
2.1 Elektromobilität als Zukunftstechnologie

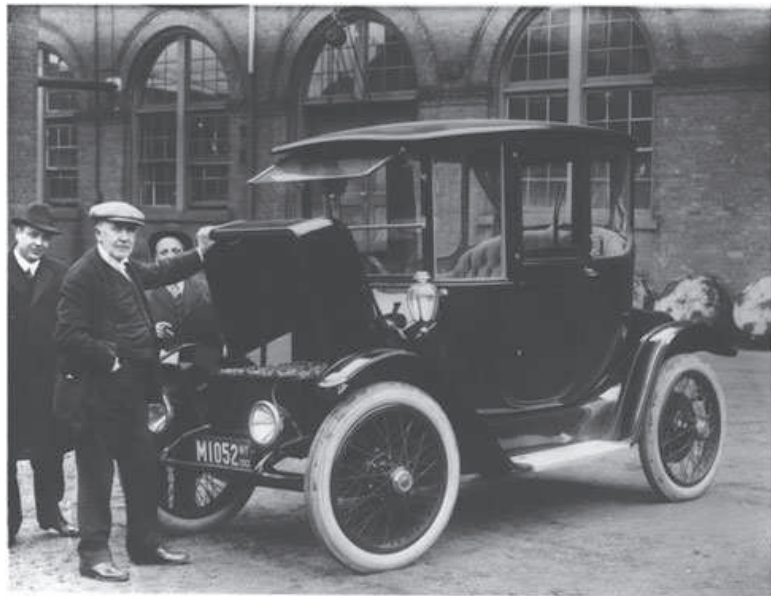
2.1.1 Historische Entwicklung der Elektromobilität

Das 19. Jahrhundert brachte mehrere wichtige Entwicklungen hervor, Grundlagen für die Elektromobilität als Antriebskonzept. Bereits im Jahr 1796 konstruierte der Italiener Alessandro Volta das erste funktionsfähige galvanische Element, die erste elektrische Batterie (Volta-Säule). Sie konnte aber nach der Entladung nicht wieder aufgeladen werden.

Um 1830 erfand Joseph Henry den Gleichstrommotor, der ab 1878 im industriellen Einsatz war. 1866 hatten der Deutsche Ernst Werner von Siemens und der englische Physiker Charles Wheatstone unabhängig voneinander und fast zeitgleich eine selbsterregte Gleichstrommaschine entwickelt, die auf dem von ihnen entdeckten dynamoelektrischen Prinzip beruhte.

Der Italiener Salvatore Dal Negro konstruierte in Padua den ersten Motor, der allein durch elektromagnetische Kraft bewegt wurde. Der Amerikaner Thomas Davenport konstruierte das erste batteriebetriebene Elektrofahrzeug im Jahr 1834. Bereits drei Jahre später, 1837, folgte die erste Probefahrt einer batteriebetriebenen Lokomotive in England. Diese ersten Elektrofahrzeuge wurden noch mit nicht wieder aufladbaren Batterien konzipiert. Der nächste Meilenstein war die Erfindung wieder aufladbarer Bleiakkumulatoren. 1803 gelang es Johann Wilhelm, eine Vorform des Akkumulators zu bauen, welcher die Wiederaufladung ermöglichte. Ein halbes Jahrhundert später wurde der bekannte Bleiakkumulator entwickelt. Und 1881 stellte der französische Ingenieur Camille A. Fauré in Paris einen Blei-Blei-Akkumulator vor, der elektrische Energie speichern konnte. Gustavo Trouve nutzte diese neuartige Technologie, um das erste Elektrofahrzeug zu bauen, das durch wieder aufladbare Bleiakkumulatoren betrieben wurde. Seine Konstruktion auf drei Rädern erreichte Geschwindigkeiten von bis zu 12 km/h (Becker 2010, S. 1).

Abb. 2.1 Detroit Electric Car aus der Hochzeit der E-Fahrzeuge um 1912. (Quelle: The National Museum of American History, Smithsonian Institution)



Die folgenden Jahrzehnte waren von einer hohen Forschungsaktivität in Europa und den USA geprägt, allein zwischen 1885 und 1895 gab es einen rasanten technischen Fortschritt. Die Drehstromtechnik wurde ebenso entwickelt wie das Prinzip des Asynchron- und des Synchronmotors (vgl. Naunin 2007, S. 1 f.; Yay 2010, S. 15 f.). Damit waren die wichtigsten Voraussetzungen für den Elektromotor realisiert: ein für damalige Verhältnisse leistungsstarker Akkumulator mit passendem Elektromotor bzw. eine Auswahl an Motorentypen, mit denen experimentiert werden konnte. Zunächst konnte sich der elektrifizierte Antriebsstrang besser durchsetzen als der Otto-Motor. Eingesetzt wurden Elektromotoren in Fahrzeugen, aber auch im Schienenverkehr und im Schiffsverkehr (vgl. Yay 2010, S. 15 f.). Ende des 19. Jahrhunderts wurden 38 % aller produzierten Autos in den USA mit Elektromotoren betrieben. Diese Technik galt als zuverlässig, geräuscharm und sicher. Die begrenzte Reichweite im Stadtverkehr spielte keine große Rolle. Der Verbrennungsmotor hingegen hatte zu dieser Zeit noch mit einer Reihe von Schwierigkeiten zu kämpfen: Er galt als laut, stinkend, wetterabhängig und gefährlich. Im Winter gefror das Kühlwasser und im Sommer musste es ständig nachgefüllt werden.

