. Innerhalb des Förderungssystems muss der Forschung eine zentrale Rolle zukommen, da durch sie Produkte und Technologien generiert werden können. Dies ist für den Markt im Anfangsstadium erfolgskritisch.«

Heiko Herchet, Leiter Kompetenzzentrum Elektromobilität, EDAG Group

Über die Bundesprogramme hinaus gibt es Förderung in den Bundesländern. In Bayern wurde 2009 das Förderprogramm Elektromobilität gestartet. Dieses hat zum Ziel, die Erforschung von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb und dessen Komponenten zu unterstützen [STMWIVT (2009)]. In den Modellkommunen Garmisch-Partenkirchen und Bad Neustadt sowie im Bayerischen Wald [HS Deggendorf (2010)] sollen ganzheitliche Mobilitätskonzepte geschaffen und durch Maßnahmen an Infrastruktur und Technologiemanagement umgesetzt werden [Garmisch (2010); E-Mobility (2010)]. In Nordrhein-Westfalen wurde der Förderwettbewerb ElektroMobil.NRW Anfang 2010 abgeschlossen. Gefördert werden 22 Projekte, hauptsächlich aus den Bereichen der Batterieentwicklung und Infrastruktur, mit insgesamt 46,5 Mio. Euro [NRW (2010); Autocluster NRW (2010)].

BADEN-WÜRTTEMBERG

In einer ersten Landesinitiative zur Elektromobilität hat das Land Baden-Württemberg für die Jahre 2010 bis 2014 in Summe 28,5 Mio. Euro bereitgestellt. Für das Jahr 2011 wurde ein weiterer Zuschuss in Höhe von zwei Millionen Euro für die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie e-mobil BW zum Aufbau

32 Für den Mittelstand ist hier das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand zu nennen.
33 Als Fördergebiete werden angegeben: Zellen und Batterien, Elektrofahrzeug, Ladeinfrastruktur und Netzintegration.

einer Koordinierungsstelle Leichtbau bewilligt [Logistik BW (2011)]. Grundsätzlich fungiert die Landesagentur als Dachorganisation, um die Aktivitäten im Bereich der Elektromobilität in Baden-Württemberg zu koordinieren.

Konkret werden für den Aufbau strategisch wichtiger Forschungsinfrastruktur signifikante Geldbeträge in die Hand genommen. Um die Entwicklung des Standorts Ulm zu einem Kompetenzzentrum der Batterieforschung zu unterstützen, investierte das Land über vier Millionen Euro in den Bau des Forschungslabors eLaB am Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung (ZSW) Ulm und wird darüber hinaus ein Forschungsprojekt zum Aufbau einer Produktion von Lithium-Akkus mit 5 Mio. Euro fördern [ZSW (2011)]. Das neu gegründete Helmholtz-Institut für elektrochemische Energiespeicherung (HIU) in Ulm erhält eine jährliche Förderung von rund einer Million Euro.

Aber auch mithilfe privatwirtschaftlicher Gelder konnten Förderangebote ausgebaut werden: Beispielsweise stellte die Daimler AG im März 2011 1,75 Millionen Euro zur Verfügung, um am Karlsruher KIT ein Promotionskolleg zur Elektromobilitätsforschung einzurichten [Daimler (2011)].
Einen informativen Überblick über die Förderungsmöglichkeiten für baden-württembergische Unternehmen hat die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg veröffentlicht [eMobil BW (2011)]. Die e-mobil BW unterstützt Unternehmen und Institutionen bei der Suche nach geeigneten Fördermöglichkeiten im Bereich Elektromobilität.

SITUATION WELTWEIT

Auch im Ausland werden Subventions- und Fördermaßnahmen bereitgestellt. Vergleicht man die weltweiten Förderstrategien, so lassen sich unterschiedliche Ansätze in verschiedenen Ländern erkennen. Die Europäische Union (EU) hat das Ziel, von Ölimporten unabhängiger zu werden sowie den Klimawandel zu begrenzen. Zur Zielerreichung wurden mehrere Maßnahmen und Initiativen definiert. Das größte Fördervolumen hat die European Green Cars Initiative mit insgesamt rund 5 Mrd. Euro, wobei hiervon 4 Mrd. Euro Kredite darstellen. Ein weiterer Fokus liegt auf nicht-monetären Regulierungsmaßnahmen (Geräusche, Verbrauch, CO_2 etc.), Untersuchungen der Verbrauchererwartungen, der Förderung gemeinsamer Standards sowie gezielten Qualifizierungsmaßnahmen [Europäische Kommission (2010)].

Innerhalb Europas verfolgt Deutschland einen systemischen Förderansatz, verzichtet jedoch auf Kaufanreize. Letztere finden sich verstärkt in nordeuropäischen Ländern wie Dänemark (siehe Abbildung 29). Frankreich fokussiert die Förderung der Elektromobilität auf die Zusammenarbeit mit mehreren Automobilherstellern sowie auf den Aufbau einer Ladeinfrastruktur (1,5 Mrd. Euro) [Europäische Kommission (2009)]. Außerdem bestehen Kaufanreize für CO_2-arme Fahrzeuge (5.000 Euro) [GTAI (2011a)].

In den USA liegt das Hauptaugenmerk der Förderung auf den Batterietechnologien und weiteren Systemkomponenten ($2 Mrd.) [GTAI (2010)] und auf der Entwicklung kraftstoffsparender Fahrzeuge (Kredite über $25 Mrd.). Von den 2009 zur Verfügung gestellten Krediten wurden schon mehr als $9,1 Mrd. abgerufen [USA Today (2011)]. Außerdem sollen für $300 Mio. Elektrofahrzeuge für die öffentliche Verwaltung angeschafft werden [Bloomberg (2011)]. Weiterhin gibt es mehrere Kaufanreize auf Bundes-, bundesstaatlicher und zum Teil lokaler Ebene, welche allein auf Bundesebene bei $7.500 liegen.

In Asien folgt China einem umfassenden Förderansatz. Das Land hat sich durch den 12. Fünfjahresplan (2011–2015) stark der Elektromobilitätsförderung verpflichtet. So sollen bis 2020 ca. 11 Mrd. Euro in den Sektor der Entwicklung von alternativen Antriebskonzepten

Maximaler Kaufanreiz für Elektroautos in 1.000 Euro, in ausgewählten Ländern

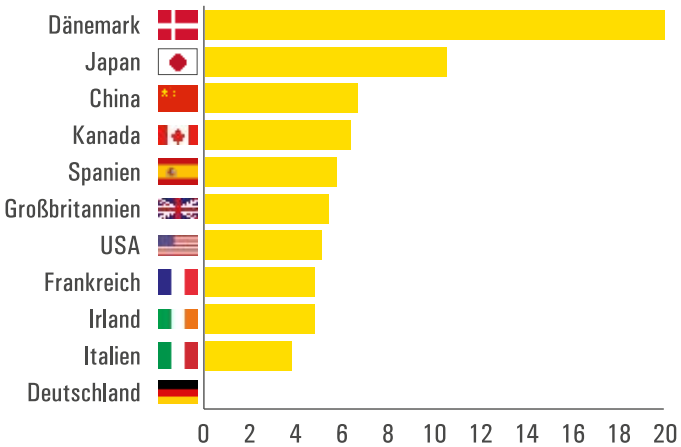


Abbildung 29: Kaufanreiz für Elektroautos in verschiedenen Ländern im Überblick[34]

34 Autogazette (2011) I EDIE (2010) I GTA I (2011c) I Autohaus (2009) I U.S. Department of Energy (2011) I Spiegel (2011)

und in Demonstrationsprojekte investiert werden [GTAI (2011)]. In 5 chinesischen Metropolen (Shanghai, Changchun, Shenzhen, Hangzhou und Hefei) soll die Elektromobilität in der Praxis durch Kaufanreize von bis zu 6.500 Euro erprobt werden [NY Times (2010)]. In der zweiten großen Volkswirtschaft Asiens, Japan, sollen hohe Kaufanreize (bspw. ungefähr $15.000 für einen Mitsubishi i-Miev) bei der Etablierung der Elektromobilität helfen [GTAI (2010)]. Daneben wird die Batterieforschung mit ca. $200 Mio. unterstützt [GTAI (2011b)].

Als Fazit lässt sich festhalten, dass international keine eindeutige Entwicklung bei den unterschiedlichen Förderstrategien erkennbar ist. Allenfalls scheinen sich Kaufanreize mehr und mehr durchzusetzen. Dänemark erreicht hier mit mehr als 20.000 Euro Steuervorteilen den Spitzenplatz (siehe Abbildung 29) [Autogazette (2011)]. Der Steuervorteil wird größtenteils durch einen Erlass der sehr hohen Kfz-Zulassungsteuer realisiert, die dort zusätzlich zur Umsatzsteuer erhoben wird. In Deutschland sind bisher keine Kaufanreize geplant.

EUROPA
- European Green Cars Initiative:
  - 4 Mrd. € Kredite (via Risk-Sharing Finance Facility und European Clean Transport Facility), Zeitraum 2007–2013 (RSFF) bzw. 2009–2012 (ECTF)
  - 1 Mrd. € Zuschüsse, Zeitraum: 2010–2013
- Förderung von Energietechnologien (mit Fokus auf Verkehr): 730 Mio. €, Zeitraum: 2007–2013

USA
- Förderung der Batterietechnologie und weiteren Systemkomponenten: $ 2 Mrd., Förderungsbeginn: 2009 (American Recovery and Reinvestment Act)
- Kraftstoffsparende Fahrzeuge: $ 25 Mrd. (Kredite), Förderungsbeginn: 2008, bisher $ 9,1 Mrd. abgerufen
- Demonstrationsvorhaben, Infrastruktur: $ 400 Mio., Förderungsbeginn: 2009 (ARRA)
- Diverse Kaufanreize

DEUTSCHLAND
- Konjunkturpaket II: 500 Mio. €, Zeitraum: 2009–2011
- Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: 1,4 Mrd. €, Zeitraum: 2006–2016
- Regierungsprogramm Elektromobilität: 1 Mrd. €, Zeitraum: 2011–2013

FRANKREICH
- Förderung kohlenstofffreier Fahrzeuge: 250 Mio. € (Kredite), Zeitraum: 2009–2010
- Demonstrationsfonds: 400 Mio. €, Zeitraum: 2009–2013
- Förderung der Ladeinfrastruktur: 1,5 Mrd. €, Zeitraum: 2009–2015
- 5.000 € bei Fahrzeug < 60 g CO_2/KM, Zeitraum: 2010–mindestens 2012

JAPAN
- Batterieforschung: ca. $ 200 Mio., Zeitraum: 2011–2012
- Kaufanreize: ca. $ 10.000 für Nissan Leaf, ca. $ 15.000 für Mitsubishi iMiev
- Kaufanreize: Toyota Prius ca. $ 17.000

CHINA
- Förderung der Elektromobilität: ca. 11 Mrd. €, Zeitraum: 2011–2020
- Kaufanreiz: ca. 6.500 € bei BEV, ca. 5.400 € bei PHEV, Förderungsbeginn: 2010, bis Absatz von 50.000 Fahrzeugen erreicht ist

Abbildung 30: Weltweite Förderanstrengungen im Bereich Elektromobilität im Überblick[35]

35 Eigene Darstellung I Bundesregierung (2011) I Fortiss (2010) I Oekonews (2009) I Europäische Kommission (2009) I GTAI (2011a) I Europäische Kommission (2011a) I Europäische Kommission (2011b) I EIB (2008), EGCI (2009) I Europäisches Parlament (2009) I GTAI (2010) I USA Today (2011) I GTAI (2011) I NY Times (2010) I GTAI (2011b) I Autoblog (2010) I GTAI (2010a)

Kapitel 3

KONSEQUENZEN DES WANDELS FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

3.1 DIE BEDEUTUNG DES AUTOMOBILS FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

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

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 Volvo Busse Deutschland GmbH, Kässbohrer Geländefahrzeug AG, Mercedes-Benz LKW oder IVECO) verfügt der Standort Baden-Württemberg außerdem über eine Vielzahl von bedeutenden Zulieferunternehmen. Die Firmen Bosch, ZF Group, Mahle, Behr, Getrag, Kolbenschmidt Pierburg, Eberspächer Freudenberg, Peguform sowie Mann+Hummel zählen alle zu den 100 größten Automobilzulieferern weltweit [Automobil Produktion (2011a)]. In Summe sind in Baden-Württemberg mehr als 20 Unternehmen angesiedelt bzw. mit Produktionsbetrieben vertreten, die 1.000 oder mehr Mitarbeiter beschäftigen [IHK (2011)]. Abbildung 31 zeigt die regionale Verteilung der wichtigsten Zulieferer in Baden-Württemberg sowie deren Hauptbetätigungsfelder.

> *»Baden-Württemberg war schon immer das Land der Tüftler. Die vorhandene Ingenieurskunst und die enge Vernetzung von Hochschulen, Forschung und Wirtschaft bieten beste Voraussetzungen, in Bereichen wie Leistungselektronik oder Motoren und Getriebe praktikable Lösungen für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zu erarbeiten.«*
>
> Jürgen Jost, Bereichsleiter Forschung und Entwicklung, Dürr Systems GmbH

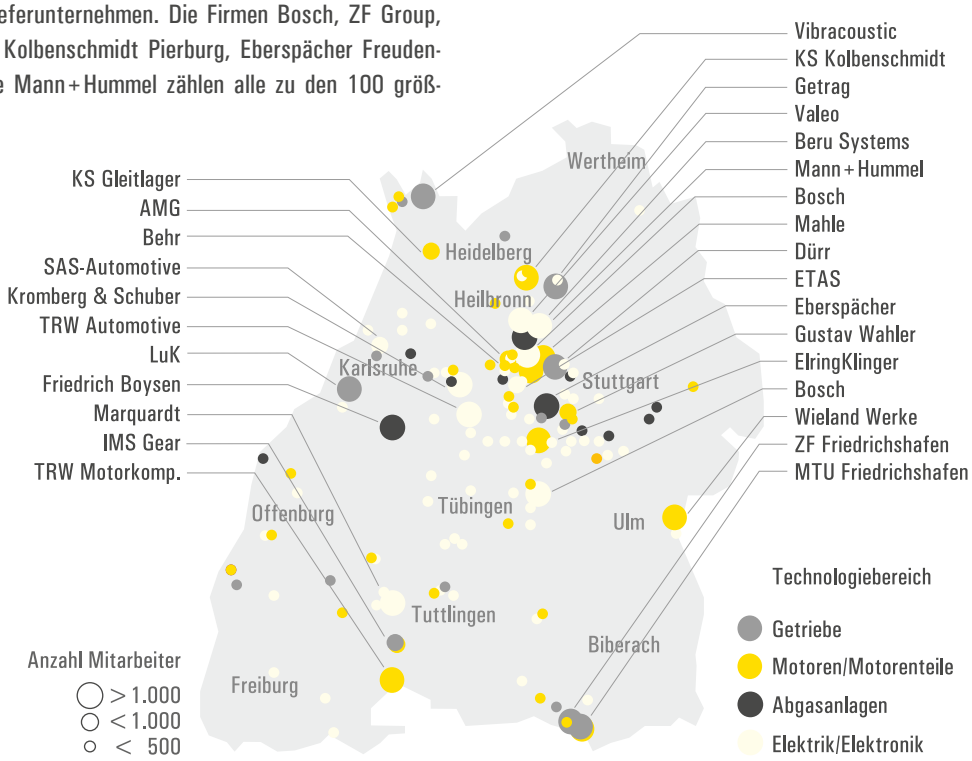


Abbildung 31: Landkarte von wichtigen Automobilzulieferunternehmen in BW[36]

36 Eigene Darstellung

3.1.2 AKTUELLE ENTWICKLUNG BEI NEUZULASSUNGEN

Im Jahr 2010 wurden im gesamten Bundesgebiet rund 3,3 Mio. Kraftfahrzeuge zugelassen, bei einem Bestand von insgesamt 45 Mio. Fahrzeugen. Auf das Bundesland Baden-Württemberg entfielen dabei nahezu 450.000 Neuzulassungen, bei einem Bestand von knapp 7 Mio. Fahrzeugen. Im Bereich »Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen« (rein elektrischer Antrieb und Hybridantriebe) stieg die Anzahl neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland gegenüber dem Vorjahr um rund 30 Prozent auf über 11.000 Fahrzeuge [Kraftfahrtbundesamt (2011a)].

Das Land Baden-Württemberg konnte dabei bei den Zulassungen rein elektrischer Personenkraftwagen den größten Zuwachs im Ländervergleich auf sich vereinen. Rund jedes fünfte rein elektrisch betriebene Fahrzeug wurde in Baden-Württemberg angemeldet. Bei den Hybridfahrzeugen nimmt Baden-Württemberg Rang drei hinter den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Bayern ein [Kraftfahrtbundesamt (2011a)]. Abbildung 32 zeigt die Entwicklung »alternativer Fahrzeugkonzepte« bezogen auf die Neuzulassungen der vergangenen Jahre. Insgesamt liegt der Bestand an Elektro- und Hybrid-Personenkraftwagen im gesamten Bundesgebiet bei rund 39.600 Fahrzeugen. Auf Baden-Württemberg entfallen hiervon gut 5.300 Einheiten [Kraftfahrtbundesamt (2011b)].

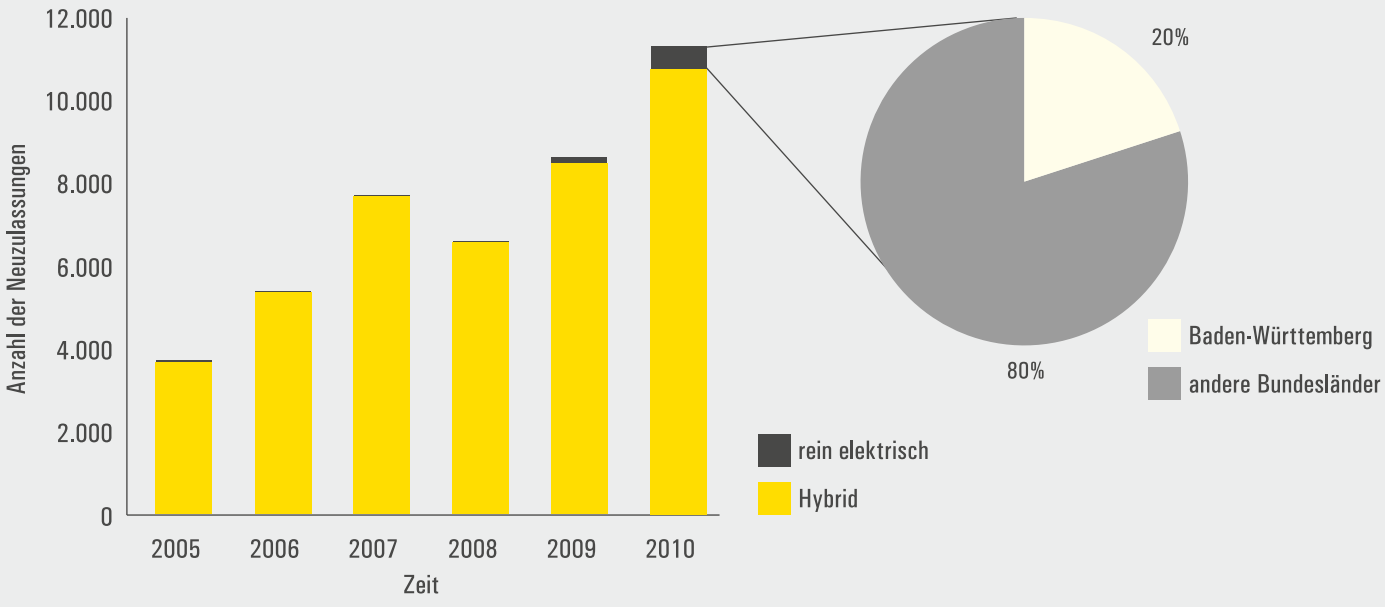


Abbildung 32: Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-Personenkraftwagen im Vergleich[37]

37 Eigene Darstellung I Kraftfahrtbundesamt (2011a)

3.2 STRUKTUR DER AUTOMOBILINDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Die Automobilindustrie mit ihren Zulieferern nimmt in Baden-Württemberg eine Schlüsselfunktion ein. Im Jahr 2010 waren hier nahezu 200.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in über 300 Unternehmen im Fahrzeugbau tätig, mit einem Branchen-Jahresumsatz von über 70 Mrd. Euro [Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011a)].[38]

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 Prozent aller Beschäftigten der Chemischen Industrie, rund 20 Prozent der Mitarbeiter innerhalb der gummi- und kunststoffverarbeitenden Industrie und 32 Prozent aller Beschäftigten in Betrieben, welche Metallerzeugnisse herstellen, im weiteren Sinne ebenfalls

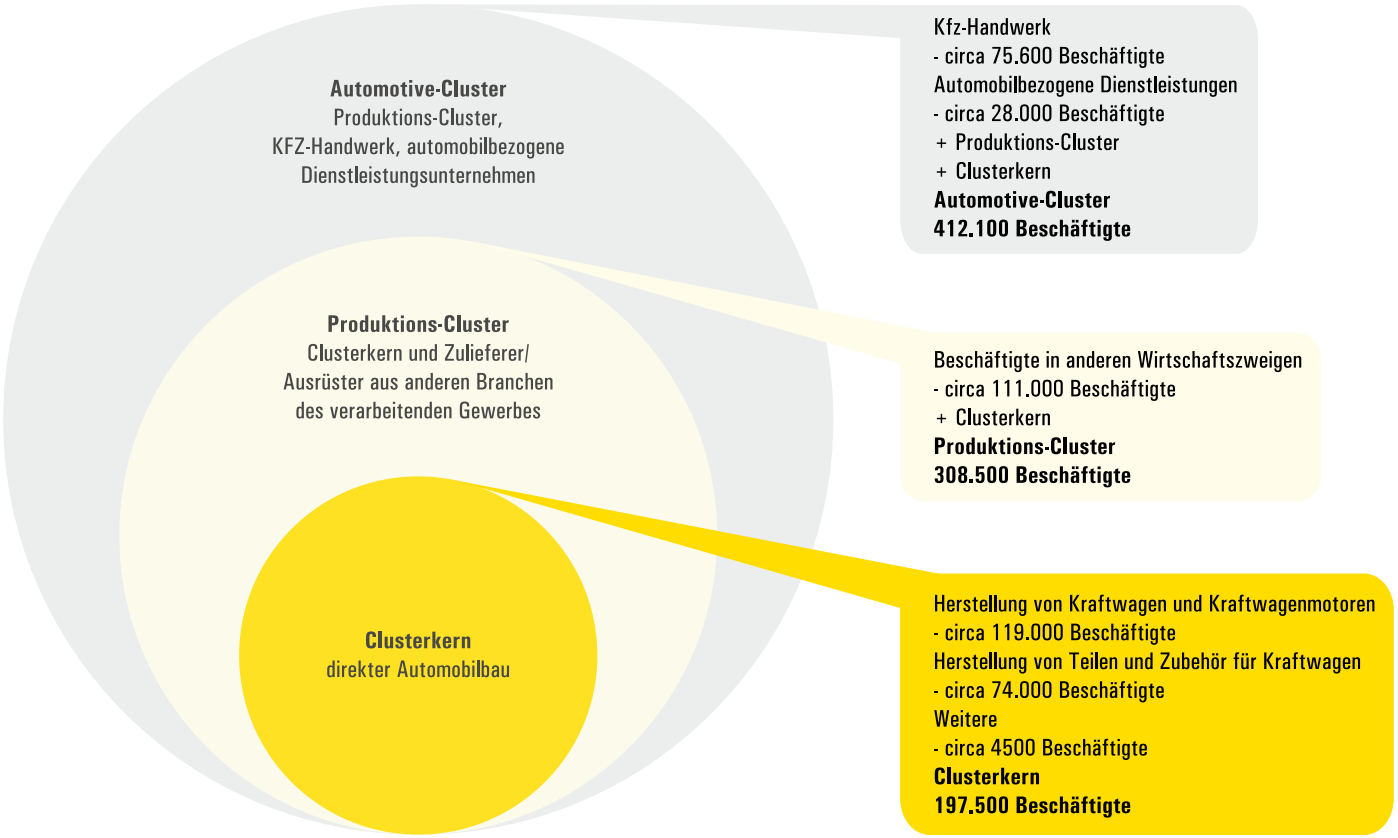


Abbildung 33: Struktur der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg[39]

38 Gemäß der amtlichen Statistik wird der Wirtschaftszweig »Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen« (WZ-Nummer 29) zur Erhebung herangezogen. Erfasst werden hierbei Betriebe mit 20 oder mehr Mitarbeitern. Die Auswertung basiert auf der seit 2008 gültigen NACE-Klassifikation Revision 2

39 Eigene Darstellung i. A. a.: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011a) I IMU Institut (2011) I IHK (2011) I Jäger (2009)

zum Kreis der Automobilzulieferer gehören [Kinkel (2007); Jäger (2009); IHK (2011)]. Bezogen auf Baden-Württemberg zählen somit rund 600 Betriebe zum Kreis der Automobilzulieferer [(IHK (2011)].

Zusätzlich beschäftigen das Kfz-Handwerk sowie zahlreiche automobilbezogene Dienstleistungsunternehmen (FuE, Ingenieurbüros, Hard- und Softwarehäuser) eine große Zahl an Menschen in Baden-Württemberg. Unter Berücksichtigung aller aufgezeigten Bereiche tragen insgesamt im Land Baden-Württemberg über 400.000 direkt oder indirekt Beschäftigte ihren Teil zur automobilen Wertschöpfung bei.[40] Gemessen an der Gesamtbeschäftigungszahl des Landes ist das rund jeder Zehnte, betrachtet man die Region Stuttgart, dann sind es sogar 17 Prozent der Beschäftigten, die ihr Geld durch das Automobil verdienen [IMU Institut (2011).

Fasst man diese Daten zusammen, so lässt sich die Automobilwirtschaft, wie in Abbildung 33 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 gesamten 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.

3.3 DIE AUTOMOBILE WERTSCHÖPFUNGSARCHITEKTUR UND IHRE AUSWIRKUNG AUF DIE BESCHÄFTIGUNGSSTRUKTUR

Der baden-württembergische Fahrzeugbau besitzt, gemessen am Umsatz, einen Anteil von rund 22 Prozent an der deutschen (317 Mrd. Euro im Jahr 2010) und rund 6 Prozent an der weltweiten Automobilindustrie [Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011b); VDA (2011); BMU (2009)]. Der anstehende Technologiewandel zur Elektromobilität wirft sowohl bei den Unternehmen und der Landespolitik, aber ebenso bei den Beschäftigten die Frage auf, ob Baden-Württemberg auch in Zukunft einen maßgeblichen Anteil der automobilen Wertschöpfung und die damit verbundenen Arbeitsplätze auf sich vereinigen kann. Laut einer Hochrechnung des Bundesumweltministeriums könnte sich der Gesamtmarkt der Automobilindustrie im Jahr 2020 auf circa 1.440 Mrd. Euro belaufen [BMU 2009]. Dabei wird das Marktvolumen alternativer Antriebskomponenten zu diesem Zeitpunkt auf rund 115 Mrd. Euro beziffert [McKinsey (2011a)].

3.3.1 ENTWICKLUNG DER HERSTELLKOSTEN BATTERIEELEKTRISCHER FAHRZEUGKONZEPTE

Um den Einfluss des Technologiewandels zur Elektromobilität auf die Wertschöpfung zu quantifizieren und letztlich die Auswirkungen auf die Beschäftigungsstruktur analysieren zu können, ist es notwendig, Kostenabschätzungen für die betroffenen Komponenten vorzunehmen. In der vorliegenden Studie wurde hierfür ein Zeitraum zwischen heute und dem Jahr 2020 gewählt. Neben technologischen Fortschritten in der Entwicklung müssen zudem mögliche Skalen- und Lernkurveneffekte bei einer zukünftigen Serienproduktion berücksichtigt werden. Die Abschätzung der Kosten sowie der Kostenreduktion der einzelnen Komponenten basiert auf einer Metaanalyse veröffentlichter Studien.[41] Die Ergebnisse wurden durch Expertengespräche validiert und für den Zeitraum zwischen der letzten Analyse/Auswertung im Jahr 2009 und dem heutigen Zeitpunkt (2011) aktualisiert. Für die Kosten wurden hierbei die Herstellkosten angesetzt, die der Hersteller entweder für die eigene Fertigung oder durch den Bezug der Komponenten aufbringen muss. Mark-ups beispielsweise in Form von Händlermargen, Marketingkosten oder Transportaufwendungen wurden nicht berücksichtigt.

40 Eigene Hochrechnung i. A. a.: IMU Institut (2011) I IHK (2011) I Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011a)
41 Vgl. u. A.: Santini (2010) I Miller (2011) I International Energy Agency (2011) I BCG (2010) I Gargner (2009) I Deutsche Bank (2010) I Electrification Coalition (2009) I Electrification Coalition (2010) I SAE International (2011) I Universität Stuttgart (2009) I U.S. Department of Energy (2010) I European Commission (2005) I Mock (2010) I MIT (2008) I MIT (2007) I EPRI (2001) I Cristidis (2005) I Dixon (2002) I Delorme (2009)

Als wesentliche Kostenfaktoren am Gesamtfahrzeug aus Komponentensicht lassen sich die elektrische Maschine, die Leistungselektronik sowie das Batteriesystem identifizieren. Während zum heutigen Zeitpunkt das Batteriesystem je nach Fahrzeuggröße noch zwischen 50 und 65 Prozent der Herstellkosten auf sich vereint, so kann bereits im Jahr 2020 mit deutlich niedrigeren Herstellkosten gerechnet werden. Prognosen über die Herstellkosten im Jahr 2020 schwanken im Mittel dabei, je nach Studie, zwischen 200 €/kWh und 400 €/kWh. Zwar bestehen differierende Meinungen über die Höhe der zukünftigen Herstellkosten, die Kostensenkungspotenziale jedoch werden einheitlich auf mindestens 50 Prozent, bezogen auf den heutigen Wert, geschätzt [Miller (2011); NPE (2011b)]. Gründe werden hierbei in der voranschreitenden Entwicklungsarbeit im Bereich der Batteriezellen, in den Lernfortschritten bei der Herstellung (Komponenten, Zelle, Modul, Pack) und in den mit einer Massenherstellung einhergehenden Skaleneffekten gesehen.

Abbildung 34 zeigt die zu erwartenden Kostendegressionen von Batteriepacks. Neben der Kostenabschätzung der Nationalen Plattform Elektromobilität sind zwei exemplarische Verläufe für unterschiedliche Systeme (rein elektrisches Fahrzeug (BEV) und Hybridfahrzeug

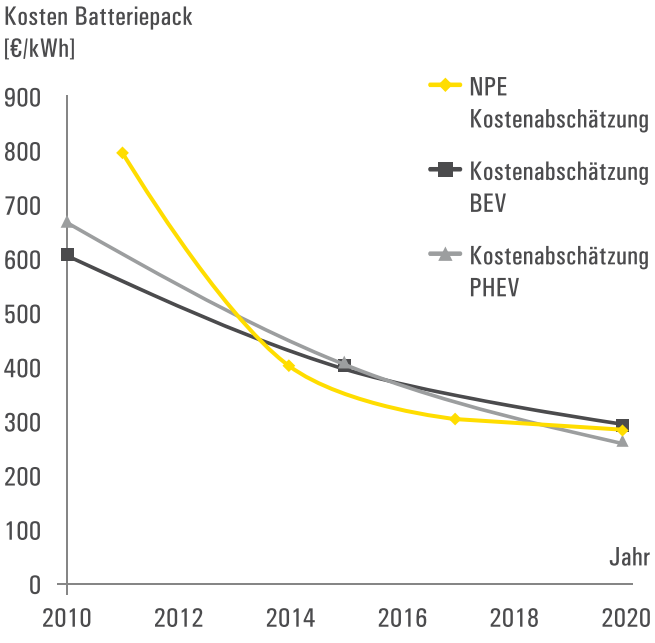


Abbildung 34: Erwartete Kostendegression von Batteriepacks[42]

»Die Herstellkosten einer Zelle werden zu rund 70 Prozent durch die Prozess- und Verfahrenskosten und nicht wie vielfach angenommen hauptsächlich durch die Materialkosten verursacht.«

Dr. Andreas Gutsch, Projektleitung Competence E am KIT, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

(PHEV 10–40 Meilen Reichweite)) dargestellt. Die Herstellkosten für die elektrische Maschine belaufen sich derzeit je nach Studie und Motorausführung auf 12 €/kW bis 18 €/kW. Prognostizierte Herstellkosten für das Jahr 2020 beziehen sich vermehrt auf Stückzahlen von mehr als 100.000 Einheiten, bei einer Nennleistung des Antriebs zwischen 32 kW und 70 kW. Die Bandbreite liegt hierbei zwischen 6 €/kW und 13 €/kW. Zwar handelt es sich im Grunde bei der elektrischen Maschine um eine ausgereifte Technologie, dennoch erscheint eine Kostenreduzierung durch eine zukünftige Massenproduktion realistisch. Zielwerte wie 4,70 $ US/kW (circa 3,40 €/kW), welches das U.S. Department of Energy für das Jahr 2020 anstrebt, scheinen jedoch zu optimistisch, da dieser Preis kaum zur Deckung der Materialkosten ausreichen dürfte [U.S. Department of Energy (2010); Universität Stuttgart (2009); International Energy Agency (2011)].

Unter der Leistungselektronik im engeren Sinne wird im Folgenden die Komponente des Pulswechselrichters (sowie deren Unterkomponenten) verstanden. Zum heutigen Stand schwanken die ausgewiesenen Kosten in der Herstellung des sogenannten Inverters studienspezifisch noch sehr stark. Je nach Bauart des Motors werden Herstellkosten zwischen 8 EUR/kW und 25 EUR/kW ausgewiesen [vgl. u. A. Mock (2010); Universität Stuttgart (2009); Dolorme (2009)]. Für das Jahr 2020 wird auch bei diesen Komponenten eine starke Reduzierung der Herstellkosten erwartet. Einsparungspotenziale durch eine mögliche Serienproduktion werden auf bis zu 70 Prozent der heutigen Kosten geschätzt [vgl. u. A. U.S. Department of Energy (2010); European Commission (2005); Cristidis (2005)].

In Abbildung 35 ist die Kostenstruktur für ein batterieelektrisches Fahrzeug in kleiner und großer Ausprägung dargestellt. Dabei sind die heutigen und die für das Jahr 2020 möglichen Kostenstrukturen aufgelistet. Für den elektrischen Antrieb wurde eine Motorleistung von 47 kW (kleines Fahrzeug) bzw. 160 kW (großes Fahrzeug) zugrunde

42 Eigene Darstellung in Anlehnung an [NPE (2011b); Miller (2011)]. Die Werte für die Fahrzeuge BEV sowie PHEV basieren auf einem Umrechnungskurs von 1,35 €/$.

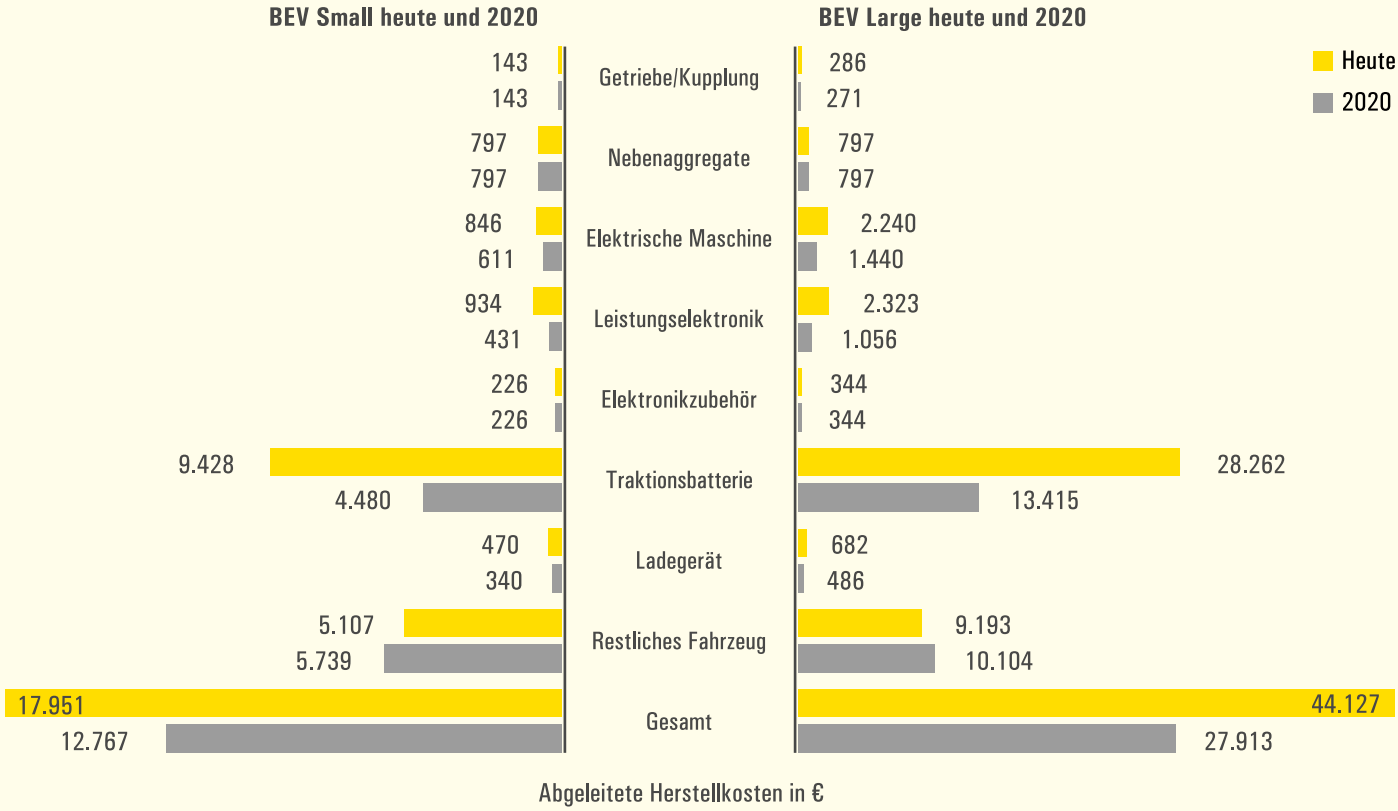


Abbildung 35: Entwicklung der Herstellkosten von batterieelektrischen Fahrzeugen im Vergleich[43]

gelegt. Bei der Batterie wurde eine Kapazität von 16 kWh (klein) bzw. 48 kWh (groß) angenommen.

Über den Betrachtungszeitraum stellt sich bei dem kleinen Fahrzeug eine Kostenreduzierung von rund 5.000 Euro und bei dem großen Fahrzeug eine Reduzierung von circa 16.000 Euro ein, was vor allem auf die niedrigeren Herstellkosten der Traktionsbatterie, der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik zurückzuführen ist. Im Vergleich zu gleichwertigen Personenkraftwagen mit konventionellem Verbrennungsmotor besteht im Jahr 2020 jedoch immer noch, auf Basis des zugrunde liegenden Berechnungsmodells, eine Differenz in den Herstellkosten von circa 4.800 Euro (kleines Fahrzeug) bzw. 8.500 Euro (großes Fahrzeug).

3.3.2 MARKTENTWICKLUNG WESENTLICHER ANTRIEBSSTRANGKOMPONENTEN

Um einen Überblick über mögliche Veränderungen im globalen Marktvolumen (auf Basis der Herstellkosten) hinsichtlich der einzelnen sensitiven Komponenten vom heutigen Stand zum Jahr 2020 zu ermöglichen, wurden die aktuellen und zukünftig möglichen Absatzzahlen für Automobile bezogen auf das jeweilige Antriebskonzept herangezogen (siehe hierzu Kapitel 2.4.1) und mit den ermittelten Komponentenkosten (heute/zukünftig) der jeweiligen Fahrzeugkonzepte multipliziert. Die Differenz des heutigen »Marktvolumens« einer Komponente mit der zukünftigen Abschätzung ergibt die Veränderung des Marktes der jeweiligen Komponente und lässt damit Rückschlüsse auf Beschäftigungseffekte in diesem Bereich zu. Diese globalen Effekte werden an

43 Eigene Darstellung

schließend unter Berücksichtigung der internationalen Positionierung Baden-Württembergs in der Automobilindustrie für das Land heruntergebrochen.[44] Als Definitionsgrundlage wurde eine Auswahl von Fahrzeugmodellen (bereits am Markt erhältliche oder angekündigte Modelle) gewählt. Aufgrund der noch begrenzten Marktprognosen bezüglich der Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2020 wurde diese Antriebsart nicht für die Berechnung herangezogen.
Die Datenbasis konnte im Vergleich zur Vorstudie (2009/2010) weiter ausgebaut werden. Dennoch erschweren die unterschiedlichen Abschätzungen hinsichtlich der Kostenentwicklung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten sowie die unterschiedlichen Prognosen bezüglich der Marktentwicklungen eine detailliertere Aussage. Während zum Zeitpunkt der ersten Studie (2009/2010) ein eher zurückhaltendes Bild bezüglich der Absatzzahlen im Jahr 2020 abgebildet wurde, so zeigen die im Rahmen der Strukturstudie 2011 untersuchten Marktszenarien im Schnitt höhere Absätze auf. Der hierbei zugrunde liegende Wert für das Jahr 2020 liegt bei 87 Mio. verkauften Fahrzeugen.

Bei der konventionellen Technologie des Verbrennungsmotors kann im Jahr 2020 noch mit einem Marktzuwachs von gut 3,3 Mrd. Euro gerechnet werden. Neben den unwesentlich höheren Absatzzahlen von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor findet die Wärmekraftmaschine auch Einsatz in Hybridfahrzeugen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass sich ein Trend zu kleineren Motoren (nicht nur in Hybridfahrzeugen) abzeichnet.

Durch die Bestrebungen, eine erhöhte Kraftstoffeffizienz zu erzielen und den Anforderungen nach schadstoffärmeren Antrieben gerecht zu werden, können Optimierungen rund um den Verbrennungsmotor (Effizienztechnologien) im Jahr 2020 deutlichen Marktzuwachs generieren. Bei den Benzinmotoren ist demnach eine Steigerung der Kraftstoffeffizienz bis 2020 um bis zu 30 Prozent denkbar (bei Mehrkosten von bis zu 50 Prozent), bei Dieselmotoren um bis zu 20 Prozent (bei Mehrkosten von bis zu 15 Prozent) [McKinsey (2011); BCG (2011); Electrification Coalition (2010)]. Das Umweltbundesamt beziffert die Herstellmehrkosten auf 281 bis 329 Euro bei einer angenommenen CO_2-Einsparung von 20 Prozent am Otto-Motor [Umweltbundesamt (2008)]. Optimierungspotenzial bei den sogenannten Effizienztechnologien bieten hierbei Ansätze wie Direkteinspritzung, Motor-Downsizing, Turboaufladung, variables Verdichtungsverhältnis oder Zylinderabschaltung. Zusätzlich können durch Start-Stopp-Systeme oder eine verbesserte Auslegung des Kühlkreislaufs weitere Einsparungen erreicht werden [Mock (2010); Universität Stuttgart (2009)]. Diese Entwicklungen führen dazu, dass in diesen Bereichen im Jahr 2020 eine Steigerung des Marktvolumens um 25,1 Mrd. Euro erfolgen kann.

Im Zusammenhang mit der Wärmekraftmaschine kann das Abgassystem im Zeitraum bis 2020 ebenfalls einen Zuwachs im Marktvolumen generieren. Als Richtwerte können hierbei Mehrkosten von 50 Euro (Benziner) und 210 Euro (Diesel) für eine Einhaltung der Emissionsgrenzen der kommenden Euro-6-Norm (Basis EURO 5), welche im Jahr 2015 für PKW-Hersteller verbindlich wirkt, angenommen werden. Für 2020 ist eine erneute Reduzierung des CO_2-Ausstoßes von 130 Gramm CO_2/km auf den angestrebten Zielwert von 95 Gramm CO_2/km angesetzt, was zu erneuten Mehrkosten in der Herstellung führen wird [Mock (2010); Robert Bosch (2011); Umweltbundesamt (2011)]. Die Notwendigkeit einer Abgasanlage in den Hybridkonzepten des seriellen, Plug-in sowie parallelen Hybridfahrzeugs führt zudem zu einem Zuwachs des Marktvolumens. Insgesamt ergibt sich bei dieser Komponente eine positive Veränderung von rund 11,3 Mrd. Euro im Jahr 2020.

Getriebe werden weiterhin eine starke Position einnehmen und ebenfalls eine deutliche Steigerung im Marktvolumen von circa 18 Mrd. Euro im Jahr 2020 erreichen. Zum einen werden weiterhin effizienzoptimierte Getriebe für Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor entwickelt und zum anderen wird auch eine Vielzahl an teils sehr aufwendigen Hybridgetrieben im Markt benötigt. Insbesondere Hybridgetriebe nehmen aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen bisher eine untergeordnete Position ein und stellen bis 2020 ein deutliches Wachstumspotenzial dar.

In der Gruppe Nebenaggregate wurden auch die Komponenten Lenkung (elektrischer Kompressor für elektrohydraulische und Komponenten für elektromechanische Lenkung) sowie die Klimatisierung berücksichtigt. Hierbei wird deutlich, dass Nebenaggregate weiter elektrifiziert werden, um bessere Verbrauchswerte bei reinen Verbrennungsfahrzeugen oder Hybriden zu erzielen. Dies führt wiederum zu höheren Kosten und damit zu steigendem Marktvolumen (Veränderung +14,7 Mrd. Euro). Die Lichtmaschine wird bei einem Hybridfahrzeug durch den vorhandenen Generator ersetzt und kann, bedingt durch die prognostizierte Marktentwicklung, weniger stark zulegen. Auch bei der Starterbatterie werden nur marginale Zuwächse erwartet.

44 Im zugrunde liegenden Modell wurden bewusst die Herstellkosten zur Berechnung des »Marktvolumens« angesetzt. Zum einen schwanken die Mark-up-Kosten, welche für die Bestimmung der tatsächlichen Umsätze zu den Herstellkosten addiert werden müssten studienspezifisch, und zum anderen ist davon auszugehen, dass die Mark-ups neuer Antriebsstrangkomponenten von denen der konventionellen Komponenten abweichen.

Die elektrische Maschine als Kernstück des elektrifizierten Antriebsstrangs kann im Jahr 2020 ein starkes Marktvolumen generieren. Der Zuwachs beläuft sich hierbei auf rund 18,4 Mrd. Euro, was zum einen auf die zunehmende Hybridisierung und zum anderen auf den prognostizierten Anteil rein batterieelektrischer Fahrzeuge von über 5 Prozent am globalen Absatz im Jahr 2020 zurückzuführen ist.

Bei den Komponenten der Leistungselektronik und der sonstigen Elektronik können im Zuge der Elektrifizierung des Fahrzeugs ein deutlicher Umsatzzuwachs von rund 13 Mrd. Euro (Leistungselektronik) sowie 5,1 Mrd. Euro (sonstige Elektronik) angenommen werden. Auch der Markt für Ladegeräte wird ebenfalls stark wachsen (+ 4,7 Mrd. Euro).

Die Batterietechnologie liegt mit einem Zuwachs von fast 60 Mrd. Euro im Jahr 2020 vor den Effizienztechnologien auf Platz eins der Profiteure des Trends zum energieeffizienten Automobil. Hierbei soll aber darauf verwiesen werden, dass die relativ geringen Absatzzahlen heutiger Hybrid- und rein batteriebetriebener Fahrzeuge im Verhältnis zu den prognostizierten Absatzzahlen im Jahr 2020 sowie der relativ hohe Wertanteil des gesamten Batteriesystems eine starke Veränderung im globalen Marktvolumen bewirken.

Weltweit entsteht somit (unter den getroffenen Annahmen) bei den betrachteten Komponenten (auf Basis der Herstellkosten) eine Veränderung des Marktvolumens von rund 175 Mrd. Euro. Über die Hälfte dieses Zuwachses entfällt im Jahr 2020 auf rein »elektrifizierte Komponenten« (Leistungselektronik, E-Maschine, Batteriesystem, Ladegerät).