Die bestehenden Elektromotoren und Akkumulatoren wurden von verschiedenen Ingenieuren und Entwicklern so weit verbessert, dass mehrere Geschwindigkeitsrekorde aufgestellt werden konnten. So wurde im April 1899 bei einer Fahrt von Jenatzy mit dem Elektroauto „Le Jamais Contente“ eine Spitzengeschwindigkeit von 105,88 km/h gemessen – Ergebnis eines Rekordwettfahrens zwischen Graf Gaston de Casseloup-Laubat und Camille Jenatzy. Auch die Reichweite der Fahrzeuge wurde vergrößert. Ein Wagen von Jeantaud schaffte 1899 die Strecke von Rouen bis Paris (135 km) ohne weitere Batterieladung. Ferdinand Porsche präsentierte 1901 sein sog. „Type-mix“-Modell. Hierbei lieferte ein Generator mit Benzinmotor den benötigten Strom für den Elektromotor und machte die schwere Batterie überflüssig. Es handelte sich bei dem „Type-mix“ demnach um den ersten „Hybridantrieb“ (vgl. Köppen 1993, S. 220 ff., Abb. 2.1).

Im Jahr 1912 erreichte die Elektromobilbranche ihren Höhepunkt. Weltweit produzierten 20 Hersteller fast 34.000 Autos mit einem elektrifizierten Antriebsstrang (Möser 2002, S. 52). Nachdem aber zur gleichen Zeit das Starten von Benzinern durch das Betätigen von Anlassern (Erfindung des Elektrostarters) schneller und bequemer wurde, erlebte der elektrifizierte Antriebsstrang in den folgenden Jahren einen ersten Niedergang. Die aufwändige Instandhaltung der Akkumulatoren, die kurze Fahrdistanz sowie der geringe Benzinpreis verstärkten die Nachfrage nach Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Becker 2010, S. 1). Auch die Entscheidung von Henry Ford für den Verbrennungsmotor trug zur Verbreitung bei, ebenso wie die Konstruktion des „Model T“ 1908 mit Otto-Motor und die zeitgleiche Innovation im Produktionsprozess. Ford gelang es, die Durchlaufzeit und die Ausbringung für das „Model T“ deutlich zu verbessern (von ca. 12 auf 1,5 h). Gleichzeitig übernahm er das Prinzip der Fertigungsstraße von Eli Whitney, wodurch die Fahrzeuge mit größtenteils ungelerten Arbeitskräften kostengünstig produziert werden konnten (vgl. McCalley 1994; Yay 2010, S. 15).

Weiterhin müssen die beiden Weltkriege als treibende Kräfte bei diesem Paradigmenwechsel genannt werden. Aber der elektrifizierte Antriebsstrang verschwand nicht komplett, sondern überlebte in verschiedenen Nischen.

Ende der 1960er Jahre gab es aufgrund des stark zunehmenden Autoverkehrs die ersten Warnungen vor erhöhten Emissionen (<http://www.rwe-mobility.com> (Stand: 01.08.2011)). Der weltweite Kraftfahrzeugbestand belief sich im Jahr 1965 auf 177 Mio. Fahrzeuge. Zehn Jahre später waren weltweit 327 Mio. Fahrzeuge zugelassen (Ward's Automotive Group 2008 (Stand: 01.08.2011)). Die Aussichten für eine erfolgreiche Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge verbesserten sich seitdem und leiteten einen Paradigmenwechsel ein. Die Gründe dafür sind strengere Emissionsvorschriften und prognostizierte steigende Ölpreise, aber auch Ressourcenknappheit sowie die CO₂-Debatte im Rahmen des Klimaschutzes. Besonders die öffentliche Wahrnehmung spielt eine große Rolle, da Umweltschutz und Energieeffizienz einen zunehmend hohen Stellenwert einnehmen (Hanselka und Jöckel 2010, S. 25 f.). Insgesamt ist der effiziente Umgang mit Energie eine elementare Herausforderung für die Zukunft (Hanselka und Jöckel 2010, S. 21). Gerade die CO₂-Debatte ist ein treibender Faktor für die Automobilindustrie, die Entwicklung der Elektromobilität ist von der Regulierung der CO₂-Emissionswerte abhängig. Sollte die Regulierung der Werte stark bis sehr strikt verlaufen, könnte die Ablösung von konventionell angetriebenen Fahrzeugen durch Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Antriebsstrang bereits ab dem Jahr 2030 beginnen. Bei einer moderaten Regulierung würde eine Ablösung nicht vor 2045 geschehen.

Dies alles führte dazu, dass sich – wenn auch erst ab 2005 – eine neue Generation von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang entwickelte. Modelle wie der Tesla Roadster, der Citysax oder der Luis 4U Green wurden auf den Markt gebracht (Jendrischeck und Hüppohl 2010, S. 16 ff.). Seit Mitte des Jahres 2010 produziert die German E-Cars GmbH den auf einem Suzuki Splash basierenden Stromos in Serie (<http://www.german-e-cars.de> (Stand: 01.08.2011)).