3.3.3 KONSEQUENZEN FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Im Folgenden sollen die zu erwartenden Veränderungen im globalen Markt und deren Auswirkungen auf den Standort Baden-Württemberg untersucht werden. Unter der Prämisse, dass die baden-württembergischen Unternehmen der Automobilindustrie auch im Jahr 2020 denselben Marktanteil von rund 6 Prozent am weltweiten Umsatz besitzen, werden die daraus resultierenden Beschäftigungseffekte dargestellt. Basierend auf den Prognosen, dass der Verbrennungsmotor und die

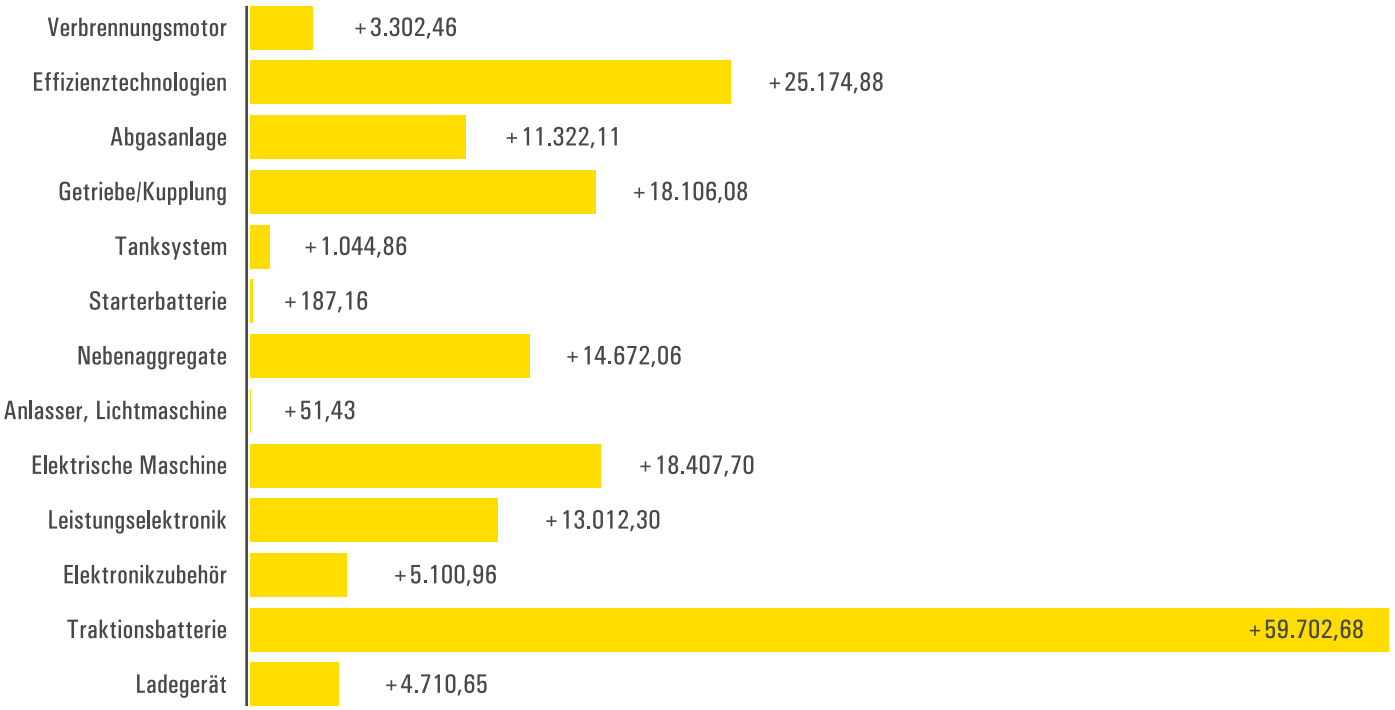


Abbildung 36: Änderung globales Marktvolumen: Aktuell - 2020 [in Mio. Euro][45]

45 Eigene Darstellung

damit verbundenen Komponenten und Technologien bis zum Jahr 2020 noch einen deutlich höheren Anteil am gesamten Marktvolumen ausmachen werden als die »neuen Antriebskomponenten«, kann diese Annahme plausibel begründet werden. Aussagen über Markt- und Beschäftigungsentwicklungen über das Jahr 2020 hinaus werden nicht getroffen. Es soll aber darauf hingewiesen werden, dass bereits durch eine Steigerung der Marktanteile von rein batterieelektrischen Fahrzeugen von rund 5 Prozent auf 15 Prozent (bei gleichzeitiger Abnahme von 10 Prozent im Bereich der Verbrenner) im zugrunde liegenden Berechnungsmodell deutliche Abstriche beim Zuwachs konventioneller Komponenten und somit auch geringere Beschäftigungseffekte in diesen Bereichen hervorrufen würde.

Der Fokus der Betrachtung liegt auf den Komponenten des Antriebsstrangs. Potenzielle Beschäftigungseffekte, welche sich im Kfz-Handwerk oder auch im automobilbezogenen Dienstleistungssektor ergeben könnten, wurden nicht untersucht. Die Berechnung der Arbeitsplatzeffekte wurde mithilfe der Kennzahl des Vollzeitäquivalents (VZÄ = 100 Prozent Beschäftigungsgrad) vorgenommen. Der hierfür angenommene Wert liegt bei 400.000 €/VZÄ.[46] Eine Zusammenfassung wurde bei den Komponenten Verbrennungsmotor (Verbrennungsmotor und Tanksystem), Nebenaggregate (+ Anlasser und Lichtmaschine), Leistungselektronik (LE, E/E und Ladegerät) und Traktionsbatterie (Traktionsbatterie und Starterbatterie) vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 zusammenfassend dargestellt.

Dem klassischen Verbrennungsmotor wird bis 2020 noch eine große Bedeutung beigemessen. Für Baden-Württemberg ist in diesem Bereich ein Anstieg des Marktvolumens von circa 240 Mio. Euro zu erwarten, was allerdings nur noch einem jährlichen Zuwachs von gut einem halben Prozentpunkt entspricht. Deutliche Zugewinne von nahezu 1,4 Mrd. Euro im Jahr 2020 können die Effizienztechnologien auf sich vereinen. Bei dem angenommenen Wert von 400.000 €/VZÄ entspräche der Zuwachs in diesen beiden Bereichen rund 4.060 Vollzeitarbeitsplätzen.[47] Auch bei den Komponenten Abgasanlage (+0,62 Mrd. Euro bzw. 1.560 VZÄ), Getriebe (+1,0 Mrd. Euro bzw. 2.490 VZÄ) sowie verbrauchsoptimierte oder modifizierte Nebenaggregate (+0,81 Mrd. Euro bzw. 2020 VZÄ) bietet das steigende Absatzvolumen ein deutliches Beschäftigungspotenzial für Baden-Württemberg.

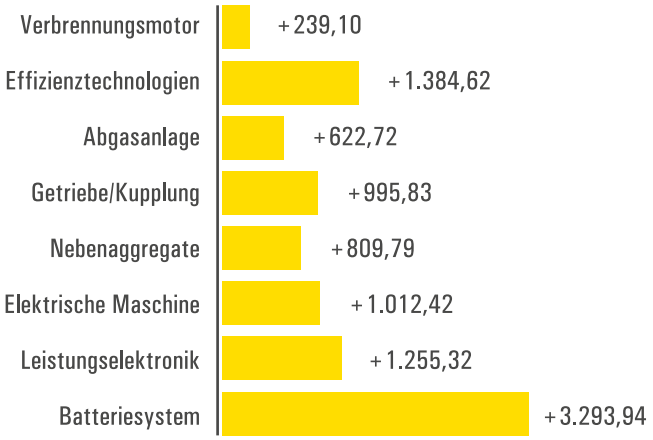


Abbildung 37: Änderung Marktvolumen für Baden-Württemberg: Aktuell - 2020 [in Mio. Euro][48]

Komponenten, die durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs Anwendung finden, wie die der elektrischen Maschine (+1,0 Mrd. Euro), die Leistungs- bzw. sonstige Elektronik (+1,26 Mrd. Euro) oder das Batteriesystem (+3,3 Mrd. Euro) können von den prognostizierten Entwicklungen profitieren und ein attraktives Wachstum generieren. Unter der Annahme, dass Rohstoffe die einzige importierte Vorleistung darstellen, ergeben sich für die Komponenten unterschiedliche maximale Wertschöpfungsanteile, welche erreicht werden können [McKinsey (2011b)]. Im Bereich der elektrischen Maschine würde sich dies bei einem maximal möglichen Wertschöpfungsanteil von 50 Prozent in einem Beschäftigungseffekt von rund 1.270 Vollzeitäquivalenten niederschlagen. Bei der Leistungselektronik entstünden 2.820 Vollzeitarbeitsplätze (bei einem maximalen Wertschöpfungsanteil von 90 Prozent). Das Batteriesystem (Batteriezelle sowie Batterieintegration) kann bei einem angenommenen Wertschöpfungsanteil von rund 70 Prozent einen Effekt von 5.760 Vollzeitäquivalenten ausweisen.

Nahezu die Hälfte der ausgewiesenen Arbeitsplatzpotenziale steht somit im Jahr 2020 in einem eindeutigen Bezug zu der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, und zwar durch neue Komponenten wie die elek-

46 Für die Berechnung wurde gemäß der amtlichen Statistik ein Querschnitt über das Verhältnis von Umsatz zu Beschäftigtenzahl beteiligter Wirtschaftszweige (WZ) im Produktionscluster gebildet (siehe hierzu auch Abbildung 33). Hierbei wurden die Wirtschaftszweige »Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen« (direkter Automobilbau ; WZ-Nummer 29), »Herstellung von chemische Erzeugnissen« (WZ-Nummer 20), »Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren« (WZ-Nummer 22), »Herstellung von Metallerzeugnissen« (WZ-Nummer 25), »Herstellung von elektrischen Ausrüstungen« (WZ-Nummer 27) und »Maschinenbau« (WZ-Nummer 28) mit den jeweiligen etwaigen Anteilen der Beschäftigten innerhalb der Automobilwirtschaft herangezogen. Die Umrechnung ausgewiesener Arbeitsplätze zu Vollzeitäquivalenten wurde durch eine interne Berechnung berücksichtigt. Etwaige Substitutions- oder Verlagerungseffekte wurden nicht berücksichtigt. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011a) I Kinkel (2007).

47 Ein anderer Ansatz zur Berechnung der Beschäftigungseffekte kann über die Bestimmung der deutschen bzw. baden-württembergischen Wertschöpfungsanteile an den einzelnen Komponenten erfolgen.

48 Eigene Darstellung

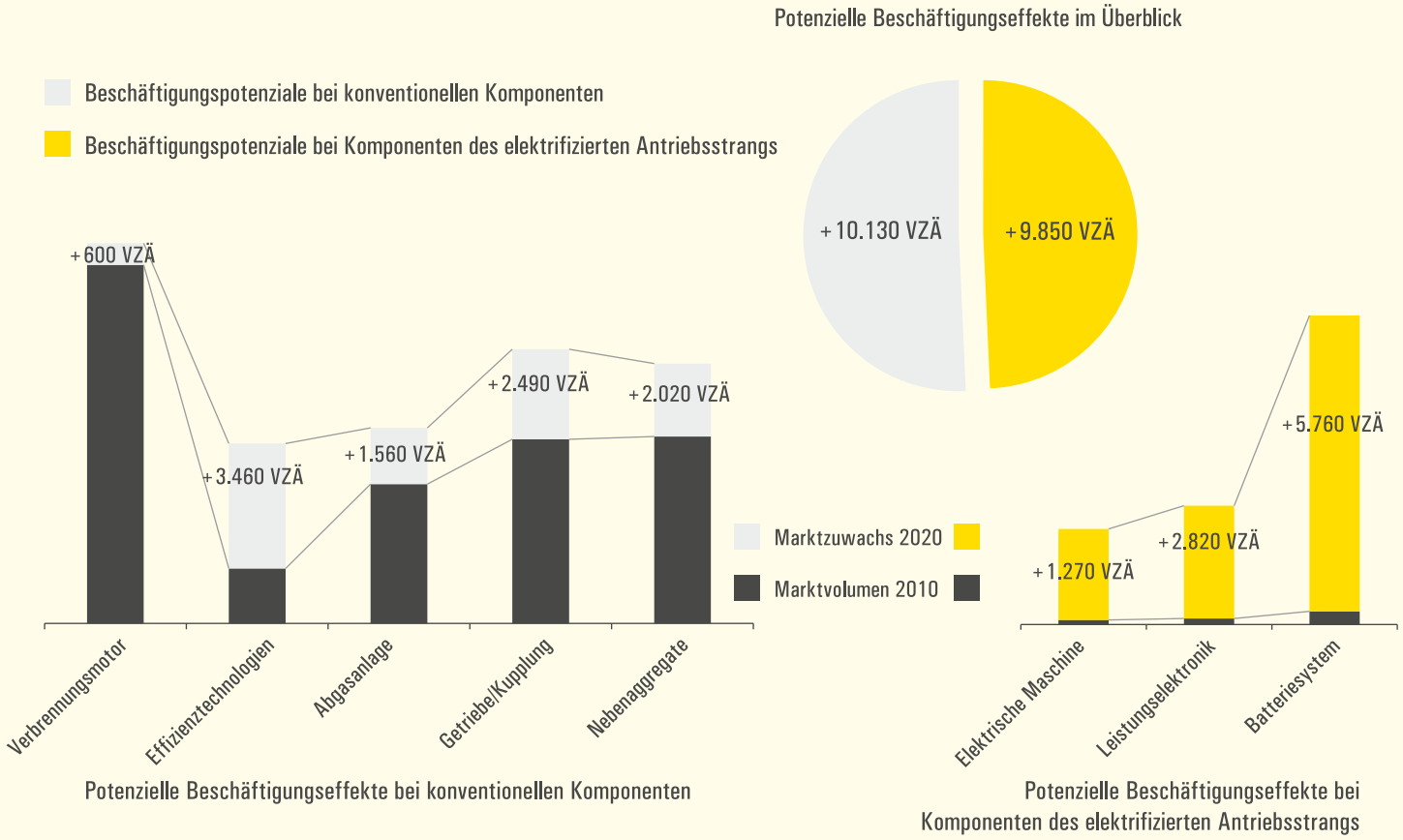


Abbildung 38: Potenzielle Beschäftigungseffekte in Baden-Württemberg im Jahr 2020[49]

trische Maschine, die Leistungselektronik oder das Batteriesystem (siehe Abbildung 38).

Da Baden-Württemberg heute als Technologieführer beim Verbrennungsmotor gilt, stellt sich nun die Frage, inwieweit die im Rahmen der Untersuchung ausgewiesenen Arbeitsplatzpotenziale, die in den »neuen« Komponenten liegen, zukünftig ausgeschöpft werden können und ob der bestehende Weltmarktanteil baden-württembergischer Unternehmen weiterhin realisiert werden kann.
Die derzeitige Situation bei der geplanten Herstellung von elektrischen Maschinen lässt vermuten, dass ein Großteil dieser Komponenten unter Umständen nicht in Baden-Württemberg hergestellt wird. Das neu gegründete Joint Venture zwischen den baden-württembergischen Unternehmen Bosch und Daimler wird voraussichtlich im Jahr 2012 die Herstellung von Elektromotoren für den automotive Bereich in Hildesheim, Niedersachsen aufnehmen [Automobil Produktion (2011c)]. Auch im Bereich hochwertiger Automatik- und Hybridgetriebe wird beispielsweise das Unternehmen ZF Group seine Investitionen im Ausland erhöhen, um den dortigen Marktanforderungen gerecht zu werden [Automobil Produktion (2011d)].

49 Eigene Darstellung

Bei der Herstellung von Batteriezellen gilt es zu beachten, dass das Land Baden-Württemberg derzeit noch über keine großskalige Zellfertigung im Bereich Traktionsbatterie verfügt. Laut einer Studie von Roland Berger sollen aber bereits im Jahr 2015 Überkapazitäten in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien vorherrschen. Die Herstellung dieser Komponente wird dann von wenigen großen Unternehmen übernommen und es wird eine Konsolidierung des Marktes eintreten [Roland Berger (2011a)].

Trotz diesen Abschätzungen wird vor allem bei einer Fortschreibung über die Jahre 2030 und 2040 hinweg deutlich, dass in der Traktionsbatterie die maßgebliche Wertschöpfung der zukünftigen Automobilindustrie liegt. Für die Unternehmen im Land Baden-Württemberg stellt sich die Frage, in welchen Bereichen vermehrt Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenziale ausgeschöpft werden. Eine verstärkte Ausrichtung im Bereich der Zellfertigung oder eine Konzentration auf beispielsweise Kühl-, Packaging- und Systemkonzepte und damit auf die Herstellung und Integration des Gesamtsystems stellen mögliche Alternativen dar.

»Risiken bestehen darin, dass die Wertschöpfungskette nicht in Baden-Württemberg aufgebaut wird oder wenn dann erst zu spät, oder dass Investitionen nicht getätigt werden können, solange die Richtung für Zulieferer nicht klar ist (Stückzahlen, Aufgabengebiete etc.).«

Sebastian Wider, Geschäftsführer SW-Engineering Services, SW-Engineering GmbH

»Insgesamt sind die kleinen Automobilzulieferer auf der zweiten und den folgenden Stufen der Zulieferkette noch zu wenig einbezogen. Es fehlt an Information und vor allem Bewusstsein für die alternativen Antriebstechnologien. Es muss ein besserer Informationsfluss zwischen den kleinen Zulieferern und den OEMs zustande kommen, der in notwendiger Form noch nicht gegeben ist.«

Manfred Müller, Referatsleiter Abteilung Industrie und Verkehr, IHK Region Stuttgart

3.4 DIE PRODUKTIONSTECHNIK ALS SCHLÜSSELFAKTOR IM WETTBEWERB

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 eine Spitzenposition im globalen Wettbewerb einzunehmen. Dabei ist das Erreichen einer hohen Wertschöpfungstiefe eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Schaffung von Arbeitsplätzen. Weiterhin kann auch durch die Planung und Installation von Produktionsanlagen durch im Land ansässige Unternehmen und die im Laufe der betrieblichen Nutzung der Einrichtungen erforderlichen Optimierungen erhebliche Wertschöpfung generiert werden.

»Lohnintensive Produktion ist in Deutschland immer schwierig. Aber genau darin besteht die Herausforderung für die Produktionsforschung, nämlich durch innovative Ansätze die wesentlichen Elemente der Wertschöpfungskette wettbewerbsfähig am Hochlohnstandort produzieren zu können.«

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Institutsleitung wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

»Die Industrialisierung der neuen Komponenten für den elektromobilen Antriebsstrang stellt eine zentrale Herausforderung dar, um Baden-Württemberg neben der weiteren Stärkung als Technologiestandort auch als Produktionsstandort für Elektromobilität so weit wie möglich stark zu machen.«

Dr. Jürgen Dispan, Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter, IMU Institut

Dabei sind sich Experten aus Forschung und Industrie weitestgehend darüber einig, dass die Produktion »neuer« Komponenten wie der Traktionsbatterie (Batteriezellen sowie Batteriesystem), der elektrischen Maschine, der Leistungselektronik, aber auch die der Brennstoffzelle in Deutschland bzw. in Baden-Württemberg angesiedelt werden sollte.[50] Hier gilt es neben der rein wirtschaftlichen Betrachtung auch den Aspekt der Produktdifferenzierung als strategischen Wettbewerbsvorteil deutscher bzw. baden-württembergischer Hersteller ge-

50 Kampker (2011) I Experteninterview Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza I Experteninterview Jürgen Jost I Experteninterview Dr. Andreas Gutsch

genüber ausländischen Konkurrenten zu beachten. Zukünftig können beispielsweise eine hochwertige Leistungselektronik, besonders leistungsstarke Traktionsbatterien oder innovative Entwicklungen an der elektrischen Maschine den bisherigen Ruf exzellenter Ingenieurskunst aus Baden-Württemberg im Bereich der Premiumfahrzeuge sichern.

»Die OEM und Zulieferer in Baden-Württemberg haben immer eine Vorreiterrolle bei Fahrzeugentwicklung und Produktionsprozessen eingenommen. Auch bei der Herstellung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten ist sehr viel Kompetenz vorhanden, die gezielt ausgebaut wird.«

Jürgen Jost, Bereichsleiter Forschung und Entwicklung, Dürr Systems GmbH

Aspekte wie der sehr hohe Wertanteil der Komponenten, aber auch ein möglichst hoher Automatisierungsgrad bei Fertigungs- und Montageprozessen (unter Voraussetzung großer Stückzahlen) bieten generell gute Voraussetzungen für eine Regionalisierung und somit für eine Herstellung wesentlicher Antriebsstrangkomponenten am Standort Baden-Württemberg. Dabei ist aber zu beachten, dass zukünftig eine optimale Ausrichtung des gesamten Produktionsnetzwerks zwischen allen Beteiligten innerhalb der Wertschöpfungskette erforderlich ist. Nur so lassen sich durchgängig wettbewerbsfähige Strukturen mit den Vorzügen einer Reduzierung von Logistik- und Zollaufwendungen, aber auch die Einhaltung wichtiger Qualitäts- und Sicherheitsstandards erzielen.

»Um eine wettbewerbsfähige Produktion errichten zu können, muss sich BW den Gepflogenheiten der neuen Bundesländer anpassen, die massiv mit Landesgeldern nachhelfen (welche zum Teil 25 Prozent der Investitionssummen darstellen).«

Dr. Andreas Gutsch, Projektleitung Competence E am KIT, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

DIE HERSTELLUNG DER KOMPONENTEN

Mit dem Aufbau einer Pilotproduktionsanlage für Lithium-Ionen-Batterien in Ulm ist der erste Grundstein zur Erarbeitung wirtschaftlicher Lösungen im Bereich der Batterieherstellung gelegt. Die Zellfertigung in der künftigen Anlage soll den beteiligten Unternehmen und deutschen Forschungseinrichtungen, die Lithium-Ionen-Zellen entwickeln, als zentrale Anlaufstelle und Dialogmöglichkeit dienen. 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 [BMBF (2011)]. 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 [Lanza (2011a)].

Bei der Herstellung der elektrischen Maschine bietet die Automatisierung von Prozessschritten Potenzial, um wirtschaftliche Fortschritte zu erzielen und sich somit von einer Produktion in Niedriglohnländern zu distanzieren. Im diesem Bereich können vor allem Maschinen- und Anlagenbauer mit innovativer Produktionstechnik unterstützend mitwirken. Gerade die starke Position Baden-Württembergs im Maschinen- und Anlagenbau muss als wesentlicher Standortvorteil genutzt werden. Mit über 50 Prozent 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 weiter ausgebaut werden müssen [VDMA (2011)].

Die Leistungselektronik dient als wesentlicher Baustein im elektrifizierten Antriebskonzept, wenn es darum geht, eine optimale Verbindung zwischen Batterie und Antriebsstrang herzustellen. Die Herstellung der einzelnen Komponenten wie Leistungsmodul, Folienkondensator oder Steuerelektronik erfordern hierbei jedoch enormes Wissen und Erfahrung in der Halbleitertechnik und im Hochvoltbereich. Zwar können Unternehmen wie Robert Bosch, Kolbenschmidt Pierburg oder Valeo gemäß einer Recherche des Fraunhofer ISI bereits dokumentierte Aktivitäten im Bereich der Leistungselektronik aufweisen, dennoch liegt der Fokus baden-württembergischer Zulieferfirmen verstärkt auf den Aktivitätsfeldern »Traktionsbatterie« und »Klimatisierung des Elektrofahrzeugs« [IHK (2011)]. Zahlreiche Prozessschritte und eine aufwendige Qualitätssicherung erfordern jedoch gerade im Bereich der

Leistungselektronik intelligente, aufeinander abgestimmte Prozesse, welche im Hinblick auf eine mögliche Großserienproduktion ausgearbeitet werden müssen. Gerade hier muss es gelingen, Kompetenzen (nicht nur im Entwicklungsbereich), welche bereits im Land vorhanden sind, wie beispielsweise in der Bahn- und Schienentechnik, für neue Anwendungen elektromobiler Fahrzeugkonzepte zugänglich und nutzbar zu machen.

»Wir haben in Deutschland und insbesondere in Baden-Württemberg eine hervorragende Ausgangssituation, wenn es uns gelingt, bestehende Kompetenzen, welche wir beispielsweise im Bereich der Bahn- und Schienentechnik besitzen, in die Automotive-Welt zu überführen.«

Sebastian Wider, Geschäftsführer SW-Engineering Services, SW-Engineering GmbH

Die Herstellung komplexer Getriebe, wie sie in parallelen bzw. leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen Anwendung finden, kann ebenfalls als Leistungsstärke der deutschen Automobilindustrie und der Hersteller im »Ländle« (z. B. ZF Friedrichshafen AG, Getrag GmbH, Cie KG, LuK GmbH) für den Zukunftsmarkt Elektromobilität gesehen werden. Dabei stehen zu leistende Entwicklungsarbeiten im Bereich der Automatisierung und Erhöhung der Spreizung bzw. Gangzahl im Fokus. Eine Überführung der neuen Konzepte in die Serienproduktion ist gerade aus diesem Gesichtspunkt als große Herausforderung für die nächsten Jahre zu sehen [Automobil Produktion (2011b)].
Zahlreiche Studien prognostizieren auf kurz- bis mittelfristige Sicht einen immer noch sehr hohen Anteil des Verbrennungsmotors als wesentliche Antriebskomponente [vgl. u. A. Dietz (2010); Frost & Sullivan (2010); Roland Berger (2011b)]. Geht man von den derzeitigen Abschätzungen aus, so wird, bedingt durch die parallele Entwicklung unterschiedlicher Antriebskonzepte, die Frage aufgeworfen, inwieweit Synergien in den verschiedenen Antriebssträngen vorhanden sind und inwieweit eine Integration zu Herstellung benötigter Prozesse in die bestehenden Aggregatewerke reibungsfrei ablaufen kann. Hier müssen vor allem effiziente Fertigungsverfahren und Fabrikplanungskonzepte entwickelt werden, welche eine Industrialisierung der Elektromobilität aus produktionstechnischer Sicht ermöglichen [Lanza 2011b)]. Da sich in den nächsten Jahren noch sehr geringe Stückzahlen im Bereich der Elektrofahrzeuge abzeichnen, lassen sich kaum Skaleneffekte erzielen. Ansätze wie die fertigungs- und montagegerechte Produktentwicklung, aber auch die der kostenorientierten Innovationen in der Prozessgestaltung, müssen weiter in den Vordergrund gerückt werden [ATZproduktion (2011)]. Werden bestehende Fahrzeugkonzepte zukünftig nicht mehr nur »modifiziert«, sondern grundlegend neu konzipiert (vgl. conversion vs. purpose design), müssen Aspekte wie Gewicht, Isolation und Beleuchtung im Fahrzeug neu überdacht werden. Ein Materialeinsatz von bisher recht unbekannten Werkstoffen ist hierbei denkbar. Der Großeinsatz von CFK in der Serienfertigung von Strukturteilen, wie bereits im Flugzeugbau der Fall ist, könnte möglicherweise schon in absehbarer Zukunft denkbar sein. Die Auswirkungen auf die Produktion wären hierbei enorm.

BLICK AUF DIE KONKURRENZ NACH ASIEN

Die Volksrepublik China hat die Elektromobilität als einen zu fördernden Sektor eingestuft. Zudem kann das Land auf eine langjährige Erfahrung in der Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus im Consumer-Bereich zurückgreifen. Inwieweit dies für Unternehmen der baden-württembergischen Automobilindustrie eine scharfe Konkurrenz werden könnte, wird sich in absehbarer Zeit herausstellen, da die Entwicklungsrichtungen in diesem recht neuen Anwendungsfeld der Elektromobilität noch nicht vollständig erschlossen sind.

»Um in Deutschland und Baden-Württemberg einen Leitmarkt für Elektromobilität etablieren zu können und um das Ziel ›Leitanbieter‹ weiter verfolgen zu können, ist der Aufbau einer Produktion von leistungsfähigen, kostengünstigen und gleichzeitig sicheren Batterien im Land notwendig. Besonders bei der Zellproduktion besteht in Deutschland enormer Nachholbedarf im Vergleich zu Asien. Ein Indikator dafür sind die Patentanmeldezahlen. So wird beim chinesischen Patentamt ein Mehrfaches an Patenten im Bereich Batterietechnik angemeldet als in Deutschland.«

Manfred Müller, Referatsleiter Abteilung Industrie und Verkehr, IHK Region Stuttgart

Weiter muss beachtet werden, dass die Streuung der Batteriequalität derzeit noch sehr hoch ist, was eine Neuaufstellung der Produktion notwendig macht. Zudem stellen Sicherheitsanforderungen in der Batterieherstellung weitere Herausforderungen dar, welche erst durch innovative Ansätze aus produktionstechnischer Sicht auf dem Weg zu einer wirtschaftlichen Produktion gelöst werden müssen.

3.5 AUSBILDUNG UND QUALIFIZIERUNG

Mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs gehen auch veränderte Anforderungsprofile an die Qualifizierung der Mitarbeiter einher. Dies betrifft sowohl den Forschungs- und Entwicklungsbereich als auch die Produktion, den Vertrieb und das After Sales. Die Arbeitsgruppe 6 der Nationalen Plattform Elektromobilität hat sich in ihrer Arbeit mit dem durch die Elektromobilität induzierten Qualifizierungsbedarf auseinandergesetzt [NPE AG6 (2010)]. Dabei wurde festgestellt, dass insbesondere ein großer Bedarf an der Vernetzung aller Akteure der akademischen und beruflichen Bildung besteht. Als Konsequenz wurde das Projekt »Qualifizierungsplattform für die Aus- und Weiterbildung in der Elektromobilität« (QEMO), koordiniert durch die Universität Ulm und unter Mitarbeit des Weiterbildungszentrums Brennstoffzelle e.V. (WBZU), initiiert und mit 1,1 Mio. Euro durch das BMBF gefördert [Universität Ulm (2011)]. Inhalt des Projekts ist der Aufbau und Unterhalt einer Vernetzungsplattform mit dem Ziel, Ausbildungs- und Lerninhalte im Bereich Elektromobilität branchenübergreifend zu vernetzen. Neben der Vernetzung der Akteure sieht die NPE in der Intensivierung der vorwettbewerblichen Forschung an den Hochschulen ein wichtiges Mittel, um die praxisorientierte Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sicherzustellen und zur Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft beizutragen [NPE (2011a)].

Am 28. und 29. Juni stellte die AG 6 auf der Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität in Ulm ihre Analysen zur Diskussion [Göschel (2011)]. In den Diskussionen und Vorträgen [Qemo (2011)] der Konferenz wurde deutlich, dass mit der Elektromobilität neue Kompetenzanforderungen an die Mitarbeiter gestellt werden. So sind generell eine größere Interdisziplinarität, ein Verständnis des Gesamtsystems sowie ein Denken über Branchengrenzen hinweg gefragt. Auch die erforderlichen technischen Kompetenzen erweitern sich um Kenntnisse in Feldern wie der Leistungselektronik, der Elektrochemie, der Batterietechnik, den elektrischen Maschinen, den Hochvolt-Systemen etc. Ist man versucht, bei all den neuen erforderlichen Kompetenzen und Kenntnissen die Einrichtung neuer Studiengänge und Ausbildungsberufe zu fordern, so sind sich die Teilnehmer der Konferenz weitgehend einig, dass dies nicht zielführend ist. Sowohl sind die zur Verfügung stehenden Berufsbilder geeignet, neue Ausbildungsmodule zu integrieren, als auch die etablierten Studienfächer passend, um über eine Anpassung der Studieninhalte und die Vernetzung und Kombination bestehender Fächer die neuen Qualifikationsanforderungen zu erfüllen. Diese Integration der durch die Elektromobilität induzierten Qualifizierungsbedarfe in die bestehenden Linien der akademischen und beruflichen Ausbildung ist auch vor dem Hintergrund konsequent, dass über die nächsten Jahrzehnte verbrennungsmotorische, hybride und elektrische Antriebs- und Fahrzeugkonzepte koexistieren werden.

Während in der akademischen und beruflichen Ausbildung weniger neue Angebote geschaffen als vielmehr bestehende Angebote modifiziert werden müssen, stellt sich die Situation im Bereich der Weiterbildung anders dar. So wird die Umsetzung der neuen Inhalte in den Ausbildungsberufen und Studienfächern noch einige Zeit in Anspruch nehmen, und die entsprechenden Absolventen stehen dem Arbeitsmarkt dann erst 3 bzw. 5 Jahre später zur Verfügung. Mit auf den Qualifikationsanforderungen entsprechenden, regulär ausgebildeten Akademikern und Ausgebildeten in ausreichender Anzahl kann die Industrie somit erst 2017–2020 rechnen. Mindestens bis dahin sind zwingend Weiterbildungsangebote, berufsbegleitend und in Vollzeit, notwendig. Hiervon ist insbesondere der Umgang mit Hochvoltsystemen betroffen. Sowohl die Mitarbeiter in der Produktion und im After Sales, aber auch die Forscher und Entwickler in den Unternehmen und Forschungseinrichtungen sind im sicheren Umgang mit den teil- oder vollelektrischen Fahrzeugen zu schulen, um Unfälle zu vermeiden. Aufgrund der Heterogenität des Anbieterspektrums und der damit einhergehenden Vielfalt der Qualifizierungsangebote ist insbesondere bezüglich sicherheitskritischer Qualifizierungsmaßnahmen eine Standardisierung von Qualifizierungsinhalten und -abschlüssen erforderlich.

»Wenn man die Wertschöpfungskette geschlossen halten möchte, ist es wichtig, dass man das Fachkräftethema vorantreibt und eine geeignete Ausbildungskurve erzeugt. Auf der einen Seite braucht man die Akademiker, die Forschung und Entwicklung vorantreiben, auf der anderen Seite, wenn man Leitmarkt und Leitanbieter werden möchte für Technik, Infrastruktur und Produkte im Elektromobilitätsbereich, muss man auch die Ausbildungsberufe im Bereich der Produktion, Wartung und Reparatur im Blick halten.«

Dr. Stefan Senitz, Referent Technologie, Federführung Technologie der Baden-Württembergischen IHKs, IHK Karlsruhe

Kapitel 4

BADEN-WÜRTTEMBERG AUF DEM WEG IN DIE ELEKTROMOBILITÄT

4.1 AKTEURE UND KOMPETENZEN IM BEREICH DER ELEKTROMOBILITÄT

Das Thema »Elektromobilität« wird in Baden-Württemberg auf breiter Ebene diskutiert und aktiv vorangetrieben: Automobilhersteller, Automobilzulieferer, Energieversorger und viele weitere Unternehmen unterschiedlicher Branchen forschen dazu in zahlreichen Projekten von den Grundlagen bis hin zur Anwendung. Neben seinem Status als Automobilland und Technologiestandort ist Baden-Württemberg aber auch in der Forschung- und Entwicklung (FuE) sehr gut aufgestellt. Wichtige Akteure aus der Forschung sind zum Beispiel neben dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Ulm und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) diverse Fraunhofer-Institute sowie die Hochschulen Reutlingen und Esslingen, die Universität Stuttgart und die Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW).

»Vor allem KMU als Zulieferer der Automobilindustrie müssen weiter für die Chancen, aber auch die Risiken des mit dem Thema Elektromobilität einhergehenden Strukturwandels sensibilisiert werden, um für die Zukunft gerüstet zu sein.«

Dr. Stefan Senitz, Referent Technologie, Federführung Technologie der Baden-Württembergischen IHKs, IHK Karlsruhe

Untergliedert nach den Kategorien Gesamtfahrzeug, Batterietechnik, elektrifizierter Antriebsstrang sowie Leichtbau werden im Folgenden Aktivitäten, Akteure und die Positionierung von Baden-Württemberg analysiert. Dabei werden auch die Themen Brennstoffzelle und Ladeinfrastruktur sowie das Thermomanagement im Fahrzeug kurz behandelt. Die Branche der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wurde in dieser Auflistung nicht berücksichtigt, hier sei auf die Studie »Systemanalyse BW^{e} mobil: IKT- und Energieinfrastruktur für innovative Mobilitätslösungen in Baden-Württemberg« verwiesen [Spath (2010)].

4.1.1 GESAMTFAHRZEUG

Im Bereich vollelektrischer und hybrider Elektrofahrzeuge arbeiten die in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmen aktiv an Gesamtfahrzeugkonzepten. Die Aktivitäten der Daimler AG erstrecken sich über das ganze Produktportfolio. Sowohl bei Personenwagen (Mercedes A-, B-, und S-Klasse, Smart fortwo electric drive) als auch bei Nutzfahrzeugen (Vito E-CELL) und Bussen (Atego) werden Hybrid-, Brennstoffzellen- und vollelektrische Konzepte entwickelt. Unter anderem ist die Daimler AG auch in mehreren Flottenversuchen aktiv.

Die Porsche AG hat mit den Modellen Panamera, Cayenne und 918 Spyder mehrere Hybridfahrzeuge entwickelt. Der 918 Spyder soll bald in limitierter Anzahl auf den Markt kommen. Der erste rein elektrische Porsche, der E-Boxster, wird derzeit mit drei Forschungsfahrzeugen in der Modellregion Stuttgart getestet.

Auch die Audi AG entwickelt unter dem Label e-tron hybride und batterieelektrische Fahrzeuge und baut ihren Standort Neckarsulm zum Kompetenzzentrum Elektromobilität aus. Unter anderem die Modelle A6 und A8 hybrid sowie der Sportwagen R8 e-tron werden zukünftig am Standort Neckarsulm gefertigt. Weitere Fahrzeuge, wie der A1 und A2 e-tron, sollen folgen.

Auch KMUs entwickeln Gesamtfahrzeuge. Beispiele sind die ID-Bike GmbH aus Stuttgart mit der Entwicklung des E-Bikes ELMOTO oder die Firma X-Tronic aus Magstadt, die derzeit an einer Neuauflage der Schwalbe, der sogenannten E-Schwalbe arbeitet.

4.1.2 BATTERIETECHNIK

»Die Landesregierung braucht einen Demonstrator, der zeigt, dass man auch automotive Zellen in Baden-Württemberg herstellen kann.«

Dr. Andreas Gutsch, Projektleitung Competence E am KIT, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Baden-Württemberg ist in der Batterietechnik besonders im Bereich Forschung und Entwicklung in einer guten Ausgangsposition. Der Forschungsstandort Ulm hat sich mit dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), der Universität Ulm und dem Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung zu einem Zentrum der Batterieforschung entwickelt.
Das ZSW beschäftigt sich, von der Entwicklung neuer Speichermaterialien über die Systemtechnik und Modellierung bis hin zu Batte-

riesystem- und Sicherheitstests, mit einem breiten Spektrum an Fragestellungen zur Energiespeicherung in Batterien und Superkondensatoren [ZSW (2011a)]. Im Herbst 2011 wurde am ZSW das neue Forschungszentrum und Labor »eLaB« eingeweiht. Das mit Landes- und Bundesmitteln geförderte eLaB soll den Aufbau einer regionalen Batterieindustrie stärken und Lücken in der Wertschöpfungskette schließen. Darauf aufbauend soll ab 2011 mit der Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und des Landes Baden-Württemberg eine Pilotproduktionsanlage für Lithium-Ionen-Batterien in Ulm entstehen [BMBF (2011a)]. Neben der Mitarbeit in der Innovationsallianz »Lithium Ionen Batterie LIB 2015« [LIB2015 (2011)] ist das ZSW auch am »Elektrochemie Kompetenz-Verbund-Süd« mit weiteren Forschungseinrichtungen aus Baden-Württemberg, wie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der Universität Ulm, dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung sowie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart beteiligt.
Im »Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterie (KLiB)«, das vom ZSW koordiniert wird, haben sich inzwischen 29 Unternehmen und Forschungseinrichtungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien zusammengeschlossen.

»In Baden-Württemberg sind fast alle Hersteller von Produktionsanlagen für Lithium-Ionen-Batterien ansässig und bearbeiten damit das kritische Schlüsselthema für eine Fertigung von Batterien in Deutschland. Vor allem sind dies Mittelständler, die im Anlagenbau Erfahrung haben, weltweit aktiv sind und damit Baden-Württemberg stark machen.«

Prof. Dr. Werner Tillmetz, Mitglied des Vorstandes - Elektrochemische Speichertechnologien, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

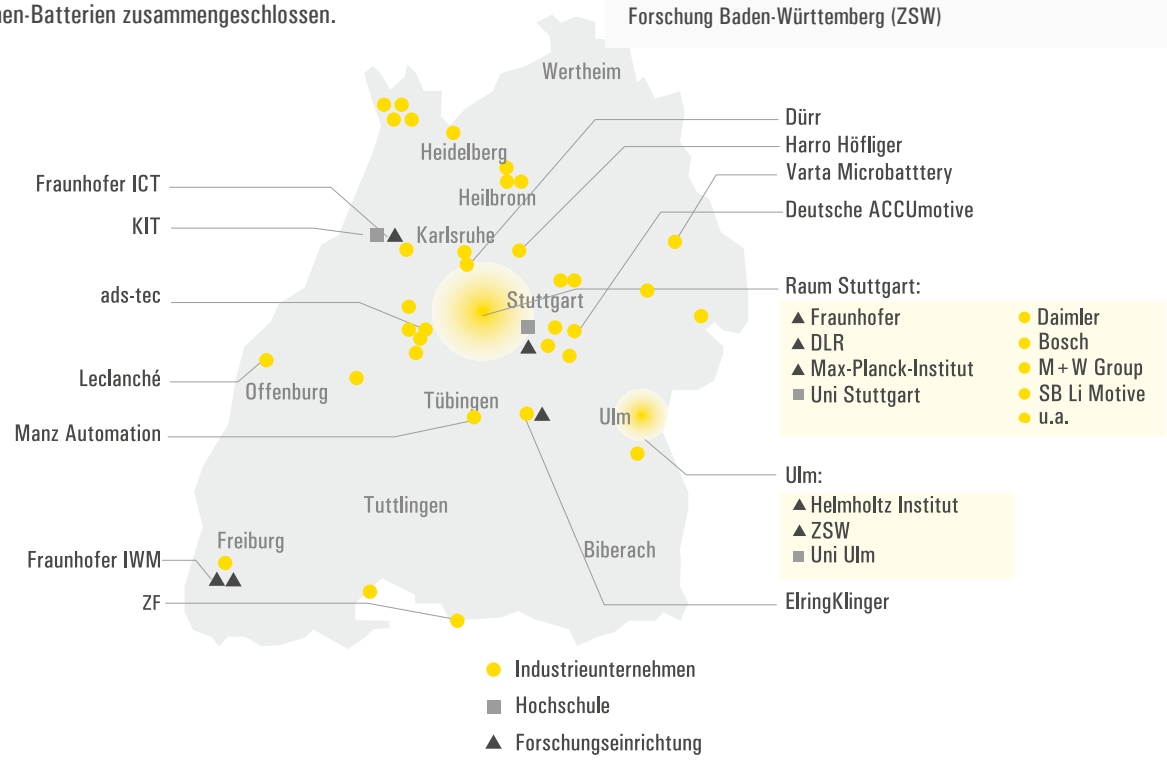


Abbildung 39: Auswahl von Akteuren im Bereich Batterietechnik[51]

51 Eigene Darstellung

Eine weitere Stärkung des Technologiestandortes Ulm wird mit der Gründung des neuen Helmholtz-Instituts Ulm für elektrochemische Energiespeicherung (HIU) durch das KIT in Kooperation mit der Universität Ulm vorangetrieben und der systematische Kompetenzaufbau im Bereich Elektrochemie und Batterieforschung in Baden-Württemberg damit fortgesetzt. Angeschlossene Partner sind das DLR sowie das ZSW [BMBF (2011b)].
Darüber hinaus sind auf dem Gebiet der Batterietechnik das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) sowie das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) als Know-how-Träger zu nennen.
Als weiteres Kompetenznetzwerk hat die Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg mit ihren rund 70 Mitgliedern aus den Bereichen Wissenschaft, Industrie und Verwaltung das Ziel, die Entwicklung und Umsetzung von marktreifen Produkten voranzubringen.

Neben Forschungseinrichtungen betätigen sich diverse Unternehmen im Bereich der Batterietechnik; eine exemplarische Auswahl von Unternehmen wird im Folgenden vorgestellt.
Die Dürr AG beschäftigt sich mit der Entwicklung von Produktionsanlagen rund um die Fahrzeugbatterie sowie mit Batteriewechselstationen. Als ein weiteres Themenfeld hat die Dürr AG die Zellenherstellung im Blick, wobei Synergien bei der Beschichtung von Elektroden gesehen werden [WRS (2011a)].

Die ads-tec GmbH ist auf Automatisierungstechnik für Batteriemontageanlagen spezialisiert, entwickelt und produziert eigene modulare Hochleistungsenergiespeicher und bietet kundenspezifische Batteriedesigns an [WRS (2011a)]. Zusammen mit anderen Unternehmen wie ZF Friedrichshafen und Continental entwickelt ads-tec im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »Future goes Electric« (FUEL) Komponenten und Herstellungsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien von Nutzfahrzeugen [ADS (2011)].

Die Technologie zur Herstellung von Akkumulatoren und Batteriesystemen ist der Schwerpunkt von Leclanché S.A. mit der Business Unit Leclanché Lithium und ihrem Produktionsstandort in Willstätt. Hier betreibt Leclanché die industrielle Herstellung hochkapazitiver Lithium-Bi-Zellen im Großformat, die Montage hochkapazitiver Zellen (bis 20Ah) sowie Elektrodenbeschichtung, Separatorproduktion und das Qualitätsmanagement [Leclanché S.A. (2011)]. Als weiteres Unternehmen beschäftigt sich die Varta Microbattery GmbH in Ellwangen mit der Forschung und Entwicklung von Lithium-Batterien. Die ElringKlinger AG mit Sitz in Dettingen/Erms setzt auf die Weiterentwicklung ihrer Kompetenzen im Bereich der Batterietechnologie. Systemlösungen zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien werden von der Harro Höfliger Verpackungsmaschinen GmbH angeboten.

Bei der Entwicklung von Fertigungstechnologien zur Batterieherstellung ist die Manz Automation AG zu erwähnen. Im Rahmen der Innovationsallianz »Produktionsforschung für Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilität« will die Manz Automation AG zusammen mit anderen Partnern Fertigungstechnologien erforschen und auf die Anforderungen einer Großserienfertigung übertragen [Baden-Württemberg International (2009)]. Der Stuttgarter Anlagenbauer M+W Group entwickelte ein Konzept für die Planung und den Bau von Lithium-Ionen-Batteriefabriken mit modularer Bündelung der Produktionsprozesse. Einen erster Auftrag zum Bau einer Lithium-Ionen-Batteriefabrik in Finnland wurde 2010 abgeschlossen [M+W Group (2010)].
Zur Bündelung von Kompetenzen sind verschiedene Joint Ventures entstanden, wie SB Li Motive, das Joint Venture der Robert Bosch GmbH und Samsung SDI, welches einen Teil seiner Entwicklung zu Batterie Packs und Batteriesystemen in Stuttgart vorantreibt [SB LiMotive (2011a)].

Ein weiteres Joint Venture, die Deutsche ACCUmotive GmbH & Co. KG mit Sitz in Nabern, besteht zwischen der Daimler AG und Evonik Industries. Ihr Produktionsstandort von Lithium-Ionen-Batteriesystemen befindet sich in Kamenz (Sachsen) in unmittelbarer Nähe zur Li-Tec Battery GmbH.[52]
Die eigentliche Batterieherstellung von der Zelle über das Modul bis zum System wird aufgrund der immensen Investitionskosten großen Unternehmen vorbehalten sein und siedelt sich innerhalb Deutschlands nach heutigem Stand vermehrt in anderen Bundesländern an. Im Bereich der Produktionsausrüstung bieten sich auch für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)verstärkt Innovationspotenziale.

4.1.3 ELEKTRIFIZIERTER ANTRIEBSSTRANG

Neben der Batterie als zentraler Komponente von Elektrofahrzeugen kommt der elektrischen Maschine, der Leistungselektronik sowie der Getriebetechnik eine äußert wichtige Bedeutung zu. In Baden-Württemberg sind nicht nur die großen, global agierenden Unternehmen, sondern auch viele kleine und mittlere Unternehmen in das Thema

52 Die Li-Tec Battery GmbH ist ein weiteres Joint Venture zwischen Daimler und Evonik: 50,1 Prozent der Anteile liegen bei Evonik, 49,9 Prozent der Anteile bei Daimler. Bei der Deutschen Accumotive GmbH liegen die Anteile hingegen zu 90 Prozent bei Daimler und zu 10 Prozent bei Evonik [Automobil Produktion (2009)].

Elektromobilität eingestiegen. Das Statistische Landesamt listet im Bereich der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, worunter derzeit auch die Herstellung von Elektromotoren erfasst wird, rund 84.000 Beschäftigte in mehr als 300 Betrieben in Baden-Württemberg [Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011)]. Somit gibt es großes Pozential, neue Geschäftsfelder und damit Wertschöpfung in diesem Bereich aufzubauen.

ELEKTRISCHE MASCHINE

Neben der Daimler AG ist auch das Unternehmen Bosch in fast allen Bereichen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs aktiv. Zudem haben Bosch und die Daimler AG das Gemeinschaftsunternehmen EM-motive GmbH für die Herstellung und den Vertrieb von Elektromotoren gegründet [Robert Bosch (2011a)].