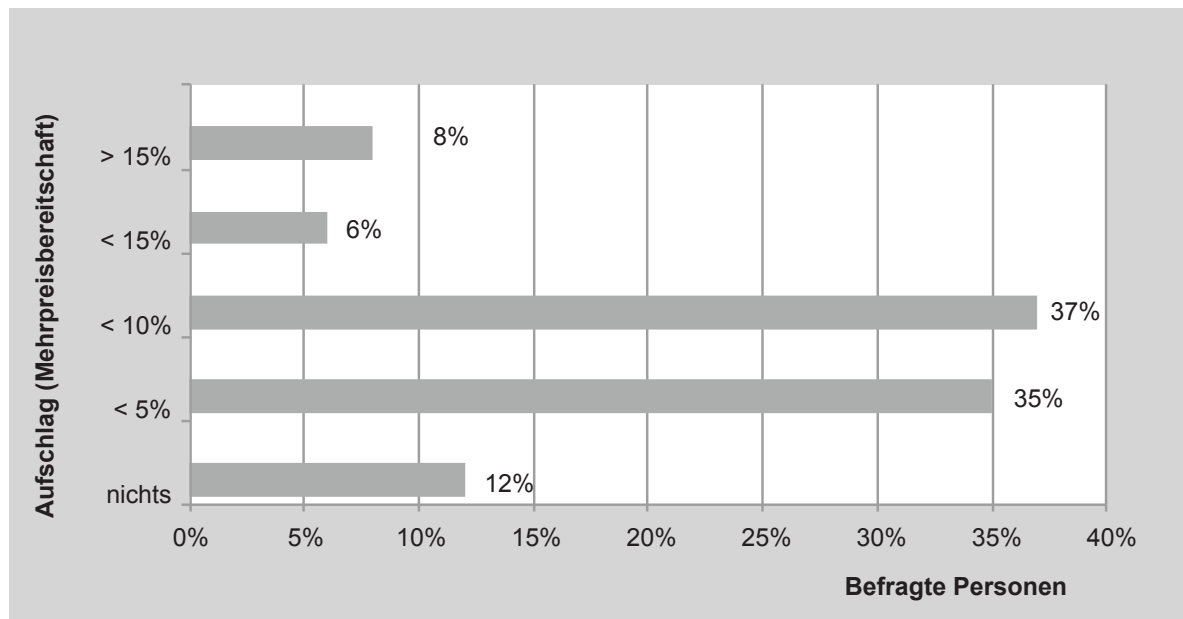


Abb. 2.2 Tolerierter Preisauflschlag zum konventionellen Fahrzeug. (vgl. Sarat Maitin und Derksen 2009, S. 7 f.)

2.1.2 Erwartungen an die Elektromobilität aus Sicht der Hauptakteure

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Erwartungen der Hauptakteure der Elektromobilbranche vorgestellt. Dazu gehören die Anwender, die Politik, die Automobilindustrie sowie die Energiewirtschaft.

Die Bedeutung des Automobils geht weit über die eigentliche Definition der Mobilität hinaus. Laut einer Studie von PricewaterhouseCoopers ziehen 90 % aller Befragten, die ein eigenes Auto besitzen, dieses Auto den öffentlichen Verkehrsmitteln vor. Sechs von zehn Befragten nutzen den Wagen für den Weg zur Arbeit, acht von zehn für private Besorgungen (Cheng et al. 2010, S. 22 f.). Die Anforderungen der Anwender an die Mobilität sind vielfältig. Hier gibt es konkrete Vorstellungen über Preis, Komfort, Reichweite und Sicherheit (Zierer und Zierer 2010, S. 9 f.). Zusätzlich müssen diese Anforderungen mit dem Umweltbewusstsein der Anwender übereinstimmen.

Die Firma Accenture Automobility kam bei einer Umfrage zu dem Ergebnis, dass nur eine geringe Anzahl an Verbrauchern bereit wäre, bei höheren Anschaffungskosten Abstriche bei der Fahrtreichweite zu akzeptieren. Lediglich etwa 14 % der Verbraucher würden einen Aufpreis von mehr als 10 % für ein elektrifiziertes Fahrzeug zahlen (vgl. Abb. 2.2).

Abbildung 2.3 stellt die Erwartungen der Verbraucher an die Reichweite eines Elektrofahrzeugs dar. 64 % der Befragten sehen eine Reichweite von mehr als 300 km pro Batteriebeladung als erforderlich an (Sarat Maitin und Derksen 2009, S. 7 f.).