> *»Es ist zu begrüßen, dass EM-motive, das neue Joint Venture von Daimler und Bosch für die Traktions-Elektromotoren, die Entwicklung in Baden-Württemberg ansiedeln wird. Der Wermutstropfen für die Regionalwirtschaft ist jedoch, dass die Produktion dieser E-Maschinen für rein elektrisches Fahren nicht in Baden-Württemberg stattfinden wird.«*
>
> Dr. Jürgen Dispan, Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter, IMU Institut

Auch die SEW Eurodrive GmbH & Co. KG in Bruchsal beschäftigt sich mit antriebstechnischen Fragestellungen. Anfang 2011 gründete das Unternehmen gemeinsam mit der Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG die Brose-SEW Elektromobilitäts GmbH & Co. KG, welche Antriebs- und Ladesysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge entwickelt und vertreibt [Brose (2011)].
Eine weitere Zusammenarbeit gibt es zwischen der Aradex AG in Lorch und der ate GmbH in Leutkirch, die gemeinsam den Elektroantrieb VECTOPOWER entwickeln und vertreiben [Vectopower (2011)]. Weitere Firmen im Bereich der Antriebstechnik sind zum Beispiel die Firma Schopf, die AMK Automotive GmbH und die Ricardo AG.

Im Bereich der Forschung zu alternativen Antriebskonzepten sind das KIT und die Universität Stuttgart, das DLR mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte sowie die Hochschulen Esslingen, Ulm und Karlsruhe zu nennen. Darüber hinaus gibt es Kooperationen zwischen Industrie und Forschung. Hierbei ist die Gründung des »Projekthaus e-drive« zu nennen, innerhalb dessen die Daimler AG und das KIT bereits 2008 eine Forschungskooperation auf dem Gebiet der Elektroantriebe gestartet haben [Idw (2008)]. Neben den Bereichen der Leistungselektronik, Steuerungs- und Regelungstechnik sollen auch Elektromaschinen und elektrische Energiespeicher einheitlich »unter einem Dach« beforscht werden. Im Jahr 2011 wurde zusätzlich das Promotionskolleg im »Projekthaus e-drive« von Daimler und dem Stuttgarter Zulieferer, der Behr GmbH, ins Leben gerufen, mit dem zehn Doktoranden am KIT über vorerst vier Jahre unterstützt werden [KIT (2011a)].

LEISTUNGSELEKTRONIK

> *»Ich denke, dass die Produktion der Leistungselektronik prädestiniert für Baden-Württemberg ist.«*
>
> Jürgen Jost, Bereichsleiter Forschung und Entwicklung, Dürr Systems GmbH

Firmen aus dem Bereich Leistungselektronik sind neben den großen Unternehmen wie Bosch, der Daimler AG und der Porsche AG zum Beispiel die AMK Gruppe mit Hauptsitz in Kirchheim/Teck, die Lauer & Weiß GmbH aus Fellbach oder die Bertrand AG mit Stammsitz in Ehningen.
Eine in Deutschland einzigartige Kooperation von Industrie und Forschung/Lehre stellt das von Bosch gegründete und mitfinanzierte Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik dar, das im Juni 2011 eröffnet wurde. An den beiden Standorten der Hochschule Reutlingen und der Universität Stuttgart werden in den nächsten zehn Jahren rund 30 Mio. Euro in den Ausbau der Infrastruktur, in Professorenstellen und in neue Studiengänge investiert. Im Oktober 2010 wurde der Master in Leistungs- und Mikroelektronik um den Schwerpunkt Opto- und Leistungselektronik und Informationstechnik erweitert. Der Bachelor in Mechatronik bekommt mit Mikroelektronik einen neuen Schwerpunkt. Zusätzlich wurde ein neuer berufsbegleitender Masterstudiengang Nano und Optoelektronik & Leistungselektronik entwickelt [RB Zentrum (2011)].
Auch das KIT, die Hochschule Esslingen und das DLR forschen im Bereich Leistungselektronik.

GETRIEBE

Die Getriebetechnik bietet für die Elektromobilität vor allem neue Anwendungsfelder im Bereich der parallelen bzw. leistungsverzweigten Hybridfahrzeuge. Hier arbeiten Unternehmen aus Baden-Württemberg an innovativen Lösungen, wie beispielsweise die ZF Friedrichshafen AG als drittgrößter Automobilzulieferer Deutschlands. ZF ist im Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeuge aktiv. Die LuK GmbH als Unternehmen der Schaeffler Gruppe ist ebenfalls in der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb von Getrieben aktiv, ebenso die Getrag Corporate Group aus Untergruppenbach.

4.1.4 LEICHTBAU

Der Fahrzeugleichtbau ist eine wichtige Schlüsseltechnologie für energiesparende und emissionsarme Fahrzeuge. In Baden-Württemberg gibt es viele anerkannte Forschungsinstitute sowie eine Vielzahl von Unternehmen, die sich mit diesem Thema gerade im Hinblick auf die Gewichtsreduzierung im Fahrzeugbau sowie auch im Speziellen im Bereich der Elektromobilität beschäftigen.

Im Themenfeld Fahrzeugleichtbau arbeiten das DLR, das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) sowie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Universität Stuttgart bereits seit einigen Jahren im Kompetenzzentrum Fahrzeugleichtbau (KFL) eng zusammen. Das am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie in Pfinztal angesiedelte Innovationscluster KITe hyLITE mit über dreißig Partnern aus Forschung und Industrie legt sein Augenmerk auf die Erforschung neuer Technologien für den hybriden Leichtbau. Das Kernteam von KITe hyLITE besteht aus drei Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft (ICT, IWM, LBF) sowie vier Instituten des KIT. Auf der Unternehmensseite sind neben den drei in Baden-Württemberg ansässigen OEM (Daimler, Porsche und Audi) die breit aufgestellte Zulieferindustrie und zahlreiche innovative klein- und mittelständische Unternehmen des Maschinenbaus eingebunden [Fahrzeugleichtbau (2011)].

Die »Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg« (AFBW) stellt als branchenübergreifendes Netzwerk eine Plattform für den

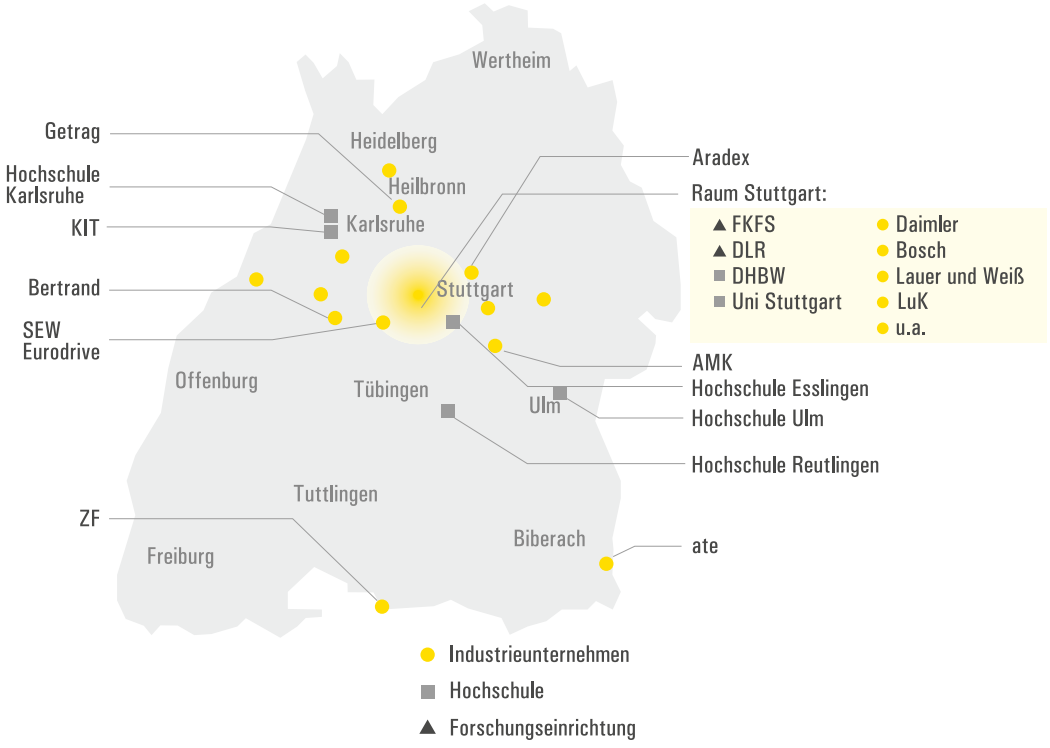


Abbildung 40: Auswahl von Akteuren im Bereich elektrifizierter Antriebsstrang[53]

53 Eigene Darstellung

Austausch und Wissenstransfer von Unternehmen, Wissenschaftlern und Politik dar. Ein Themen- und Forschungsfeld dieser Allianz beschäftigt sich speziell mit dem Bereich der Mobilität. [AFBW (2011)]. Das Leichtbauzentrum Baden-Württemberg LBZ-BW e.V. bietet eine weitere Vernetzungsplattform für Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die sich mit dem Thema des Leichtbaus beschäftigen, und unterstützt seine Mitglieder etwa bei der Anbahnung von Kooperationen [Leichtbauzentrum (2011)]. Der Innovationscluster »Systemeffizienter hybrider Leichtbau«, dessen Träger das Leichtbauzentrum Baden-Württemberg e.V. ist, verknüpft die Kompetenzen unterschiedlicher Industriezweige und vernetzt sie mit Forschungsinstituten und anderen Clustern und Netzwerken, darunter die AFBW, automotive bw und KITe hyLITE.

Das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg fördert den Aufbau eines Technologie- und Transferzentrums Leichtbau TTZ durch die Landesagentur Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie e-mobil BW GmbH.

Mit der durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg angeregten Gründung eines Technologieclusters Composite (TC^2) haben sich diverse Forschungseinrichtungen wie das KIT und die Universität Stuttgart, das DLR, die Fraunhofer-Gesellschaft, das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf sowie die Hochschulen Ravensburg-Weingarten, Esslingen und Konstanz zusammengeschlossen, um ihre Kompetenzen im Bereich Verbundwerkstoffe in Baden-Württemberg zu bündeln [KIT (2011b)].

Der Leichtbau stellt in der Automobilindustrie nach wie vor ein wichtiges Thema dar. Gerade bei elektrifizierten Antriebskonzepten spielt er durch seine Möglichkeiten der Gewichtsreduzierung eine zentrale Rolle, um dadurch den Energiebedarf von Fahrzeugen, und somit die notwendige Batteriekapazität, zu reduzieren. In diesem Themenfeld verstärken die drei in Baden-Württemberg ansässigen OEM (Daimler, Porsche und Audi) weiter ihre Aktivitäten. Am Standort Neckarsulm legt Audi einen Schwerpunkt der technischen Entwicklung unter anderem auf den Bereich des Karosserieleichtbaus. Der Automobilbauer

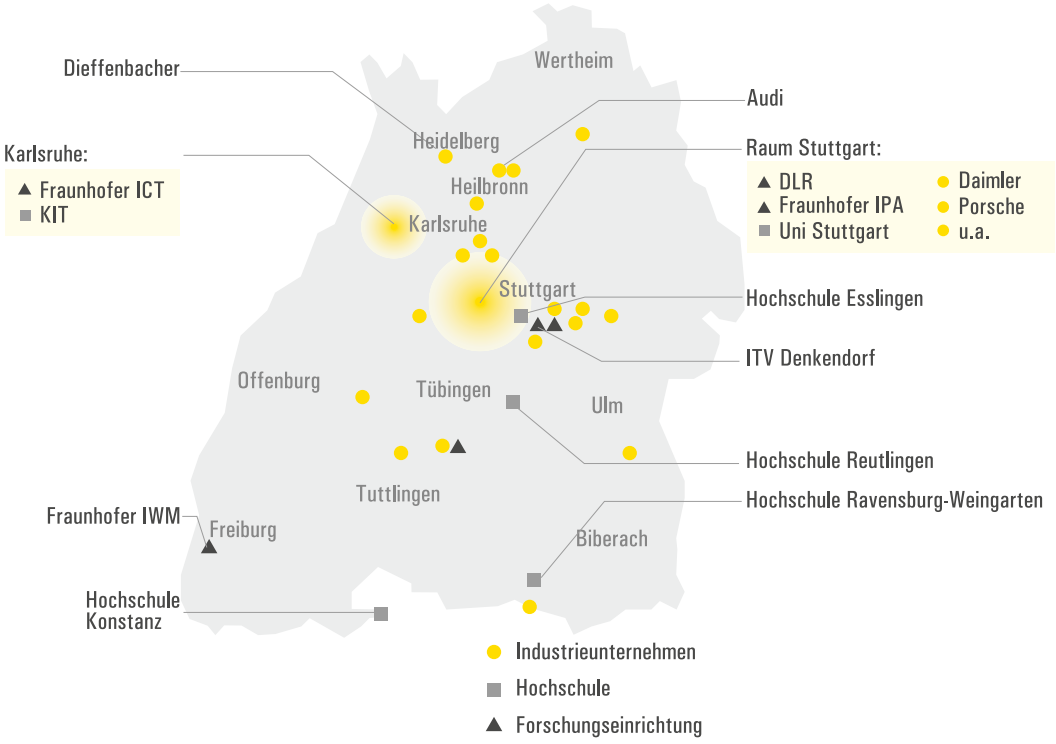


Abbildung 41: Auswahl von Akteuren im Bereich Leichtbau[54]

54 Eigene Darstellung

Daimler plant zukünftig mit dem japanischen CFK-Hersteller Toray in Esslingen bei Stuttgart Leichtbauteile für seine Automobilproduktion herzustellen [Daimler (2011a)]. Neben den großen OEM beschäftigen sich zahlreiche KMU aus der Zulieferindustrie mit der Thematik des Leichtbaus, wie beispielsweise der Maschinen- und Anlagenbauer Dieffenbacher GmbH mit Sitz in Eppingen, welcher ebenfalls auf faserverstärkte Kunststoffe für den Einsatz im Automobil setzt [Dieffenbacher (2011)].

»In der Brennstoffzellentechnologie ist Baden-Württemberg in erster Linie im Bereich der Forschung und Entwicklung sehr gut aufgestellt. Hierbei stechen verschiedene Hochschulinstitute und die Daimler AG mit ihrem Entwicklungszentrum in Nabern bei Kirchheim/Teck heraus. Der Ausbau zum kompletten Produktionsstandort Baden-Württemberg mit einem Zuliefernetzwerk, für das bereits ganz gute Ansätze bestehen, steht noch aus.«

Dr. Jürgen Dispan, Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter, IMU Institut

4.1.5 BRENNSTOFFZELLE

Im Bereich der Brennstoffzellentechnologie ist Baden-Württemberg in Bezug auf seine Industrie- und Forschungslandschaft sowohl national als auch international sehr gut aufgestellt. Besonders hervorzuheben ist die Region Stuttgart, welche über eine bundesweit, wenn nicht sogar weltweit einzigartige Konzentration von Aktivitäten im Bereich Brennstoffzellen verfügt (vgl. hierzu Abbildung 42) und damit zu den weltweit bedeutendsten Forschungs- und Entwicklungszentren sowie Technologie- und Wirtschaftszentren gehört.
Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) arbeitet am Standort Ulm sowohl an den Grundlagen der Brennstoffzellenforschung wie auch an der Entwicklung neuer Brennstoffzellen für automobile, portable und stationäre Anwendungen sowie Brennstoffzellensysteme vom reinen Versuchssystem bis zum industriellen Prototypen [ZSW (2011b)]. Das Max-Plack-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart entwickelt Membranen für Brennstoffzellen, das Fraunhofer ICT in Karlsruhe beschäftigt sich

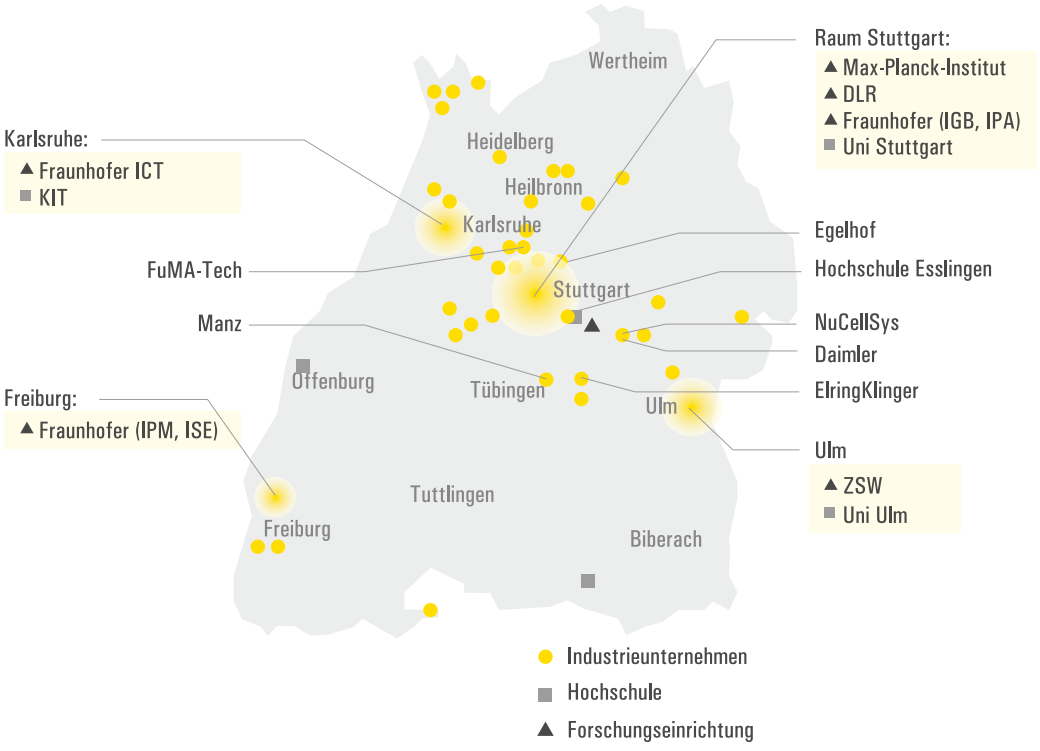


Abbildung 42: Auswahl von Akteuren im Bereich Brennstoffzelle[55]

55 Eigene Darstellung

unter anderem mit der Entwicklung von Elektrokatalysatoren und Elektrodenstrukturen für Direkt-Brennstoffzellen [ICT (2011)].

Neben einer Vielzahl weiterer Forschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen arbeiten zahlreiche Unternehmen im Themenfeld der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Die NuCellSys GmbH als Tochterunternehmen der Daimler AG ist ein führendes Unternehmen in der Entwicklung und Herstellung von Brennstoffzellensystemen für Fahrzeuganwendungen. Neben Systementwicklung und Design, Komponenten- und Softwareentwicklung sowie Systemvalidierung und Systemintegration existiert seit 2003 eine Kleinserienfertigung für Brennstoffzellensysteme [NuCellSys (2011)]. Darüber hinaus baut die Daimler AG in Nabern bei Kirchheim/Teck Brennstoffzellenfahrzeuge, wie z.B. die B-Klasse F-CELL auf. Als Unternehmen im Bereich Spezialdichtungen und Gehäuse hat die ElringKlinger AG die Herstellungen von Brennstoffzellen-Komponenten und Stacks als neues Geschäftsfeld aufgebaut [ElringKlinger (2011)]. Viele kleine und mittlere Unternehmen bieten spezielle Technologien, Materialien und Einzelkomponenten für die Herstellung von Brennstoffzellen an. So entwickelt beispielsweise die FuMA-Tech GmbH Membranen für die Anwendung in Brennstoffzellen, die Otto Egelhof GmbH hat spezielle Ventile und Luftversorgungssysteme im Produktportfolio [Egelhof (2011)]. Neben der Entwicklung von Komponenten und Komplettsystemen verfügen mehrere baden-württembergische Unternehmen, wie beispielsweise die Manz Automation Tübingen GmbH, auch über Kompetenzen in der Entwicklung von Produktionsanlagen für Brennstoffzellen.

Einen Überblick über die vielfältige Akteurslandschaft im Bereich der Brennstoffzellentechnologie zeigt Abbildung 42 mit einer Auswahl an Forschungseinrichtungen, Universitäten, Hochschulen sowie Unternehmen. Darüber hinaus bieten die in Kapitel 4.2 aufgeführten Kompetenznetzwerke auf ihren Internetseiten weitere Informationen zu den beteiligten Mitgliedern.

4.1.6 INFRASTRUKTUR

»Der schnelle Fortschritt der Standardisierung der Schnittstelle zwischen Auto und Infrastruktur ist ein essenzieller Faktor für die Umsetzung der Elektromobilität.«

Heiko Herchet, Leiter Kompetenzzentrum Elektromobilität, EDAG Group

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedingt die Entwicklung und den Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur. Im Bereich Ladetechnik entwickelt das Bosch-Tochterunternehmen Bosch Software Innovations GmbH Softwarelösungen für den Ladebetrieb und die Vernetzung der Stationen [Robert Bosch (2011b)]. Auch die Firmen Conductix-Wampfler, SEW-Eurodrive, Lapp Kabel, Heldele und Kellner Telecom beschäftigen sich in innovativen Projekten mit dem Thema Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge.

Bezüglich der Energieversorgung und dem Aufbau von Ladesäulen ist die EnBW als größter Energieversorger Baden-Württembergs sehr aktiv. Zusammen mit der Daimler AG, Bosch, SAP und weiteren Unternehmen untersuchte die EnBW im gerade ausgelaufenen Projekt MeRegioMobil die optimale Vernetzung von Energienetz und Elektrofahrzeugen mittels moderner Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK) [MeRegioMobil (2011b)]. Auch im Projekt H2 Mobility, in dem es um den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur geht, dem im Rahmen von IKT für Elektromobilität II geförderten Projekt iZEUS (intelligent Zero Emission Urban System), dem deutsch-französischen Flottentest CROME und dem Projekt IKONE ist das Unternehmen aktiv. Themenschwerpunkte von CROME sind grenzüberschreitende Operabilität und Schnellladen.

Auch die MVV Energie AG als regionaler Anbieter mit bundesweitem Stadtwerke-Netzwerk engagiert sich in Infrastrukturprojekten wie beispielsweise »Modellstadt Mannheim« [Modellstadt Mannheim (2011)] oder »Future Fleet« zusammen mit der SAP AG [RegModHarz (2011)]. Zudem engagieren sich weitere Energieversorger und kleinere Anbieter von Infrastrukturlösungen in Baden-Württemberg.

»Da die automobile Zukunft von Elektrofahrzeugen mit Batterie- und Brennstoffzellenantrieb geprägt sein wird, ist der Aufbau einer durchgängigen Lade- sowie Wasserstoffinfrastruktur in Baden-Württemberg, aber auch bundesweit, essenziell. Die Technologie wird sich dort zuerst ausbreiten und durchsetzen, wo auch die Infrastruktur vorhanden ist.«

Peter Froeschle, Leiter Strategische Energieprojekte & Marktentwicklung Brennstoffzellen-/Batteriefahrzeuge, Daimler AG

Im Bereich der Forschung sind das FKFS der Universität Stuttgart, das KIT, das Fraunhofer IAO, das Fraunhofer ICT und das ZSW aktiv. Im Jahr 2011 wurde die Forschungsladestation ELITE des FKFS in Betrieb genommen, außerdem wird zum induktiven Laden geforscht [FKFS (2011)]. Das KIT arbeitet unter anderem in den Projekten MeRegio und Smart Home an Themen der Netzintegration von Elektrofahrzeugen, das Fraunhofer IAO errichtet im Mitarbeiterparkhaus des Institutszentrums insgesamt 30 Ladestationen sowie eine Schnellladestation für Forschungszwecke.

»Wenn mehr Fahrzeuge auf dem Markt sind, wird sich auch der Ausbau von Ladesäulen sukzessive entwickeln, allerdings müssen die Kommunen schon jetzt Rahmenbedingungen zum mittelfristigen Ausbau einer Versorgungsinfrastruktur schaffen. Dazu müssen Flächen ausgewiesen und möglichen Betreibern kostengünstig zur Verfügung gestellt werden, was mit der Klärung von rechtlichen Fragen und somit mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist.«

Manfred Müller, Referatsleiter Abteilung Industrie und Verkehr, IHK Region Stuttgart

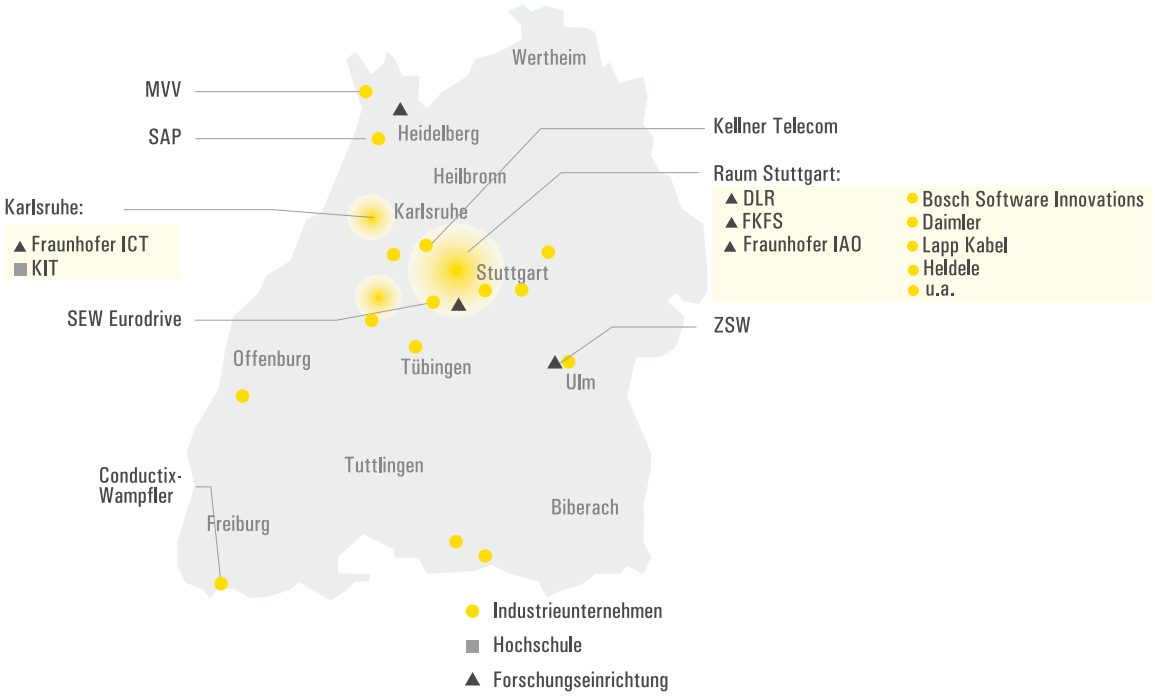


Abbildung 43: Auswahl von Akteuren im Bereich Ladeinfrastruktur[56]

56 Eigene Darstellung

4.1.7 THERMOMANAGEMENT

Eine wesentliche Herausforderung für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen stellt sich im Thermomanagement, da im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen keine Motorabwärme zum Heizen des Fahrzeuginnenraums mehr zur Verfügung steht bzw. die Kühlung durch Nebenaggregate mit hohem Energieverbrauch erfolgt. Die gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen ohnehin eingeschränkte Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge nimmt durch den Leistungsbedarf von elektrischen Heiz- und Kühlelementen noch weiter ab. Dieser Effekt ist umso größer, je höher die Leistungsaufnahme der Komponenten zur Innenraumklimatisierung ausfällt. Um dem entgegenzuwirken und dennoch einen hohen Klimakomfort in der Fahrzeugkabine erzeugen zu können, müssen innovative Klimatisierungskonzepte entwickelt werden (vgl. Kapitel 2.2.3).
Im Bereich der Klimatisierung und thermischer Komfortkonzepte für Elektrofahrzeuge arbeitet das Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Projekt »E-Komfort« an dieser Fragestellung. Die Behr GmbH & Co. KG in Stuttgart beschäftigt sich mit Themen rund um das Thermomanagement. Auch das Unternehmen J. Eberspächer GmbH & Co. KG mit Sitz in Esslingen am Neckar entwickelt und produziert Heizkonzepte für die effiziente Beheizung von Elektrofahrzeugen. Darüber hinaus sind die Robert Bosch GmbH in Gerlingen-Schillerhöhe und die Bosch Engineering GmbH aus Abstatt an einem Forschungsprojekt zum thermischen Management in Elektrofahrzeugen beteiligt.

4.2 NETZWERKE UND CLUSTER

Neben den in den vorherigen Abschnitten bereits aufgeführten thematisch zugeordneten Netzwerken und Cluster existieren in Baden-Württemberg eine Vielzahl weiterer Netzwerke und Zusammenschlüsse zur themenübergreifenden Förderung der Elektromobilität und Brennstofftechnologie im Land.
Die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg e-mobil BW übernimmt als zentrale Anlaufstelle im Bereich Elektromobilität und in der Vernetzung aller wichtigen Akteure, Initiativen, Projekte und Förderaktivitäten im Land eine Funktion als Dachorganisation und landesweite Plattform. Erklärtes Ziel der e-mobil BW ist es, auf diese Weise den Wissenstransfer zu fördern, Innovationspotenziale aufzuzeigen sowie gemeinsame Verbundforschungsprojekte zu initiieren. Ein besonderer Fokus in der Arbeit der e-mobil BW liegt dabei auf der besseren Integration kleiner und mittelständischer Unternehmen in den Innovationsprozess Elektromobilität.
Der Cluster »Elektromobilität Süd-West« mit dem Motto »road to global market« umfasst heute ca. 80 Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft in der Region Karlsruhe – Mannheim – Stuttgart – Ulm. Als regionale Konzentration und Vernetzung innovativer Akteure verbindet er mit dem Verständnis des Drei-Technologien-Ansatzes die Branchen Automobil, IKT und Energiewirtschaft sowie das Querschnittsfeld Produktion. Mit dem Ziel der Industrialisierung der Elektromobilität adressieren die Clusterakteure gemeinsam die drei wesentlichen Hebel für die Wettbewerbsbefähigung der Elektromobilität: »Markt und Kosten« (Schaffung wettbewerbsfähiger Lebenszykluskosten), »Handhabung und Komfort« (Befriedigung der Kundenerwartungen an E-Fahrzeuge) sowie »Vernetzte Mobilität« (Steigerung der Nutzbarkeit von elektrifizierten Verkehrsträgern). Der Cluster wirkt durch seine Synergien besonders für kleine und mittlere Unternehmen katalytisch, da er sie in den Wissenstransfer zwischen großen Unternehmen und Forschungseinrichtungen einbindet und so aktiv auf den Wandel hin zur Elektromobilität vorbereitet. Die e-mobil BW übernimmt das übergreifende Clustermanagement und ist kompetenter Ansprechpartner für alle Clustermitglieder.

Das landesweite Netzwerk »automotive bw« fördert im Sinne der Weiterentwicklung Baden-Württembergs als innovativer Zulieferstandort die Bündelung von Firmen und deren Aktivitäten im Rahmen eines Clusters [automotive bw (2011)].
Die Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg (BBA-BW), die ebenfalls eine Schnittstellen- und Beratungsfunktion innehat, arbeitet mit ihren über 70 Mitgliedern aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung eng mit Partnern wie der Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS) und der e-mobil BW zusammen, um gemeinsam mit ihren Mitgliedern die Marktvorbereitung und Industrialisierung von Batterie- und Brennstoffzellentechnologien voranzutreiben.
Im Innovationsnetzwerk FutureCar werden unter der Leitung der Fraunhofer-Institute IAO und IISB sowie der Schweizer Firma Protoscar Zulieferbetriebe bei ihrer Positionierung in der Elektromobilität unterstützt [IAO (2011)].
Hilfestellung bei Entwicklung und Forschung bietet auch Baden-Württembergs Kompetenznetzwerk Mechatronik, welches eine Kommunikationsplattform für ihre Partner für die Zusammenarbeit und den Wissenstransfer bei der Entwicklung technischer Lösungen darstellt, um Lösungskompetenzen in Baden-Württemberg zu verbessern und über die Landesgrenzen hinaus bekannt zu machen [mechatronik (2011)].

Die Wirtschaftsförderung Region Stuttgart koordiniert als Projektleitstelle die Modellregion Elektromobilität Stuttgart. Sie ist außerdem Projektpartner im INTERREG IVC Programm »Producer Services for European Sustainability and Competitiveness« der EU. Das Projekt adressiert Belange nachhaltiger Mobilität und profitiert damit von den Erfahrungen der Region Stuttgart im Bereich Elektromobilität [WRS (2011b)].
Im Projekt »Nachhaltig mobile Region Stuttgart«, das im Februar 2011 durch mehrere Landesministerien ins Leben gerufen wurde, wird die in der Modellregion Stuttgart beforschte Elektromobilität durch weitere Themen wie Klimaschutz, Stadtentwicklung oder Intermodalität erweitert. Das Projekt befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie noch in der Phase der inhaltlichen und organisatorischen Ausrichtung [eMobil BW (2011a)].

4.3 ÖFFENTLICH GEFÖRDERTE FORSCHUNGSPROJEKTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

»Förderinstrumente müssen so gestaltet werden, dass das Risiko bei diesen langfristigen Themen auch für den Mittelstand beherrschbar bleibt.«

Prof. Dr. Werner Tillmetz, Mitglied des Vorstandes - Elektrochemische Speichertechnologien, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Insbesondere seit 2009 werden in Baden-Württemberg mehrere Projekte und Initiativen im Themenfeld Elektromobilität gefördert. Viele Projekte sind auf die innerhalb des Konjunkturpaketes II initiierten Forschungsförderprogramme des Bundes zur Elektromobilität zurückzuführen. Aber auch das Land Baden-Württemberg stellt signifikante Mittel zur Verfügung (siehe hierzu Kapitel 2.5). Beispielsweise werden im Rahmen der Landesinitiative im Zeitraum 2010–2014 rund 28 Mio. Euro bereitgestellt – worauf auch die Gründung der e-mobil BW als Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie zurückzuführen ist [Leßnerkraus (2010)].
Das größte Volumen an Forschungsfördermittel für die Elektromobilität stellt dabei das BMBF zur Verfügung. So werden beispielsweise alleine im »Verbund Süd Elektrochemie für Elektromobilität« die baden-württembergischen Akteure mit rund 14 Mio. Euro gefördert [Umweltministerium (2010)]. Zahlreiche BMBF-geförderte Forschungsprojekte, häufig als Verbundforschung aus Wirtschaft und Wissenschaft angelegt, legen erst die Grundlagen für die in der Öffentlichkeit häufig besser wahrgenommenen anwendungsnahen Projekte.
Unter diesen anwendungsnahen Projekten ist sicherlich die Initiative Modellregion Elektromobilität Stuttgart hervorzuheben. Unter Führung der Wirtschaftsförderung Region Stuttgart WRS ist es gelungen, Stuttgart als Modellregion des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS zu positionieren. In der Modellregion Elektromobilität Stuttgart werden in Summe über 100 Ladestationen aufgebaut. Darüber hinaus sind im Kontext der Initiative mehr als 800 Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang, zum großen Teil Elektrozweiräder, in der Region Stuttgart im Einsatz [NOW GmbH (2011)]. Insgesamt hat die Modellregion Stuttgart ein Fördervolumen von 16,2 Mio. Euro welches sich auf 32 Partner verteilt. Mit von den Akteuren beigebrachten Eigenmitteln beläuft sich das Gesamtvolumen der Modellregion Stuttgart auf 33,5 Mio. Euro [Region Stuttgart (2011)]. Dabei besteht die Modellregion Elektromobilität Stuttgart aus mehreren Projekten die im Folgenden kurz skizziert werden.

- Im Projekt IKONE sind unter der Koordination von Daimler 50 batteriebetriebene Mercedes-Benz Vito E-Cell unterwegs, um den Einsatz elektrisch betriebener Transporter im Wirtschaftsverkehr zu untersuchen. Das Projekt adressiert mit dem städtischen Wirtschaftsverkehr ein sehr interessantes Einsatzgebiet für Elektrofahrzeuge. So sind die zu fahrenden Routen gut planbar und die positiven Effekte des lokal emissionsfreien Antriebs kommen im urbanen Raum besonders zum Tragen.
- In einem Feldtest mit der größten Elektroroller-Flotte Deutschlands demonstriert die EnBW die Elektromobilität im Alltagseinsatz [EnBW (2011)]. 500 Testpersonen, Elektronauten genannt, haben im Zuge des Projekts die Gelegenheit, über einen gewissen Zeitraum einen Elektroroller zu fahren. Zum Einsatz kommt dabei das Elektro-Moped Elmoto. Dieses wurde von dem in Stuttgart ansässigen Designbüro ipdd entwickelt und wird von der neu gegründeten Firma ID-Bike nun produziert. Die Testpersonen haben mit den Elektro-Mopeds bis zum 2. Oktober 2011 965.760 km zurückgelegt. Weitere 100 Elektroroller hat die EnBW für den Einsatz in kommunalen Fuhrparks bereitgestellt.
- Unter dem Dach der Stuttgarter Straßenbahnen AG wurden fünf Dieselhybridbusse in Dienst gestellt, um die weitere Elektrifizierung des öffentlichen Nahverkehrs zu erproben. Mit den Bussen ist der rein elektrische Betrieb z.B. beim Ausfahren an den Haltestellen möglich. Dabei werden die Busse auch auf einer topografisch anspruchsvollen Linie (Linie 42) eingesetzt.

- Im Projekt EleNA (Elektroantriebs-Nachrüstsätze für Diesel-Lieferwagen) entwickeln mehrere kleinere Automobilzulieferer aus der Region einen Elektroantriebs-Nachrüstsatz. Dieser ermöglicht die Nachrüstung konventioneller Kleintransporter auf den hybriden Antrieb.
- In Ludwigsburg werden zurzeit 15 elektrisch betriebene Fahrzeuge im Fuhrpark der Stadtverwaltung eingesetzt. Ziel dieses Feldversuchs ist es zu untersuchen, wie sich der Mobilitätsbedarf einer Stadtverwaltung mit Elektrofahrzeugen der unterschiedlichsten Art (PKW, Kleintransporter, Elektroroller, Pedelecs, Segways) abdecken lässt.
- Am Flugfeld Böblingen/Sindelfingen wurde untersucht, wie Elektromobilität in die Entwicklung eines Stadtquartiers einfließen kann.
- Das Fahrrad-Vermietungs-System der Deutschen Bahn AG (Call a Bike) wird bis Ende 2011 mit 100 Pedelecs ausgerüstet. Diese können an 45 Terminals ausgeliehen werden.
- Die Firma Porsche hat 3 Elektro-Boxster aufgebaut, um die Dauerhaltbarkeit von Batterien, die Lade- und Entladezyklen, die Reichweite und die Akzeptanz zu testen.

Neben den Projekten innerhalb der BMVBS-geförderten Modellregion konnten baden-württembergische Projektkonsortien auch bei den Programmen des BMWi mit den Projekten MeRegio und MeRegioMobil [MeRegioMobil (2011a)] sowie des BMU mit dem Projekt Future Fleet [Future Fleet (2011)] bedeutende Förderprojekte im Themenfeld Fahrzeuge, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Energie platzieren. So soll im Projekt MeRegioMobil der Aufbau und Betrieb einer intelligenten Lade- und Rückspeiseinfrastruktur für Elektrofahrzeuge mit bis zu 600 Ladepunkten vorangetrieben werden. Im Projekt Future-Fleet setzt SAP rund 30 Elektrofahrzeuge in der eigenen Fuhrparkflotte ein und erforscht das intelligente Management dieser Fahrzeuge.

Der Flottentest CROME (Crossborder Mobility for EVs), gefördert von BMVBS und BMWi, soll die grenzüberschreitende Elektromobilität demonstrieren. Dafür sollen bis Ende 2013 etwa 100 rein elektrisch betriebene Fahrzeuge im deutsch-französischen Grenzbereich genutzt werden. Zu den Zielen gehören die Erprobung des Ladens im Ausland, die Analyse des Ladeverhaltens sowie die Evaluation der Kundenakzeptanz.

Das Land Baden-Württemberg fördert eine Begleitstudie zum Projekt »ZUMO – Zukunftsmobilität in der Ferienregion Schwarzwald«. Gegenstand der Studie ist die Ermittlung von Potenzialen nachhaltiger Mobilität im Tourismus zum Ausgleich von Leistungseinbußen, die bedingt durch den Klimawandel eintreten werden. Abbildung 44 stellt einen Auszug von aktuellen und geplanten Forschungs- und Demonstrationsprojekten in Baden-Württemberg dar.

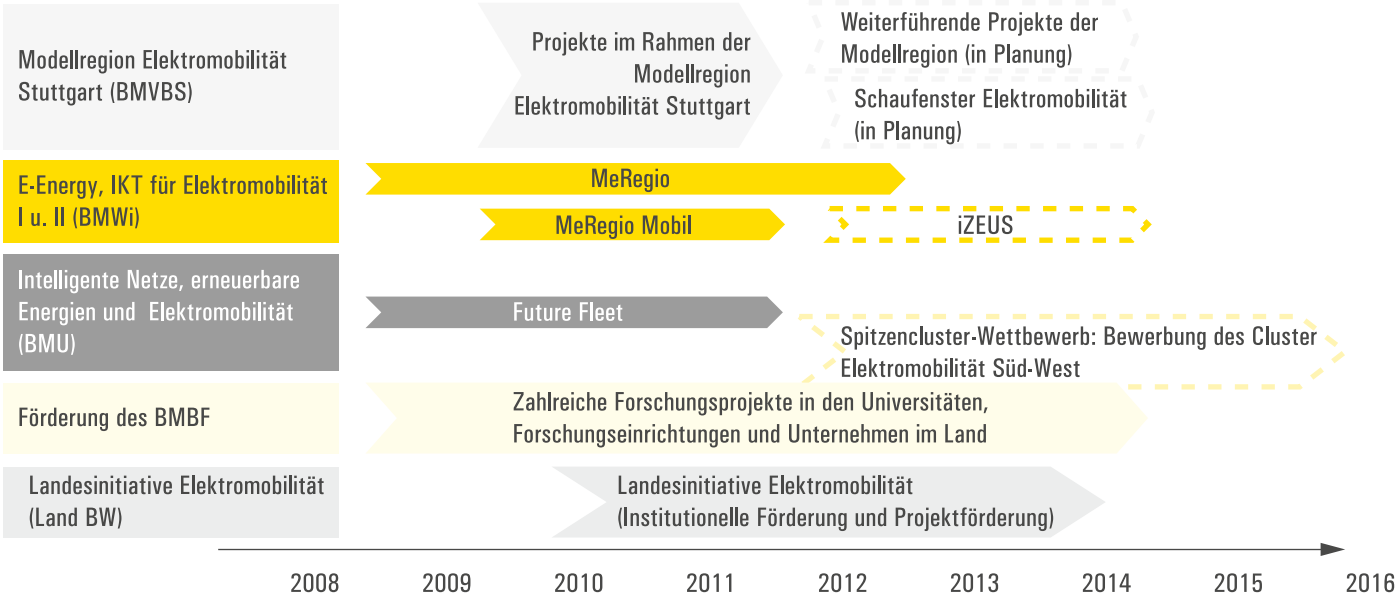


Abbildung 44: Auszug von Forschungs- und Demonstrationsprojekten in Baden-Württemberg[57]

57 Eigene Darstellung

Kapitel 5

ZUSAMMENFASSENDE GESAMTBETRACHTUNG

In der Strukturstudie »BW^{e} Mobil 2011« wurden Sekundärdatenrecherchen (Technologiestudien, Marktszenarios, Projektberichte, Pressemitteilungen etc.) sowie Interviews mit Fachexperten aus Industrie und Wissenschaft zusammengeführt, um die zu erwartenden Auswirkungen und die Positionierung Baden-Württembergs im Technologiefeld Elektromobilität zu analysieren. Dafür wurde die bestehende Datenbasis der vorangegangenen Strukturstudie BW^{e} Mobil umfassend geprüft, aktualisiert und um neue relevante Themenfelder erweitert. Im Rahmen der zusammenfassenden Gesamtbetrachtung wird deutlich:

- Der Wandel hin zu einer elektromobilen Gesellschaft schreitet mit großen Schritten voran und mit ihm entstehen neue Anforderungen an die Akteure der automobilen Wertschöpfungskette.

- Elektromobilität muss systemisch gedacht werden und unter Einbeziehung der relevanten Branchen Automobil, IKT und Energie muss bereits heute ein Wissenstransfer zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen stattfinden.

- Eine optimale Ausschöpfung der zukünftigen Beschäftigungspotenziale lässt sich im Land Baden-Württemberg nur dann erreichen, wenn wesentliche Anteile an der »elektromobilen« Wertschöpfungskette im Land gesichert werden. Diese erstrecken sich von der Herstellung wesentlicher Komponenten bis hin zur Markteinführung des Endprodukts.

- Basis für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit Baden-Württembergs ist die Qualifizierung des Mittelstandes. Dies kann nur geschehen, wenn kleine und mittlere Unternehmen im Land aktiv von der langfristigen Planung großer Unternehmen profitieren können und somit selbstständig den Wandel hin zur Elektromobilität mitgestalten können.

Den Veränderungen in der automobilen Wertschöpfungskette und den Herausforderungen wie z. B. Sicherung maßgeblicher Wertschöpfungsanteile stehen auch zahlreiche Chancen gegenüber, die von der ansässigen Industrie ergriffen werden können. Neue Wertschöpfungspotenziale liegen auf Komponentenebene in den Bereichen der elektrischen Maschine, der Leistungselektronik und vor allem in der Traktionsbatterie.

Das Land Baden-Württemberg ist durch seine einzigartigen Strukturen in den für die Elektromobilität relevanten Branchen gut aufgestellt. Erfolgskritisch für Positionierung und Attraktivität Baden-Württembergs als Standort für Forschung, Entwicklung und Produktion von elektromobilen Systemen wird es sein, die zahlreich vorhandenen, auf ihrem jeweiligen Gebiet führenden Unternehmen, Forschungs- und Ausbildungseinrichtungen in einem funktionierenden Cluster zusammenzuführen. Ein solches Cluster mit sich gegenseitig vertrauenden und auf allen vorwettbewerblichen Themenfeldern kooperierenden Akteuren, einem kurzen Draht in die Landespolitik und unter Einbezug aller Wertschöpfungsstufen und betroffenen Branchen kann eine einmalige Durchschlagskraft entfalten.

LITERATURVERZEICHNIS

Abele (2009)
Abele, E.; Hohenstein, J.; Pfeiffer, P.; Wihl, E. (2009): »Wandel im PKW-Antriebsstrang: Auswirkungen auf zukünftige Produktionskonzepte«, in: Maschinenbau und Metallbearbeitung, Kuhn Fachverlag, Villingen-Schwenningen, 2009.

ADS (2011)
ads-tec GmbH (2011): Pressemitteilung: »ZF, Continental und ads-tec entwickeln Komponenten und Herstellungsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien für Nutzfahrzeuge«, http://www.ads-tec.de/images/FUEL_Gruendung.pdf#view=fitV,100 (letzter Zugriff 06.10.2011).

AFBW (2011)
Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg (2011): http://www.afbw.eu/?page_id=2 (letzter Zugriff 06.10.2011).

AISBL (2011)
European Federation for Transport and Environment (2011): »Cars and CO_2 – Background«, http://www.transportenvironment.org/Pages/Cars-and-CO2---Background/ (letzter Zugriff 04.10.11).

ATZproduktion (2011)
ATZproduktion (2011): Ausgabe Nr.: 2011-01: »Künftige Montagestrukturen für Elektrofahrzeuge«, http://www.atzonline.de/index.php;do=show/alloc=3/id=12744 (letzter Zugriff 10.10.2011).

Autoblog (2010)
AutoblogGreen (2010): »Nissan prices Leaf at Yen 3.76 million in Japan before tax breaks«, http://green.autoblog.com/2010/03/30/nissan-prices-leaf-at-3-76-million-in-japan-before-tax-breaks/ (letzter Zugriff 04.10.11).

Autocluster NRW (2010)
AutoCluster.NRW (2010): »Förderwettbewerb ›Elektromobil.NRW‹ erfolgreich abgeschlossen: 22 innovative Projektvorhaben für eine Förderung vorgeschlagen«, http://www.autocluster.nrw.de/index.php?id=35&tx_ttnews%5Btt_news%5D=48&tx_ttnews%5BbackPid%5D=28&cHash=b0b302aa71 (letzter Zugriff 04.10.11).

Autogazette (2011)
Autogazette (2011): »Kaufprämien kurbeln Absatz von Elektroautos nicht an«, http://www.autogazette.de/alternativer_antrieb/elektroantrieb/Kaufpraemien-kurbeln-Absatz-von-Elektroautos-nicht-an-335530.html (letzter Zugriff 04.10.11).

Autohaus (2009)
Autohaus (2009): »Großbritannien fördert Kauf von Elektroautos«, http://www.autohaus.de/grossbritannien-foerdert-kauf-von-elektroautos-832708.html (letzter Zugriff 04.10.11).

Automobil Produktion (2009)
Automobil Produktion (2009): »Jede Baureihe mit Hybrid-Variante«, http://www.automobil-produktion.de/2009/09/jede-baureihe-mit-hybrid-variante/ (letzter Zugriff 11.10.2011).

Automobil Produktion (2011a)
Automobil Produktion (2011): Special – 7. Edition 2010/2011, »Top 100 Automotive Suppliers«, 2011.