Das Nutzungsprofil eines durchschnittlichen Pkw widerspricht jedoch deutlich dieser Erwartung. In Deutschland beträgt die räumliche Distanz vom Wohnort zur Arbeitsstelle

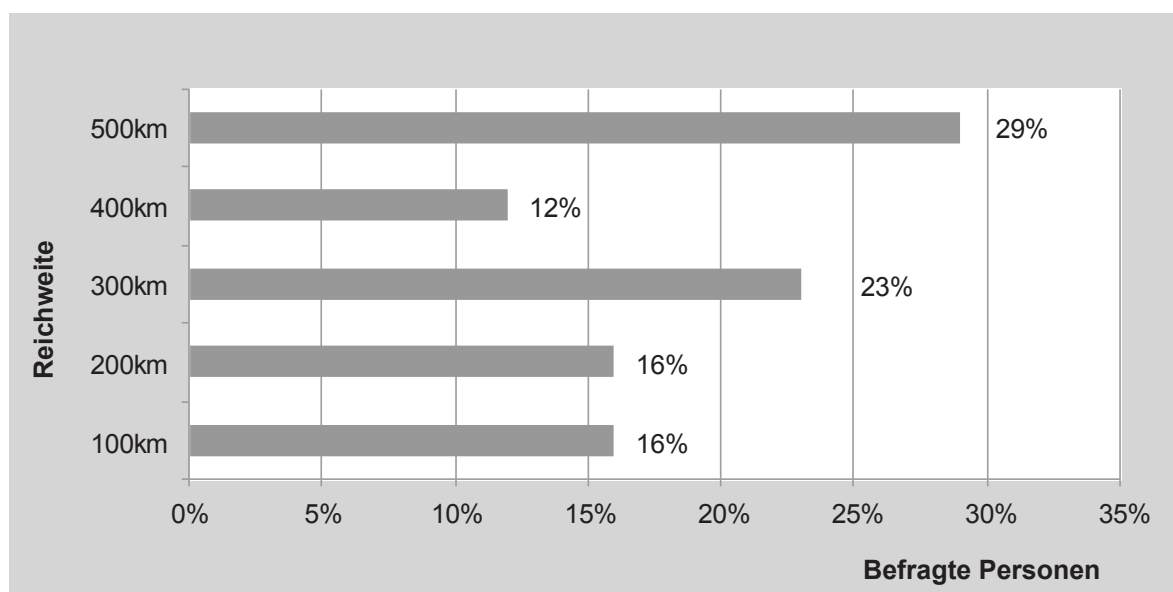


Abb. 2.3 Gewünschte Reichweite eines Elektrofahrzeugs aus Anwendersicht. (vgl. Sarat Maitin und Derksen 2009, S. 7 f.)

bei rund 50 % der Fahrzeughalter weniger als 10 km, bei 80 % der deutschen Erwerbstätigen sind die Fahrtwege vom Wohn- zum Arbeitsort kürzer als 25 km. Ein bedeutender Anteil des Berufsverkehrs in den Städten könnte daher nach heutigem Stand der Technik problemlos durch Elektrofahrzeuge mit einmaligem Ladevorgang abgedeckt werden (Bain Company 2011, S. 24).

Auch bei der Sicherheit und beim Komfort möchten die Verbraucher keine Kompromisse machen (Dalan 2010, S. 1). Dabei orientieren sie sich an den Standards eines konventionell angetriebenen Fahrzeugs (Küsell 2010, S. 3).

Aufgrund des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens, der Verknappung der fossilen Energieressourcen und der steigenden Klimagasemissionen wächst die Bedeutung der alternativen Antriebstechnologien. Die Politik hat sich als Ziel gesetzt, die Einführung der Elektromobilität zu unterstützen (Schwedes 2011, S. 404). Die Bundesregierung stellte am 19. August 2009 den „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ vor. Dieser dreiphasige Plan umfasst den Zeitraum bis zum Jahr 2025. Im Mittelpunkt der Marktvorbereitungsphase stehen Forschung und Entwicklung. In der Markthochlaufphase wird beides bis 2020 bedarfsgerecht unterstützt. Von dem ambitionierten Ziel, bis 2020 einen Bestand von 1 Mio. Elektrofahrzeugen, in Deutschland zu erreichen, hat die Bundesregierung mittlerweile wieder Abstand genommen. Im aktuellen Zwischenbericht der „Nationalen Plattform Elektromobilität“ geht man von etwas mehr als 500.000 Fahrzeugen in 2020 aus. Es ist jedoch noch immer das erklärte Ziel, Deutschland zum Leitmarkt für Elektrofahrzeuge zu entwickeln (Nationale Plattform Elektromobilität 2012, S. 45 f.) (Abb. 2.4).

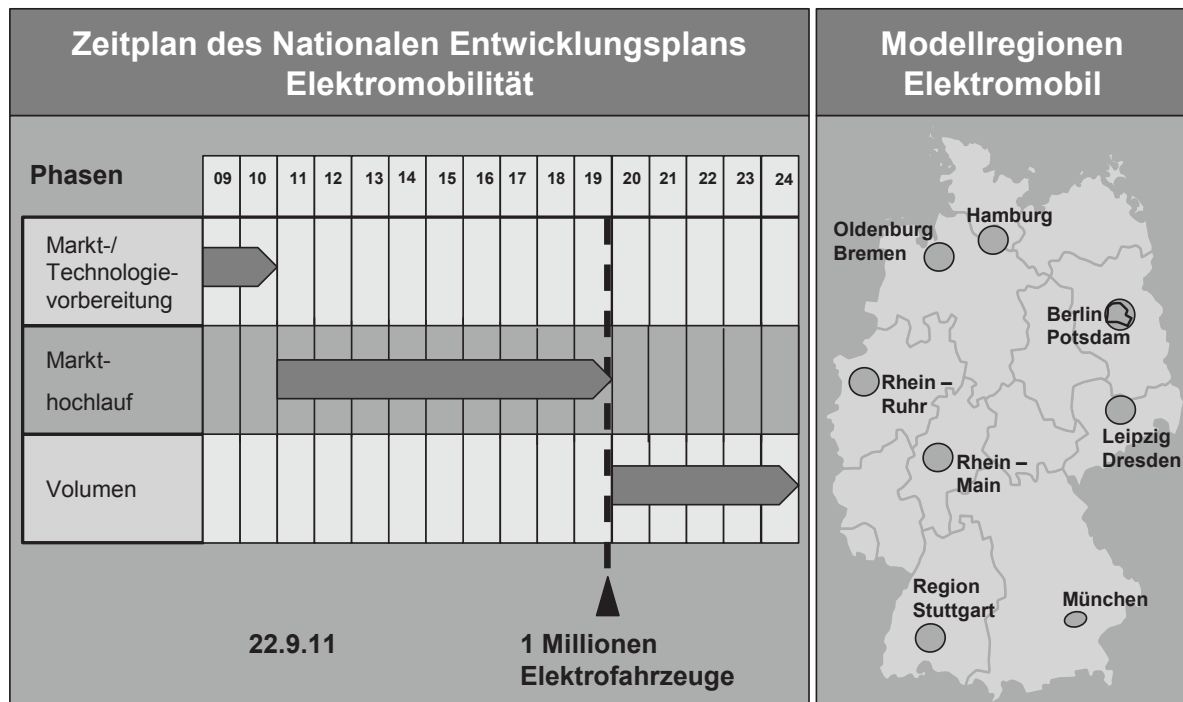


Abb. 2.4 Phasen des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität. (vgl. Cheng et al. 2010, S. 23 ff.)

Zusätzlich zu den im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ verankerten Maßnahmen wurde im Zuge des Konjunkturpaketes II bis 2011 die Summe von 500 Mio. € über Förderprogramme und Kredite der KfW in die anwendungsorientierte Forschung investiert. Außerdem wird jedem Käufer eines Elektroautomobils bis zum Jahr 2015 eine Steuerbefreiung von 10 Jahren gewährleistet (Merkel: Eine Milliarde 2011, S. 1).

Damit steht die Automobilindustrie weltweit an einem Wendepunkt (Rolle 2011, S. 2). Denn die Einführung der Elektromobilität stellt die Automobilindustrie sowie ihre Zulieferer vor große Herausforderungen (Schuler 2011, S. 17).

Das Know-how im Bereich des Verbrennungsmotors wird durch die Expertise in den Bereichen der Batterieproduktion sowie der elektrischen Maschine substituiert. Daher werden viele Unternehmen aus anderen Branchen (z. B. Chemie- oder Elektronikbranche) verstärkt als neue Wettbewerber in den Automobilmarkt eindringen und sich entlang der Wertschöpfungskette der Elektromobilität positionieren. Damit müssten die Automobilhersteller einen Großteil der Wertschöpfung entlang des Antriebsstrangs abgeben. Zusätzlich werden die etablierten Automobilhersteller durch die gesunkenen Markteintrittsbarrieren unter Druck gesetzt. Start-up-Unternehmen wie z. B. Tesla Motors versuchen, sich im Markt der Elektromobilität zu etablieren. Vor diesem Hintergrund erhöht die Automobilindustrie durch Kooperationen und Akquisitionen ihre Wertschöpfung für die Produktdifferenzierung in den einzelnen Bereichen. So kooperiert bspw. Toyota mit Panasonic im Bereich der Batterieentwicklung (Schuler 2011, S. 17 f.).

Eine Studie des Center Automotive Research zeigt, dass die deutsche Automobilindustrie mit heimischem Know-how dem Abhängigkeitsrisiko von ausländischen Wettbewerbern auf dem Feld der Batterietechnologie begegnen kann. Mit der Batterie als Spitzentechnologie kann sie sich langfristig die Wettbewerbsfähigkeit am Standort Deutschland sichern (Dudenhöffer 2010, S. 2). Dafür muss sie zentrale Stufen der Wertschöpfungskette im eigenen Land entwickeln und realisieren. Diese Stufen beinhalten u. a. die Rohstoffgewinnung, die Energieerzeugung, den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur sowie die Entwicklung und Produktion der Batterie und der Antriebstechnologien (Rolle 2011, S. 2).

Ziel ist es, durch das Vorantreiben der alternativen Antriebstechnologien und -konzepte einen schnelleren Markteintritt zu erreichen. Durch die Förderung der bundesweiten Kommunikation zwischen den relevanten deutschen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft kann eine strategische Marketingplattform aufgebaut und bereitgestellt werden. Gleichzeitig versucht die Automobilindustrie, durch die Bündelung der relevanten Kompetenzen und die Unterstützung des Aufbaus von Systemkompetenzen für die deutsche Wirtschaft einen Leitmarkt für die Elektromobilproduktion in Deutschland zu etablieren (Hüttl et al. 2010, S. 36).