Automobil Produktion (2011b)
Automobil Produktion (2011): »Trends 2011 – ZF: Beim Umsatz stärker wachsen als der Branchendurchschnitt«, http://www.automobil-produktion.de/2011/02/trends-2011-zf-beim-umsatz-staerker-wachsen-als-der-branchendurchschnitt/ (letzter Zugriff 03.10.2011).

Automobil Produktion (2011c)
Automobil Produktion (2011): »Daimler und Bosch kommen Joint-Venture näher«,http://www.automobil-produktion.de/2011/07/daimler-und-bosch-kommen-joint-venture-naeher/ (letzter Zugriff 04.10.2011).

Automobil Produktion (2011d)
Automobil Produktion (2011): »ZF kündigt Investitionen in China an«, http://www.automobil-produktion.de/2011/04/zf-kuendigt-investitionen-in-china-an/ (letzter Zugriff 04.10.2011).

Automobilwoche (2011)
Automobilwoche (2011): »Elektro-Smart kostet unter 16.000 Euro«, http://www.automobilwoche.de/article/20110913/REPOSITORY/110919977/1293/elektro-smart-kostet-unter-16000-euro (letzter Zugriff 05.10.2011).

automotive bw (2011)
Automobilcluster Baden-Württemberg (2011): http://www.automotive-bw.de/de/index.php (letzter Zugriff 16.09.2010).

Baden-Württemberg International (2009)
Baden-Württemberg International (2009): »Manz Automation AG wird Industriepartner für die Entwicklung von Batterien für Hybrid- und Elektroautos«, http://www.bw-invest.de/deu/index_deu_6047.aspx?c=090804-bw-invest-de-elektromobilitaet (letzter Zugriff 06.10.2011).

Bain (2010a)
Matthies, G.; Stricker, K.; Traenckner, J. (2010): »Zum E-Auto gibt es keine Alternative«, Bain & Company, Studie, 2010.

Bain (2010b)
Bain (2010): »The e-Mobility era: Winning the race for electric cars«, Bain & Company, Studie, 2010.

Batteriemodul (2011)
Batteriemodul (2011): http://www.pressemeldungen.com/wp-content/uploads/2011/09/modul-pm12.jpg (letzter Zugriff 05.10.2011).

BCG (2009)
The Boston Consulting Group (2009): »The comeback of the electric car?«, Studie, 2009.

BCG (2010)
The Boston Consulting Group (2010): »Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020«, Studie, 2010.

BCG (2011)
The Boston Consulting Group (2011): »Powering Autos to 2020«, Studie, 2011.

Blazejak (2009)
Blazejak, A. et al. (2009): »iMiEV Das Elektrofahrzeug von Mitsubishi«, Präsentation während PR-Tour.

Bloch (2011)
Bloch, A. (2011): »Eiszapfen- Was bleibt von der versprochenen Reichweitenangabe bei E-Autos im Winter?«, in: AutoMotorSport ECO Drive 01/2011, Seite 143.

Bloomberg (2011)
Bloomberg (2011): »Obama Administration Buying 116 Plug-In Vehicles for Fleet, Led by GM Volt«, http://www.bloomberg.com/news/2011-05-24/obama-administration-buying-116-plug-in-vehicles-for-fleet-led-by-gm-volt.html (letzter Zugriff 04.10.11).

BMBF (2011)
Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011): Pressemitteilung 066/2011, http://www.bmbf.de/press/3092.php (letzter Zugriff 01.10.2011).

BMBF (2011a)
Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011): Pressemitteilung 066/2011: »Batterie-Produktion führt Deutschland in die Elektromobilität«, http://www.bmbf.de/press/3092.php (letzter Zugriff: 05.10.2011).

BMBF (2011b)
Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011): Pressemitteilung 006/2011: »Starker Antrieb für die Batterieforschung«, http://www.bmbf.de/press/3031.php (letzter Zugriff: 05.10.2011).

BMU (2009)
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): »Programm zur Marktaktivierung von Elektrofahrzeugen«, Berlin, 16. September 2009, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/marktaktivierung_elektroauto_hintergrund_bf.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

BMU (2010)
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): »Nationale Plattform Elektromobilität«, http://www.bmu.de/verkehr/elektromobilitaet/nationale_plattform_elektromobilitaet/doc/45970.php (letzter Zugriff am 04.10.11).

BMWi (2010)
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010): »Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) nimmt Fahrt auf«, http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/wirtschaft,did=329290.html (letzter Zugriff am 04.10.11).

BMWi (2011)
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): »IKT für Elektromobilität«, 2011.

Brose (2011)
Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. (2011): http://www.brose.com/ww/de/pub/content12495.htm (Letzter Zugriff: 14.09.2011).

Brotz (2007)
Brotz, F. et al. (2007): »Kühlung von Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge«, in: ATZ 12/2007.

Bundesregierung (2009)
Bundesregierung (2009): »Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung«, August 2009.

Bundesregierung (2010)
Bundesregierung (2010): »Das Energiekonzept 2050«, http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion,property=publicationFile.pdf (letzter Zugriff am 04.10.11).

Bundesregierung (2011)
Bundesregierung (2011): »Regierungsprogramm Elektromobilität«, http://www.bmbf.de/pubRD/programm_elektromobilitaet.pdf (letzter Zugriff am 04.10.11).

Cebulski (2011)
Cebulski, B. (2011): »Leistungselektroniken im Fahrzeugantrieb«, in: ATZ Elektronik 01/2011.

Chinese Embassy (2010)
Embassy of the People's Republic of China in the United States of America (2010): »China will not swerve from emission cut target«, official, http://www.china-embassy.org/eng/xw/t629653.htm (letzter Zugriff am 04.10.11).

Cleanenergypartnership (2011)
Cleanenergypartnership (2011): www.cleanenergypartnership.de (letzter Zugriff 04.10.2011).

Cristidis (2005)
Cristidis, P. et al. (2005): »Hybrids for Road Transports - Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles«, Technical Report EUR 21743 EN, European Commission, Joint Research Centre (DG JRC),Institute for Prospective Technological Studies, 2005.

Daimler (2011)
Daimler AG (2011): »Daimler AG, Karlsruher Institut für Technologie und Land Baden-Württemberg starten Promotionskolleg«, http://www.daimler.com/dccom/0-5-658451-49-1376073-1-0-0-0-0-0-9293-0-0-0-0-0-0-0-0.html (letzter Zugriff 04.10.11).

Daimler (2011a)
Daimler AG (2011): »Daimler und Toray gründen Joint Venture für die Herstellung und Vermarktung von Automobilteilen auf Grundlage von Carbonfaser«, http://www.daimler.com/dccom/0-5-658451-49-1362812-1-0-0-0-0-0-12080-0-0-0-0-0-0-0-0.html (letzter Zugriff 06.10.2011).

De Donker (2011)
De Donker, R.; Knut, K. (2011): »Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge – Überblick und Trends«, auf E-Motive Expertenforum »Elektrische Fahrzeugantriebe«, 07./08.09.2011.

Delorme (2009)
Delorme, A. et al. (2009): »Cost Benefit Analysis of Advanced Powertrains from 2010 to 2045«, EVS24 Stavanger, Norway, May 13–16, 2009.

Deutsche Bank (2010)
Deutsche Bank (2010): »Vehicle Electrification: More Rapid Growth, Steeper Price Declines for Batteries«, Studie, 2010.

Dieffenbacher (2011)
Dieffenbacher (2011): »Mit faserverstärkten Kunststoffen in die automobile Zukunft«, http://www.dieffenbacher.de/aktuelles/alle-news/details/news/mit-faserverstaerkten-kunststoffen-in-die-automobile-zukunft/1356.html (letzter Zugriff 06.10.2011).

Dietz (2010)
Dietz, W:, Kohler; M. (2010): »Otto-, Diesel- oder Elektromotor – wer macht das Rennen? – Handlungsfelder zur Sicherung des Automobilstandorts Region Stuttgart«, Institut für Automobilwirtschaft (IFA), Stuttgart 2010.

Dixon (2002)
Dixon, L.; Porche, Isaac; Kulick, J. (2002): »Driving Emission to Zero«, RAND Science and Technology, 2002.

EDIE (2010)
Environmental Data Interactive Exchange (2010): »€5,000 grant for electric cars in Ireland«, www.edie.net/news/news_story.asp?id=17962 (letzter Zugriff 04.10.11).

EERE (2009)
U.S. Department of Energy (2009): »President Obama Sets a Target for Cutting U.S. Greenhouse Gas Emissions«, http://apps1.eere.energy.gov/news/news_detail.cfm/news_id=15650 (letzter Zugriff 04.10.11).

EGCI (2009)
European Green Cars Initiative (2009): »European Green Cars Initiative PPP«, http://www.green-cars-initiative.eu/public/documents/EGCI%20Roadmap.pdf/ (letzter Zugriff 04.10.11).

Egelhof (2011)
Otto Egelhof GmbH & Co. KG (2011): http://www.egelhof.de (letzter Zugriff 13.10.11).

EIB (2008)
European Investment Bank (2008): »European Clean Transport Facility«, http://www.unife.org/uploads/2009/Flyer%20ECTF%20FINAL.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

ELAB 2011
»ELAB: Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung«, 21. März 2011, Fraunhofer IAO, IAT Universität Stuttgart, 2011.

Electrification Coalition (2009)
Electrification Coalition (2009): »Electrification Roadmap - Revolutionizing Transportation and Achieving Energy Security«, http://www.electrificationcoalition.org/sites/default/files/SAF_1213_EC-Roadmap_v12_Online.pdf (letzter Zugriff 06.10.2011).

Electrification Coalition (2010)
Electrification Coalition (2010): »Fleet Electrification Roadmap - Revolutionizing Transportation and Achieving Energy Security«, Studie, November 2010.

ElringKlinger (2011)
ElringKlinger AG (2011): http://www.elringklinger.de (letzter Zugriff 13.10.11).

eMobil BW (2011)
Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (2011): »Fördermöglichkeiten im Themenbereich Elektromobilität«, http://www.e-mobilbw.de/Resources/Broschuere_Foerderung_Januar2011.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

eMobil BW (2011a)
e-mobil (2011): »Initiative Nachhaltige Mobile Region Stuttgart«, http://www.e-mobilbw.de/Pages/newssystem.php?ES3_100_State=Index&ES3_100_Id=14. (letzter Zugriff 16.9.2011).

E-Mobility (2010)
E-Mobility 21 (2010): »Bad Neustadt in Bayern wird Modellkommune für Elektromobilität«, http://www.e-mobility-21.de/nc/related-e-auto-news/artikel/44901-bad-neustadt-in-bayern-wird-modellkommune-fuer-elektromobilitaet/187/ (letzter Zugriff 04.10.11).

EnBW (2011)
EnBW (2011): »Die Elektronauten«, https://www.enbw.com/content/de/privatkunden/e_mobility/elektronauten/index.jsp (letzter Zugriff 04.10.11).

EPRI (2001)
Graham, R. (2001): »Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options«, Final Report, July 2001.

Europäische Kommission (2009)
Europäische Kommission (2009): »European Commissions' and Member States' R&D Programmes for the Electric Vehicle«, http://www.green-cars-initiative.eu/public/documents/Report_WS_EC-MS_Electric_Vehicle_R-D.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Europäische Kommission (2010)
Europäische Kommission (2010): »Eine europäische Strategie für saubere und energieeffiziente Fahrzeuge«, http://www.umwelt-online.de/PDFBR/2010/0260_2D10.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Europäische Kommission (2011)
Europäische Kommission (2011): »Klimawandel: Kommission legt Fahrplan für die Schaffung eines wettbewerbsfähigen CO2-armen Europa bis 2050 vor«, http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/272&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en (letzter Zugriff am 04.10.11).

Europäische Kommission (2011a)
Europäische Kommission (2011): »Green cars initiative«, http://ec.europa.eu/research/transport/road/green_cars/index_en.htm (letzter Zugriff 04.10.11).

Europäische Kommission (2011b)
Europäische Kommission (2011): »Risk-Sharing Finance Facility«, http://www.ramiri.eu/assets/images/1308658971risk-sharing_finance_facility.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Europäisches Parlament (2009)
Europäisches Parlament (2009): »Energiepolitik - Allgemeine Grundsätze«, http://www.europarl.europa.eu/parliament/expert/displayFtu.do?language=de&id=73&ftuId=FTU_4.13.1.html (letzter Zugriff 04.10.11).

European Commission (2005)
European Commission – Joint Research Centre (2005): »Hybrid for Road Transports«, http://ftp.jrc.es/EURdoc/eur21743en.pdf (letzter Zugriff 06.10.2011).

Fahrzeugleichtbau (2011)
Fraunhofer Innovationscluster KITe hyLITE (2011): http://www.fahrzeugleichtbau.de/verbundpartner.html (letzter Zugriff 06.10.2011).

FAZ (2010)
Frankfurter Allgemeine Zeitung (2010): »5000 Euro Zuschuss für Kauf von Elektroautos«, http://www.faz.net/artikel/C30770/frankreich-5000-euro-zuschuss-fuer-kauf-von-elektroautos-30071650.html (letzter Zugriff 04.10.11).

Fehrenbacher (2009)
Fehrenbacher, C. et al (2009): »Kühlung von Li-Ion Batteriemodulen«, Vortrag auf 2. Fachtagung des VDMA und der Universität Karlsruhe, 18. Feb. 2009.

FKFS (2011)
Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (2011): http://www.fkfs.de/kraftfahrzeugmechatronik/leistungen/elektromobilitaet/infrastruktur-fuer-elektrofahrzeuge/ (Letzter Zugriff: 29.9.2011).

focus (2010)
Focus Online (2011): http://www.focus.de/auto/news/reutlingen-bosch-eroeffnet-neues-halbleiter-werk_aid_490947.html (Letzter Zugriff: 21.09.2011).

Fortiss (2010)
Fortiss (2010): »Elektromobilität 2010 – Grundlagenstudie zu Voraussetzungen der Entwicklung von Elektromobilität in der Modellregion München«.

Franke (2011a)
Franke, J.; Dobroschke, A. (2011): »Prozessentwicklung für die Serienfertigung von elektrischen Fahrantrieben«, auf E-Motive Expertenforum »Elektrische Fahrzeugantriebe«, 07./08.09.2011.

Franke (2011b)
Franke, J. (2011): »Neue Antriebe, neue Montageprozesse, neue Mobilitätskonzepte - Elektromobilität braucht querdenkende Anlagenbauer«, VDMA – Infotag Elektromobilität, Frankfurt am Main - 30.05.2011.

Freialdenhoven (2009)
Freialdenhoven, A. (2009): »Wie reagiert die Automobil- und Zulieferindustrie auf die Herausforderung Elektromobilität?«, in: Erdmann, G. Herausforderung Elektromobilität (2009).

Friedrich (2007)
Friedrich, H. (2007): »Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung«, Vortrag DLR Schweiz, Villingen, 22. Juni 2007.

Frigge (2011)
Frigge, M. (2011): »Thermomanagement im Elektrofahrzeug«, 11. Internationales CAR-Symposium: »Innovationen und profitables Wachstum«, 27.01.2011, Bochum.

Frost & Sullivan (2009)
Frost & Sullivan (2009): »World ultracapacitor market« 31 Juli 2009, Studie, 2009.

Frost & Sullivan (2010)
Frost & Sullivan (2010): »360 Degree Perspective of the Global Electric Vehicle Market – 2010 Edition«.

Future Fleet (2011)
Future Fleet (2011): »Eine Forschungsinitiative unter der Leitung von SAP und MVV Energie«, http://www.futurefleet.de/ (letzter Zugriff 04.10.11).

Gargner (2009)
Gargner, J.; Wheelock, C. (2009): »Electric Vehicles: 10 Predictions for 2010«, http://www.pikeresearch.com/wp-content/uploads/2009/12/EVP-09-Pike-Research.pdf (letzter Zugriff 06.10.2011).

Garmisch (2010)
Markt Garmisch-Partenkirchen (2010): Projektskizze »Garmisch-Partenkirchen Bayerische Modellkommune für Elektromobilität«, http://nachhaltiges-garmisch-partenkirchen.de/download/CY5267f559X12a1a1d9de8X14f9/GAP_E_mobil_2018.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Göschel (2011)
Göschel, B. (2011): »Konferenzbeitrag des Vorsitzenden der AG6«, http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.proelek/Dokumente/vortraege/f00-goeschel.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

Großmann (2010)
Großmann, H. (2010): »E-Mobilität und Klimatisierung: Mögliche Potentiale«, 11. Karlsruher Kfz-Klima-Symposium »Kfz-Klimatisierung bei elektrischer Mobilität«, 16.09.2010, Karlsruhe.

GTAI (2010)
Germany Trade and Invest (2010): »E-Mobilität hält in den USA Einzug«, http://www.gtai.de/DE/Content/Online-news/2010/19/s4,hauptbeitrag=211514,layoutVariant=Standard,sourcetype=SE,templateId=render.html (letzter Zugriff 04.10.11).

GTAI (2010a)
Germany Trade and Invest (2010): » Viel Zuversicht bei Japans Elektroautoherstellern«, https://www.gtai.de/MKT201009218011 (letzter Zugriff 04.10.11).

GTAI (2011)
Germany Trade and Invest (2011): »VR China will sich bei E-Mobilität an die Spitze setzen«, http://www.gtai.de/DE/Content/__SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fIdent=MKT201105278014 (letzter Zugriff am 04.10.11).

GTAI (2011a)
Germany Trade and Invest (2011): »Frankreich beansprucht bei Elektroautos die Pole Position«, http://www.gtai.de/DE/Content/__SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fIdent=MKT201103248007 (letzter Zugriff 04.10.11).

GTAI (2011b)
Germany Trade and Invest (2011b): »Branche Kompakt – Kfz-Industrie und Kfz-Teile – Japan 2011«, http://www.gtai.de/fdb-SE,MKT201105108012,Google.html (letzter Zugriff 04.10.11).

GTAI (2011c)
Germany Trade and Invest (2011): »Spanien fördert Elektroautos«, http://www.gtai.de/MKT201105128005 (letzter Zugriff 04.10.11).

Hagen (2011)
Hagen, M. (2011): »Schweflige Zukunft für größere Reichweiten«, http://www.ict.fraunhofer.de/fhg/Images/Projektberichte_tcm137-151127.pdf (letzter Zugriff 14.09.2011).

Hartnig (2011)
Hartnig, C; Krause, T. (2011): »Neue Materialkonzepte für Lithium-Ionen-Batterien«, in: ATZ elektronik 3 2011.

Hofmann (2010)
Hofmann, P. (2010): «Hybridfahrzeuge», Springer-Verlag/Wien, 2010.

HS Deggendorf (2010)
Hochschule Deggendorf (2010): »Präsentation E-Wald«, http://www.e-wald.eu/images/stories/pdf/praesentation.pdf (letzter Zugriff am 04.10.11).

IAO (2011)
Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (2011): »Innovationsnetzwerk FutureCar«, http://www.iao.fraunhofer.de/geschaeftsfelder/engineering-systeme/602.html?lang=de (Letzter Zugriff 15.09.2011).

ICT (2011)
Fraunhofer Institut für Chemische Verfahrenstechnik ICT (2011): http://www.ict.fraunhofer.de (Letzter Zugriff 13.10.2011).

Idw (2008)
Informationsdienst Wissenschaft e. V. (2011): http://idw-online.de/pages/de/news290225 (Letzter Zugriff 14.9.2011).

IEA (2011)
International Energy Agency (2011): »Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles«, Studie, 2011.

IHK (2011)
Stahlecker, T.; Lay, G.; Zanker, C. (2011): »Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet?«, Industrie und Handelskammer Region Stuttgart [Hrsg.], 2011.

IMU Institut (2011)
Dispan, J. (2011): »Interne Dokumentation im Rahmen des Projekts ELAB«, IMU Institut, Stuttgart 2011.

International Energy Agency (2011)
International Energy Agency (2011): »Technology Roadmap - Electric and plug-in hybrid electric vehicles«, Updated June 2011, http://www.iea.org/papers/2011/EV_PHEV_Roadmap.pdf (letzter Zugriff 06.10.2011).

Jäger (2009)
Jäger, A.; Maloca, S. (2009): »Dokumentation der Umfrage Modernisierung der Produktion 2009«, Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2009.

JD Power (2010)
JD Power (2010): »Drive Green 2020 - Alternative Powertrain Forecast«, http://www.cargroup.org/documents/omotoso.pdf (letzter Zugriff am 04.10.11).

JD Power (2011)
JD Power (2011): »India Automotive 2020 Report Press Release«, http://www.jdpower.com/news/pressRelease.aspx?ID=2011081 (letzter Zugriff 04.10.11).

Johnson Controls (2011)
Johnson Controls (2011): http://www.cleanthinking.de/wp-content/uploads/Lithium-Ionen-Batterie-von-Johnson-Controls-Saft.jpg (letzter Zugriff 05.10.2011).

Kampker (2011)
Kampker, A. (2011): »Forschungsvereinigung Antriebstechnik«, http://www.mm-erneuerbare-energien.de/e-mobility/articles/307536/ (letzter Zugriff 03.10.2011).

Kinkel (2007)
Kinkel, S.; Zanker, C. (2007): »Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie«, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 2007.

KIT (2011a)
Karlsruher Institut für Technologie (2011), KIT Presseinformation 047/2011: »Ganzheitlicher Ansatz für die Mobilität der Zukunft.«: http://www.kit.edu/besuchen/pi_2011_6166.php (letzter Zugriff: 20.09.2011).

KIT (2011b)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Technologiecluster Composite - TC² (2011), http://www.fast.kit.edu/lbt/2899.php (letzter Zugriff 06.10.2011).

Klassen (2011)
Klassen, V.; Leder, M.; Hossfeld, J. (2011): »Klimatisierung im Elektrofahrzeug«, in: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 02/2011, Springer Automotive Media, Wiesbaden.

Kraftfahrtbundesamt (2011a)
Kraftfahrtbundesamt (2011): »Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen 2010.«

Kraftfahrtbundesamt (2011b)
Kraftfahrtbundesamt (2011): »Bestand an Personenkraftwagen zum 1. Januar 2011 nach Bundesländern und Kraftstoffarten.«

Lanza (2011a)
Lanza, G.; Peters, S.; Stockey, S. (2011): »Auswirkungen neuer Mobilitätsformen auf die Produktion«, in: ZWF, Jahrgang 106, Heft/Band 5/2011, Verlag Carl-Hanser-Verlag, 2011.

Lanza (2011b)
Lanza, G. (2011): »Produktionstechnik: Enabler der Elektromobilität«, VDMA Tagung: Elektromobilität und die Montage- und Handhabungstechnik, 30.05.11, Frankfurt am Main.

Leclanché S.A. (2011)
Leclanché S.A. (2011): »›Grüner Verkehr‹ mit hochkapazitiven Lithium-Ionen-Batterien in Automobilanwendungen«, http://www.leclanche.eu/automobilindustrie.26.1.html (letzter Zugriff 06.10.2011).

Leichtbauzentrum (2011)
Leichtbauzentrum Baden-Württemberg e.V. (2011): http://www.lbz-bw.de/ (letzter Zugriff 06.10.2011).

Leßnerkraus (2010)
Leßnerkraus, G. (2010): »Die Landesinitiative Elektromobilität und e-mobil BW GmbH – die neue Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg«; http://www.e-mobilbw.de/Resources/Lessnerkraus_gesamt.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

LIB2015 (2011)
Innovationsallianz (2011): »Lithium Ionen Batterie LIB2015«, http://www.lib2015.de/index.php (letzter Zugriff 05.10.2011).

Logistik BW (2011)
Logistik Baden-Württemberg (2011): »Land bewilligt e-mobil BW GmbH Zuschuss von zwei Millionen Euro«, http://www.logistik-bw.de/Nachricht-lesen.150+M504e0001edc.0.html (letzter Zugriff am 04.10.11).

Lutz (2008)
Lutz, B.; Sauer, U.; De Doncker, R. W. (2008): »Evolution of Batteries and Charging Concepts«, Seminar Clean Mobility, KHLim, Diepenbeek, 16. Dez. 2008.

M+W Group (2010)
M+W Group (2010): »M+W Group Kunde European Batteries eröffnet erste Lithium-Ionen Batteriefabrik«, http://www.mwgroup.net/de/news_media/m_w_group_news/archiv_2010.html (letzter Zugriff 06.10.2011).

März (2011)
März, M. (2011): »Leistungselektronik für e-Fahrzeuge – Konzepte und Herausforderungen«, Drive-E-Akademie 2011, Berlin, 14.– 18. Februar 2011.

Mathoy (2010)
Mathoy, A. (2010): »Grundlagen für die Spezifikation von E-Antrieben«, in: MTZ 9/2010.