Der durch die Elektromobilität bedingte steigende Strombedarf sowie der Ausbau der Infrastrukturen würden den Energieunternehmen bis zum Jahr 2020 ein Umsatzpotenzial von 17 Mrd. € einbringen (Hauck 2009, S. 3). Um dieses Potenzial auszuschöpfen, sind vor allem Partnerschaften nötig, mit denen die Energiekonzerne in der Lage sind, zukünftig den Markt zu gestalten.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht wäre selbst der Strombedarf, der durch die bis 2020 von der Bundesregierung ursprünglich geplante Anzahl von 1 Mio. Elektrofahrzeuge entstehen würde, kein Problem. Die Stromversorgung aus erneuerbaren Energien zu gewährleisten, stellt die Energiekonzerne jedoch vor eine immense Herausforderung. Denn nur durch den Umstieg auf erneuerbare Energien kann die Emissionsbilanz weiter verbessert werden (Thomas 2009, S. 1).

Eine weitere wichtige Rolle spielt der Aufbau einer Ladeinfrastruktur. Deren Auf- und Ausbau nehmen einen erheblichen Einfluss auf die Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Derzeit werden diverse Ladeinfrastrukturkonzepte diskutiert. Die lange Ladezeit stellt dabei nach wie vor das Kernproblem dar. Um nicht nur einzelne Nutzergruppen anzusprechen, sondern ein breites Spektrum an Anwendern zu schaffen, müssen öffentliche Lade- und Tauschstationen entstehen. Dieser Ausbau ist mit langfristig hohen Investitionen verbunden (vgl. hierzu Kap. 2.1.4).

2.1.3 Marktentwicklungen für Elektrofahrzeuge

Die Elektromobilität wird den konventionellen Antriebsstrang langfristig ablösen, bedingt durch begrenzte Ressourcen. Eine Analyse diverser Studien durch das Werkzeugmaschi-

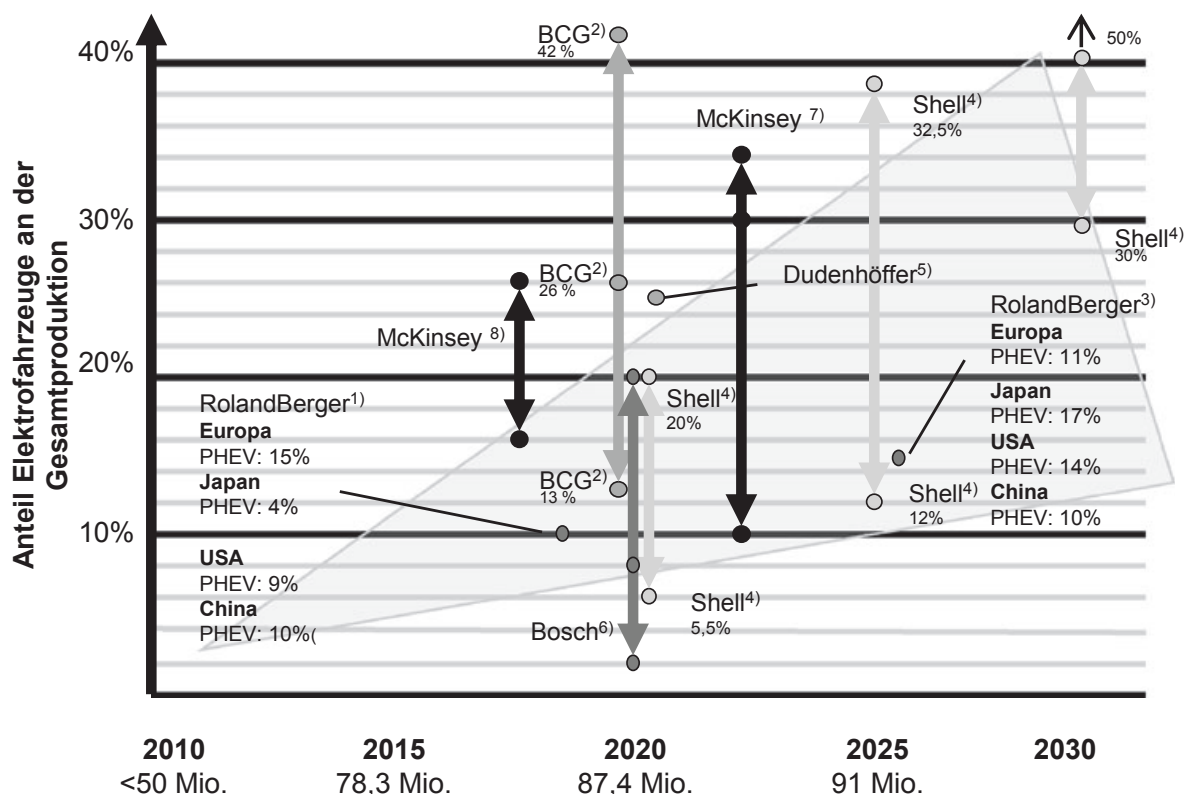


Abb. 2.5 Marktentwicklung der Elektromobilproduktion. (Quellen: 1) Bernhart und Landmann 2010, High Scenario (Öl, Förderung, Batteriekostenreduzierung); 2) BCG 2009, Comeback Electric Car, Slowdown – Steady Pace – Acceleration (Ölpreis); 3) Schlick et al. 2011; 4) Shell 2009, PKW-Szenarien bis 2030, Trend-Alternative Szenario (techn. Entwicklung, Staatliche Förderung); 5) Dudenhöffer 2010, 6) Bosch 2009, Automobilzulieferer in herausfordernden Zeiten; 7) O. V. 2011, S. 8) Malorny 2009)

nenlabor WZL der RWTH Aachen ergab, dass derzeit kein einheitliches Verständnis über den Ablösezeitpunkt existiert (vgl. Abb. 2.5).