McKinsey (2011a)
McKinsey (2011): http://www.mckinsey.de/html/kompetenz/industry_practices/autoassembly/autoassembly_impact_drive.asp, (letzter Zugriff 03.10.2011).

McKinsey (2011b)
McKinsey (2011): »Thesen zur Zukunft der Elektromobilität in Deutschland«, http://www.igmetall-bayern.de/fileadmin/00_Redaktion/02_Downloads/AuMoKo/AuMoKo14-McKinsey-Malorny.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

McKinsey (2011c)
McKinsey (2011): »Boost – Transforming the powertrain value chain – a portfolio challenge«, Studie, 2011.

mechatronik (2011)
Kompetenznetzwerk Mechatronik BW (2011): http://www.mechatronik-ev.de/Ueber_uns.html (letzter Zugriff: 06.10.2011).

MeRegioMobil (2011a)
MeRegioMobil (2011): »Auf zur mobilen Energiezukunft«, http://www.meregiomobil.de/ (letzter Zugriff 04.10.11).

MeRegioMobil (2011b)
MeRegioMobil (2011): »IKT für Elektromobilität«, http://www.meregiomobil.de/index.php?page=partner-enbw (letzter Zugriff 14.9.2011).

Miller (2011)
Miller, J. (2011): »Analysis of Current and Projected Battery Manufacturing Costs for Electric, hybrid, and Plug-in hybrid Electric Vehicles«, EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 5.-9., 2010.

MIT (2007)
Kromer, M. A.; Heywood, J. B. (2007): »Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet«, Publication No. LFEE 2007-03 RP, Massachusetts Institute of Technology, May 2007.

MIT (2008)
Bandivadekar, A.; Bodek, K.; Cheah, L.; et al. (2008): »On the Road in 2035 - Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions«, Massachusetts Institute of Technology, July 2008.

Mock (2010)
Mock, P. (2010): »Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2 –Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)«, Universität Stuttgart, 2010.

Modellstadt Mannheim (2011)
Modellstadt Mannheim (2011): http://www.modellstadt-mannheim.de/moma/web/de/home/index.html (Letzter Zugriff: 6.10.2011).

Möller (2011)
Möller, K. C. (2011): »Zukunft der Akkutechnologie«, in: ATZelektronik 3/2011.

NOW GmbH (2011)
NOW GmbH (2011): »Umsetzungsbericht zum Förderprogramm ›Elektromobilität in Modellregionen‹ des BMVBS«, Stand Mai 2011, http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/66620/publicationFile/37873/modellregionen-elektromobilitaet-umsetzungsbericht-mai-2011.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

NPE (2011a)
Nationale Plattform Elektromobilität (2011): »Zweiter Bericht der NPE«, z. B. auf http://www.bildungsgipfel2008.de/pubRD/zweiter_bericht_nationale_plattform_elektromobilitaet.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

NPE (2011b)
Nationale Plattform Elektromobilität (2011): »Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität - Anhang«.

NPE AG6 (2010)
Nationale Plattform Elektromobilität (2010): »Zwischenbericht der AG 6«, http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/zwischenbericht-ag6,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf_ (letzter Zugriff 11.10.2011).

NRW (2010)
ElektroMobilität NRW (2010): »Förderwettbewerb ›Elektromobil. NRW‹ erfolgreich: 22 Projektideen sollen mit insgesamt 46,5 Millionen Euro gefördert werden«, http://www.elektromobilitaet.nrw.de/page.asp?RubrikID=13065&CatID=13065 (letzter Zugriff 04.10.11).

NuCellSys (2011)
NuCellSys GmbH (2011): http://www.nucellsys.com (letzter Zugriff 13.10.11).

NY Times (2010)
The New York Times (2010): »China to Subsidize Electric Cars and Hybrids«, http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/06/02/china-to-start-pilot-program-providing-subsidies-for-electric-cars-and-hybrids (letzter Zugriff 04.10.11).

Oekonews (2009)
Oekonews (2009): »Frankreich unterstützt Elektromobilität«, http://www.oekonews.at/?mdoc_id=1041739 (letzter Zugriff 04.10.11).

Oertel (2008)
Oertel, D. (2008): »Energiespeicher- Stand und Perspektiven«, http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab123.pdf (letzter Zugriff 05.10.2011).

Piffaretti (2011)
Marco Piffaretti: »Lessons learned aus Mendrisio«, 2011.

PRTM (2011)
PRTM (2011): »Neue Wertschöpfungskette Elektromobilität«, http://www.prtm.com/uploadedFiles/Thought_Leadership/Articles/External_Articles/PRTM_Neue_Wertsch%C3%B6pfungskette_Elektromobilit%C3%A4t.pdf (letzter Zugriff 05.10.2011).

Pudenz (2011)
Pudenz, K. (2011): »Kolibri-Technologie besteht sicherheitstechnische Untersuchungen«, http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/13567/Kolibri-Technologie-besteht-sicherheitstechnische-Untersuchungen.html (letzter Zugriff 14.09.2011).

Qemo (2011)
Qemo (2011): »Qualifizierung für die Elektromobilität«; http://www.uni-ulm.de/in/npe-qemo/vortraege-zum-herunterladen.html (letzter Zugriff 03.10.2011).

RB Zentrum (2011)
Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik (2011): http://www.rbzentrum.de/ (Letzter Zugriff: 14.9.2010).

Region Stuttgart (2011)
Verband Region Stuttgart (2011): »Statusbericht Modellregion Elektromobilität – Anträge der SPD-Fraktion vom 18.4.2011 und 6.7.2011«, www.region-stuttgart.org/vrs/download.jsp?docid=11078 (letzter Zugriff 04.10.11).

ReModHarz (2011)
Regenerative Modellregion Harz: http://www.regmodharz.de/ (Letzter Zugriff: 10.10.2011).

Reuters (2011)
Reuters (2011): »China regions to have binding CO2 targets«, official, http://www.reuters.com/article/2011/01/12/us-china-carbon-idUSTRE70B2HD20110112 (letzter Zugriff 04.10.11).

Robert Bosch (2011)
Robert Bosch (2011): »Reducing CO2 emissions with optimized internal-combustion engines«, http://www.bosch.com/media/en/com/sustainability/current/news/2011/_co2_emissions.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

Robert Bosch (2011a)
Robert Bosch (2011): http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5254&locale=de (Letzter Zugriff 14.9.2011).

Robert Bosch (2011b)
Robert Bosch (2011): http://www.bosch-si.de/fileadmin/pdf/press/110829_FactSheet_eMobilitySolutions_DE_1.pdf (Letzter Zugriff: 5.10.2011).

Roland Berger (2009)
Roland Berger Strategy Consultants (2009): »The future drives electric«, EVS 24, Stavanger, May 15th, 2009.

Roland Berger (2010)
Roland Berger Strategy Consultants (2010): »Powertrain 2020: Li-Ion batteries – the next bubble ahead?«, München/Shanghai/Detroit, 2010.

Roland Berger (2011a)
Roland Berger Strategy Consultants (2011): »Global Vehicle LiB Market Study«, Detroit/München, August 2011.

Roland Berger (2011b)
Roland Berger Strategy Consultants (2011): »Zukunftsfeld Elektromobilität«, Studie, 2011.

SAE International (2011)
SAE International (2011): »Vehicle Electrification – Prime Time for batteries«, May 25, 2011, http://www.nxtbook.com/nxtbooks/sae/11EVSD0525/ (letzter Zugriff 06.10.2011).

Saft Brochure (2008)
Saft Brochure (2008): »Li-ion energy storage systems for large space and defense applications«, October 2008.

Saftbatteries (2011)
Saftbatteries (2011): http://www.saftbatteries.com/images/Produits/Photos/VLFe-2.jpg (letzter Zugriff 05.10.2011).

Santini (2010)
Santini, D. et al. (2010): »Modeling of Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for HEVs, PHEVs, and EVs«, EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 5.-9., 2010.

Sauer (2009)
Sauer (2009): »Elektrische Engergiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen«, http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/vortrag_tu_berlin_29012009 (letzter Zugriff 05.10.2011).

SB LiMotive (2011)
SB LiMotive (2011): http://www.sblimotive.com/en/products.html (letzter Zugriff 05.10.2011).

SB LiMotive (2011a)
SB LiMotive Germany GmbH (2011): http://www.sblimotive.com/de/home.html (letzter Zugriff 05.10.2011).

Schäfer (2010)
Schäfer, H. (2010): »Die Zeit ist reif«, ATZ online, http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/190/Die-Zeit-ist-nun-reif.html (letzter Zugriff 14.09.2011).

Scotiabank (2011)
Scotiabank (2011): »Global Auto Report«, http://www.scotiacapital.com/English/bns_econ/bns_auto.pdf (letzter Zugriff am 04.10.11)

Spiegel (2011)
Spiegel (2011): »Eine Branche unter Strom«, http://www.spiegel.de/thema/elektroautos/dossierarchiv-2.html (Letzter Zugriff 04.10.11).

Statistisches Bundesamt (2011)
Statistisches Bundesamt (2011): »Produzierendes Gewerbe – Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2010«.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011a)
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011): »Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden-Württemberg 2010 – Jahresergebnis für Betriebe (Berichtskreis 20+)«.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011b)
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2011): »Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden Württemberg 2010 – Jahresergebnis für Betriebe (Berichtskreis 50+)«.

STMWIVT (2009)
Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2009): »Richtlinien zur Durchführung des Förderprogramms Elektromobilität«, http://www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/technologie/Richtlinien_7071-W-1221.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Systemanalyse BW^{e} mobil (2010)
Spath, D.; Loleit, M.; Klausmann, F.; Rothfuss, F.; Sachs, C.; Rose, H.; Voigt, S. (2010): »Systemanalyse BW^{e} mobil – IKT- und Energieinfrastruktur für innovative Mobilitätslösungen in Baden-Württemberg«. Hrsg.: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg; e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie; Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart 2010.

Teslamotors (2011)
Teslamotors (2011): http://www.teslamotors.com/design/under_the_skin.php (letzter Zugriff 05.10.2011).

Tübke (2008a)
Tübke (2008): Technology Review 05/2008, S.44, Fraunhofer ICT Pfinztal, 2008.

Tübke (2008b)
Tübke, J.; McDowall, J. et al. (2008): »Zielkonflikte bei der Sicherheit von industriellen Lithium-Ionen Batteriesystemen«, Fraunhofer ICT, Pfinztal, 2008.

Tübke (2011)
Tübke, J.; Hagen, M. (2011): »Energiespeicher für Elektrofahrzeuge – Trends und Perspektiven«, Drive-E-Akademie, Berlin, 14.–18. Februar 2011.

U.S. Department of Energy (2011)
U.S. Department of Energy (2011): »Federal Tax Credits for Electric Vehicles«, http://www.fueleconomy.gov/feg/taxevb.shtml (letzter Zugriff 04.10.11).

U.S. Department of Energy (2010)
U.S. Department of Energy (2010): »Electrical and Electronics Technical Team Roadmap«, http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/eett_roadmap_12-7-10.pdf (letzter Zugriff 06.10.2011).

Umweltbundesamt (2008)
Herbener, R.; Jahn, H.; Wetzel, F. (2008): »Technikkostenschätzung für die CO_2-Emissionsminderung beim Pkw«, Kurzfassung 6. August 2008, Umweltbundesamt 2008.

Umweltbundesamt (2011)
Umweltbundesamt (2011):» Emissionsmindernde Anforderungen im Verkehr«, http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2363 (letzter Zugriff 03.10.2011).

Umweltministerium (2010)
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2010), http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/61179/Anlage_Elektromobilitaet.pdf?command=downloadContent&filename=Anlage_Elektromobilitaet.pdf (letzter Zugriff 04.10.11).

Universität Stuttgart (2009)
Blesl, M; Bruchof, D.; Hartmann, N.; Özdemir, D.; Fahl, U.; Eltrop, L.; Voß, A. (2009): »Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität« (Endbericht), Universität Stuttgart, 2009.

Universität Ulm (2011)
Universität Ulm (2011): »Projektsteckbrief - Integrationsplattform Qualifizierung durch Aus- und Weiterbildung für die Elektromobilität (QEMO)«, http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.proelek/Dokumente/QEMO_Projektsteckbrief.pdf (letzter Zugriff 03.10.2011).

USA Today (2011)
USA Today (2011): »$25 billion green-car fund dodges bullet«, http://www.usatoday.com/money/autos/story/2011-09-26/energy-loan/50561868/1 (letzter Zugriff 04.10.11).

VDA (2011)
Verband der Automobilindustrie (2011): http://www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/allgemeines/index.html (letzter Zugriff 03.10.2011).

VDMA (2011)
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), http://www.karriere-im-maschinenbau.org/wps/portal/Home/de/vorOrt/Baden_Wuerttemberg/ (letzter Zugriff 13.08.2011)

Vectopower (2011)
ARADEX AG (2011), http://www.vectopower.com (Letzter Zugriff 14.09.2011).

Welt online (2011)
Welt online (2011): »Benzin ist angesichts des Ölpreises viel zu teuer«, http://www.welt.de/wirtschaft/energie/article12355462/Benzin-ist-angesichts-des-Oelpreises-viel-zu-teuer.html (letzter Zugriff 04.10.11).

Winter (2011)
Winter, M. (2011): »Engpass ist der Elektrolyt« in ATZ online, http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/223/Engpass-ist-der-Elektrolyt.html (letzter Zugriff 05.10.2011).

WRS (2011a)
Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (2011): »Kompetenzatlas Elektromobilität Region Stuttgart«.

WRS (2011b)
Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (2011): »Producer Services for European Sustainability and Competitiveness«, http://www.prosesc.org/ (letzter Zugriff 15.09.2011).

ZSW (2011)
ZSW Presseinformation 09/2011: »Millionen vom Land für Forschungsprojekt. ZSW baut in Ulm Produktionstechnologien für Lithium Akkus auf.«, http://www.zsw-bw.de/fileadmin/ZSW_files/Infoportal/Presseinformationen/docs/pi09-2011-ZSW-5MioFoerderungLandBW.pdf/ (letzter Zugriff 20.09.2011).

ZSW (2011a)
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (2011), http://www.zsw-bw.de/themen/batterien-superkondensatoren/ (letzter Zugriff 05.10.2011).

ZSW (2011b)
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (2011): Standort Ulm, http://www.zsw-bw.de/das-zsw/standorte-mit-elab/ulm/ (letzter Zugriff 06.10.2011).

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Die Vielfalt elektromobiler Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb 8
Abbildung 2: Die Vielfalt elektromobiler Fahrzeugkonzepte 9
Abbildung 3: Auswahl aktueller und geplanter elektromobiler Fahrzeugkonzepte 10
Abbildung 4: Ragone Plot 11
Abbildung 5: Die gravimetrische Energiedichte unterschiedlicher Energieträger im Vergleich 12
Abbildung 6: Verschiedene Energiespeicher im Vergleich 13
Abbildung 7: Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterietypen 15
Abbildung 8: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung 18
Abbildung 9: Die Wohlfühltemperatur von Batteriezellen 19
Abbildung 10: Drehmoment und Leistungskennlinien im Vergleich 19
Abbildung 11: Motortopologien 20
Abbildung 12: Radnabenantriebe: Historischer Rückblick und aktuelle Konzepte 23
Abbildung 13: Mögliche Topologie Leistungselektronik mit HV-Batterie und NV-Bordnetz 24
Abbildung 14: Pulswechselrichter und seine wesentlichen Bestandteile 25
Abbildung 15: Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ion-Zelle bei Schnellladung 26
Abbildung 16: Abnahme der mit einem batterieelektrischen Fahrzeug erzielbaren Reichweite mit zunehmendem Leistungsbedarf des Klimasystems 28
Abbildung 17: Kühl- (links) und Heizelemente (rechts) für batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Range-Extender 28
Abbildung 18: Potenziale zur Verbrauchsreduktion (kumulierte Kosten über der kumulierten CO_2-Einsparung) 30
Abbildung 19: Aspekte bei der Auswahl eines Fertigungsstandortes für Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs 32
Abbildung 20: Markthochlaufkurve der NPE 35
Abbildung 21: Ergebnisse der Metastudie »Marktentwicklung Antriebskonzepte« 37
Abbildung 22: Verteilung der Lebenszykluskosten von konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen 38
Abbildung 23: 5-Jahres-TCO für 5 verschiedene Fahrzeuge (gekauft in 2020 und in Deutschland 14.500 km pro Jahr gefahren) 39
Abbildung 24: Kostenvergleich Renault Fluence Z.E. (batterieelektrisch) und Renault Fluence Dynamique (Ottomotor) 39
Abbildung 25: IKT als Schlüssel für erfolgreiche Elektromobilität 41
Abbildung 26: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebskonzepte 42
Abbildung 27: Entwicklung von Fahrzeugbesitz und Carsharing-Nutzung 2000–2010 42
Abbildung 28: Auswahl von Carsharing-Anbietern mit Elektrofahrzeugen in ihren Flotten 43
Abbildung 29: Kaufanreiz für Elektroautos in verschiedenen Ländern im Überblick 45
Abbildung 30: Weltweite Förderanstrengungen im Bereich Elektromobilität im Überblick 46
Abbildung 31: Landkarte von wichtigen Automobilzulieferunternehmen in BW 48
Abbildung 32: Neuzulassungen von Elektro- und Hybrid-Personenkraftwagen im Vergleich 49
Abbildung 33: Struktur der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg 50
Abbildung 34: Erwartete Kostendegression von Batteriepacks 52
Abbildung 35: Entwicklung der Herstellkosten von batterieelektrischen Fahrzeugen im Vergleich 53
Abbildung 36: Änderung globales Marktvolumen: Aktuell - 2020 [in Mio. Euro] 55

Abbildung 37: Änderung Marktvolumen für Baden-Württemberg: Aktuell - 2020 [in Mio. Euro] 56
Abbildung 38: Potenzielle Beschäftigungseffekte in Baden-Württemberg im Jahr 2020 57
Abbildung 39: Auswahl von Akteuren im Bereich Batterietechnik 63
Abbildung 40: Auswahl von Akteuren im Bereich elektrifizierter Antriebsstrang 66
Abbildung 41: Auswahl von Akteuren im Bereich Leichtbau 67
Abbildung 42: Auswahl von Akteuren im Bereich Brennstoffzelle 68
Abbildung 43: Auswahl von Akteuren im Bereich Ladeinfrastruktur 70
Abbildung 44: Auszug von Forschungs- und Demonstrationsprojekten in Baden-Württemberg 73

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Antiblockiersystem
AFBW	Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg
AG 6	Arbeitsgruppe 6
AISBL	Association internationale sans but lucrative
ASM	Asynchronmaschine
ASR	Antriebsschlupfregelung
BBA-BW	Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
BEV	Battery Electric Vehicle
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BW	Baden-Württemberg
CAI	Controlled Auto-Ignition
CEP	Clean Energy Partnership
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNG	Compressed Natural Gas
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CROME	Crossborder Mobility for EVs
ct	Cent
CVT	Continuously Variable Transmission
DC/DC-Wandler	Gleichspannungswandler
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoD	Depth of Discharge
EERE	Office of Energy Efficiency and Renewable Energy
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel cell Electric Vehicle
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
Fraunhofer IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
Fraunhofer ICT	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Fraunhofer IISB	Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
Fraunhofer IWM	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik
Fraunhofer LBF	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit
FuE	Forschung und Entwicklung
GaN	Galliumnitrid
GTAI	Germany Trade and Investment

H2	Wasserstoff
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HV	Hochvolt
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	Internationale Energieagentur
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IHK	Industrie- und Handelskammer
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMU	Institut für Medienforschung und Urbanistik
INTERREG IVC	Innovation & Environment Regions of Europe Sharing Solutions
IT	Informationstechnik
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologie
iZEUS	Intelligent Zero Emission Urban System
KFL	Kompetenzzentrum Fahrzeugleichtbau
Kfz	Kraftfahrzeug
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterie
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LBZ-BW e.V	Leichtbauzentrum Baden-Württemberg e. V.
LCC	(Life Cycle Cost) Lebenszykluskosten
$LiCoO_2$	Lithium-Kobalt-Oxid
$LiCoPO_4$	Lithium-Kobalt-Phosphat
$LiFePO_4$	Lithium-Eisen-Phosphat
Li-Ion	Lithium-Ion
$LiMn_2O_4$	Lithium-Mangan-Oxid
$LiNiCoAlO_2$	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
$LiNiMnCoO_2$	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
$LiNiPO_4$	Lithium-Nickel-Phosphat
$LiSi_5$	Silizium-Anodenmaterial
LPG	Liquified Petroleum Gas
max.	maximal
Mio.	Millionen
Mn_3O_4/C-Gemisch	Mangan-Oxid-Kohlenstoff-Gemisch
MOSFET	Metal oxide semiconductor field-effect transistor

Mrd.	Milliarde
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne
Nd-Fe-B-Magneten	Neodym-Eisen-Bor-Magneten
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NRW	Nordrhein-Westfalen
NV	Niedervolt
NVH	Noise-Vibration-Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PTC	Positive-Temperature-Coefficient
REEV	Range-Extender Electric Vehicle
SiC	Siliziumcarbid
SoC	State-of-Charge
SSM	Stromerregte Synchronmaschine
STMWIVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
SyR	Synchrone Reluktanzmaschine
TCO	Total Cost of Ownership
TiO_2	Titandioxid
TTZ	Technologie- und Transferzentrum Leichtbau
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
US-$	US-Dollar
V	Volt
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VES	Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
VVTL	Variable Valve Timing and Lift-intelligent System
VW	Volkswagen
VZÄ	Vollzeitäquivalent
W/kg	Watt pro Kilogramm (Leistungsdichte)
WBZU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle e.V.
Wh/kg	Wattstunde pro Kilogramm (Energiedichte)
WRS	Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

EXPERTENINTERVIEWS

Experteninterview Dr. Jürgen Dispan
Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter
Forschung in den Bereichen: Stadt-/Regionalentwicklung, Cluster-/Branchenprojekte, Regionalpolitik, Wirtschaftsförderung,
IMU Institut, vom 11.08.2011

Experteninterview Peter Froeschle
Leiter Strategische Energieprojekte & Marktentwicklung Brennstoffzellen-/Batteriefahrzeuge,
Daimler AG, vom 21.09.2011

Experteninterview Dr. Andreas Gutsch
Projektleitung Competence E am KIT,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), vom 05.09.2011

Experteninterview Heiko Herchet
Leiter Kompetenzzentrum Elektromobilität,
EDAG Group, vom 15.08.2011

Experteninterview Jürgen Jost
Bereichsleiter Forschung und Entwicklung,
Dürr Systems GmbH, vom 17.08.2011

Experteninterview Martin Kreuter,
Corporate Development, New Business - Industry Innovation,
Bayer MaterialScience, vom 10.08.2011

Experteninterview Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Institutsleitung wbk Institut für Produktionstechnik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), vom 09.08.2011

Experteninterview Manfred Müller
Referatsleiter Abteilung Industrie und Verkehr,
IHK Region Stuttgart, vom 06.09.2011

Experteninterview Marco Piffaretti
Managing Director,
Protoscar SA, vom 14.09.2011

Experteninterview Dr. Stefan Senitz
Referent Technologie, Federführung Technologie der Baden-Württembergischen IHKs,
IHK Karlsruhe, vom 26.08.2011

Experteninterview Prof. Dr. Werner Tillmetz
Mitglied des Vorstandes - Elektrochemische Speichertechnologien,
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), vom 21.09.2011

Experteninterview Sebastian Wider
Geschäftsführer SW-Engineering Services,
SW-Engineering GmbH, vom 19.08.2011

Impressum

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

Redaktion
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Dieter Spath, Florian Rothfuss, Florian Herrmann, Simon Voigt, Marius Brand, Susanne Fischer, Thomas Ernst, Hannes Rose, Martha Loleit

Koordination Studie
e-mobil BW GmbH
Isabell Knüttgen
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)
Florian Herrmann

Layout/Satz/Illustration
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)
Hannah Würthwein
TEAM STRUNZ | tswa.de
Agentur für Marketing & Kommunikation

Fotos
@ fotolia.de: Tom-Hanisch
@ istockphoto.de: MichaelUtech, KEMAL BA, Lya_Cattel, Ivdesign77, Nikada

Druck
E&B engelhardt und bauer Druck und Verlag GmbH
Käppelestraße 10
76131 Karlsruhe

Auslieferung und Vertrieb
e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Telefon 0711 / 892385-0
Fax 0711 / 892385-49
E-Mail info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

2. geänderte Auflage im Dezember 2011

© 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

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C105340
www.fsc.org

Print kompensiert
Id-Nr. 1115500
www.bvdm-online.de