Zwar prognostizieren sämtliche dieser Studien dem Elektrofahrzeug eine erfolgreiche Zukunft, sie nennen aber unterschiedliche Zeitpunkte, wann das Elektrofahrzeug einen bedeutsamen Marktanteil erreichen wird.

Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge (HEV, REEV, BEV) wird für das Jahr 2020 ein Marktanteil zwischen 2 und 42 % prognostiziert. Die aufgezeigte Spanne ist darauf zurückzuführen, dass in den Studien unterschiedliche Annahmen getroffen werden, wie sich die Einflussfaktoren auf die Elektromobilproduktion in Zukunft verhalten. Das WZL hat in Zusammenarbeit mit der Unternehmensberatung McKinsey ein Komponenten-Modell entwickelt, das die Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und der Marktentwicklung der Elektromobilität berücksichtigt. Auf dieser Grundlage kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um eine detailliertere Auswertung zu erhalten. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den folgenden Abbildungen veranschaulicht (Abb. 2.6).

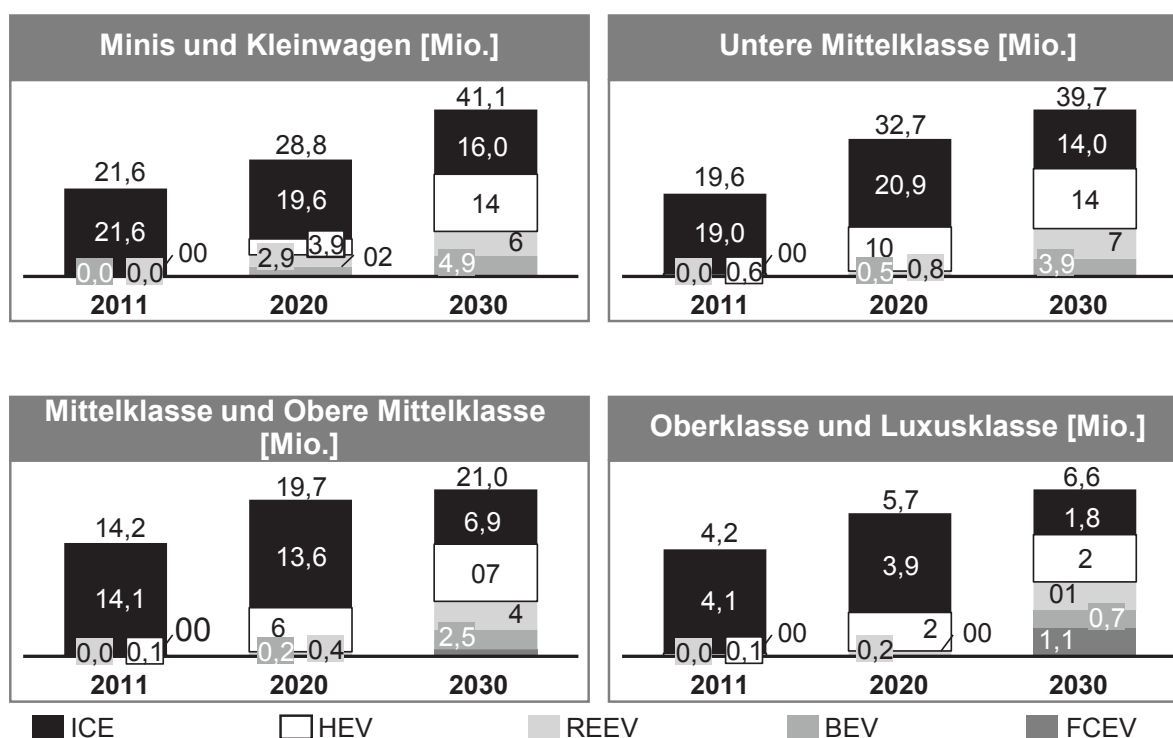


Abb. 2.6 Marktentwicklung verschiedener Fahrzeugsegmente. (Quelle: O. V. 2011, Analyse mittels Komponentenmodell)

Demnach fällt die Marktentwicklung innerhalb der einzelnen Fahrzeugklassen (ICE, HEV, REEV, BEV) sehr unterschiedlich aus. Während die ausschließlich elektrisch angetriebenen Fahrzeuge zunächst nur als Kleinwagen attraktiv sind, wird es in der Mittel- und Oberklasse ein starkes Wachstum beim Hybridantrieb geben. Zudem zeigt sich, dass sich in allen internationalen Regionen ein Mix verschiedener Antriebstechnologien entwickelt, wobei in Japan der stärkste Rückgang im Bereich des konventionellen Antriebsstrangs zu erwarten ist (Abb. 2.7).

2.1.4 Infrastrukturkonzepte

Die Elektromobilproduktion hat einen grundlegenden Wandel der elektrischen Energiesysteme zur Folge. Mit zunehmender Marktdurchdringung entstehen deutliche Zusatzbelastungen in Form von Lastspitzen im Verteilernetz. Sie resultieren aus den gleichzeitigen bzw. überlappenden Ladevorgängen der Speichersysteme (Leitinger und Litzlbauer 2011, S. 10). Eine umfassende Markteinführung von elektrisch angetriebenen und nicht schienegebundenen Fahrzeugen, die am Stromnetz geladen werden, setzt daher vor allem den Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur voraus. Damit elektrifizierte Fahrzeuge mit konventionellen konkurrieren können, ist es erforderlich, Reichweitendefizite über eine hohe Anzahl von kleinen, dezentralen Ladevorgängen zu kompensieren.

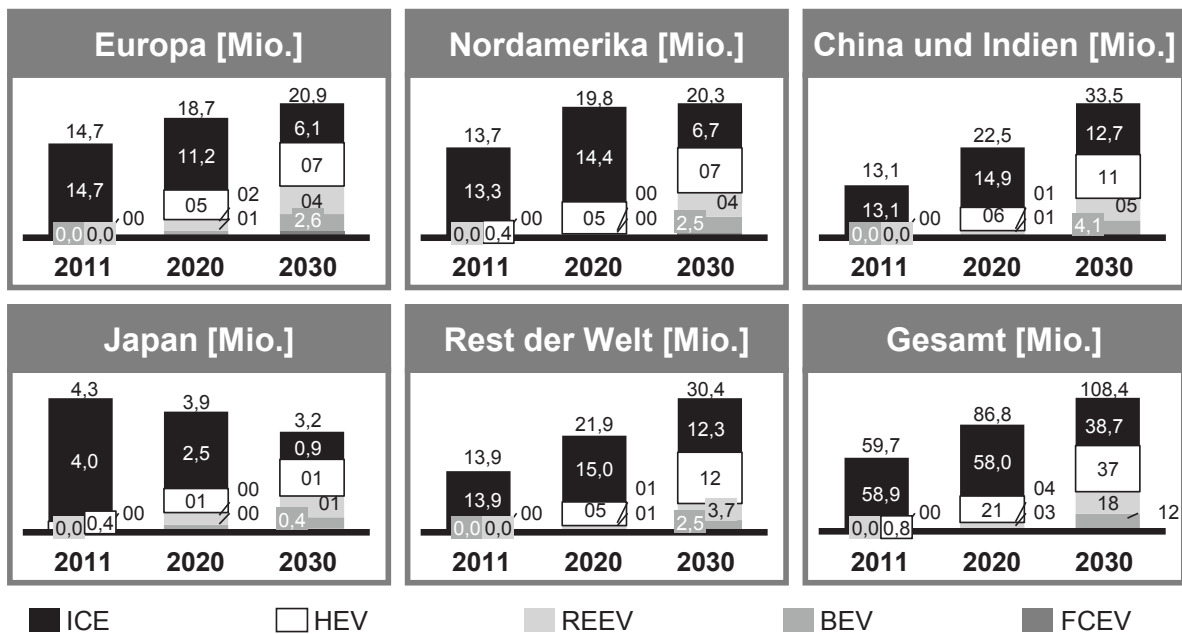


Abb. 2.7 Marktentwicklung verschiedener Regionen. (Quelle: O. V. 2011, Analyse mittels Komponentenmodell)

Bei dezentralen Ladekonzepten wird zwischen der Ladung im halb-öffentlichen Bereich (z. B. beim Arbeitgeber), dem Laden im öffentlichen Bereich (z. B. an einer Ladesäule am Straßenrand) und dem Laden am privaten Stellplatz (z. B. Eigenheim) unterschieden (Schraven 2010, S. 14). Der Aufbau einer öffentlichen Infrastruktur stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar. Beides, Energie-Infrastruktur und Elektromobilität, muss entsprechend parallel vorangetrieben werden.

Während das flächendeckende Laden über standardisierte Haushaltssteckdosen zu realisieren ist, benötigt die öffentliche Infrastruktur neue Standards (Engel 2010, S. 29).

Abbildung 2.8 veranschaulicht unterschiedliche Konzepte einer umfassenden Infrastruktur. Neben den konventionellen kabelgebundenen Ladekonzepten existieren noch weitere Konzepte, die zurzeit jedoch keine praktische Anwendung finden. Zum einen können Fahrzeuge kabellos per Induktion geladen werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit des Batteriewechsels. Swapping-Stationen bieten den Austausch der entladenen Batterie gegen eine aufgeladene Batterie.

Weitere Anforderungen ergeben sich im Bereich der Produktionstechnik. Sie muss sich flexibel auf Restriktionen durch unterschiedliche Infrastrukturkonzepte einstellen. Diese betreffen vor allem das Batteriesystem sowie die Schnittstellen zu den zentralen bzw. dezentralen Lademöglichkeiten. Hier werden Standards gebraucht, um den Batterieladevorgang herstellerübergreifend durchführen zu können. Gleichzeitig benötigen die Hersteller ausreichend flexible Schnittstellen, um eine gegenseitige Produktdifferenzierung vornehmen zu können.