

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Analyse und Vergleich ausgesuchter Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt MATYAS

und

Dipl.-Ing.oec. Henrik GOMMEL

Institut für Managementwissenschaften
Bereich Betriebstechnik und Systemplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Alexander Moser

0525831 (E 740)

Donhartgasse 94, 1140 Wien

Wien, am _____

Vorname, Nachname _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Diplomarbeit und während meines Studiums unterstützt und gefördert haben.

In erster Linie möchte ich mich speziell bei meinen Eltern Waltraut und Helmuth bedanken, die mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben und mir stets mit Rat zur Seite stehen. Ein weiterer Dank gilt meiner gesamten Familie, die mich auf meinen Lebensweg begleitet hat.

Weiters möchte ich mich bei meinen Studienkollegen, insbesondere Bernhard und Josef bedanken, die mich im ganzen Studium begleitet haben und mit gemeinsamen Erlebnissen die Studienzeit unvergesslich machten.

Herrn Prof. Kurt Matyas, Herrn Prof. Peter Kuhlang und Herrn Henrik Gommel danke ich aufrichtig für das Zustandekommen des Themas, sowie für die Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung.

Mein spezieller Dank gilt Frau Ines Kaehsmayer und MAGNA International, die durch wertvolle Informationen die Qualität der Arbeit verbessert haben und mich zu der Abfassung der Arbeit motiviert und unterstützt haben.

Der größte Dank gebührt aber meiner Lebensgefährtin Jasmin, die mir in allen Lebenslagen treu beiseite steht und mich bei jeder Entscheidung unterstützt hat. Sie gibt mir auch in schwierigen Zeiten Halt und ist immer für mich da. Ich danke ihr für alles, dass sie für mich getan hat.

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen und zunehmender Umweltprobleme, zu denen der Einsatz fossiler Treibstoffe maßgeblich beiträgt, sind alternative Antriebskonzepte ein wichtiger Schritt in Richtung eines nachhaltigen Verkehrssystems. In den letzten Jahren ist hierbei Elektromobilität zunehmend in das Zentrum des öffentlichen Interesses gerückt. Zu den Aufgaben einer begleitenden Ladeinfrastruktur zählt, Problembereiche wie die geringe Reichweiten und hohen Kosten der Fahrzeuge oder die Volatilität in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien durch innovative Lösungen und Geschäftsmodelle zu kompensieren und somit Marktanreize für beteiligte Interessensgruppen zu schaffen.

In der vorliegenden Arbeit werden ausgesuchte Ladekonzepte hinsichtlich technischer, ökonomischer und organisatorischer Anforderungen anhand einer umfangreichen Literaturanalyse untersucht und bewertet. In einem ganzheitlichen Ansatz sollen dabei Stärken und Schwächen identifiziert werden, die als Entscheidungshilfe in zukünftigen Auswahlprozessen dienen können. Die Sichtweisen der verschiedenen Stakeholder finden durch einen entsprechend breiten Kriterienkatalog Eingang in die Analyse. Da man Brennstoffzellenfahrzeuge der Elektromobilität zurechnet, werden zudem Vor- und Nachteile einer Wasserstoffwirtschaft behandelt.

Für die frühe Marktphase sind aus heutiger Sicht kabelgebundene Ladesysteme bestens geeignet, da für Erstnutzer eine Basisinfrastruktur in Form von Steckdosen zuhause und am Arbeitsplatz bereits zu Verfügung steht. Bei einer breiteren Marktdurchdringung wird diese um eine öffentliche Ladeinfrastruktur ergänzt werden müssen, wofür auch andere Ladetechniken in Frage kommen. Batteriewechselsysteme sind hierbei vor allem für Kunden interessant, die selbst über keine Lademöglichkeit verfügen oder einen schnellen Ladevorgang wünschen. Typische Zielgruppen wären sog. „Laternenparker“ im Stadtgebiet, sowie gewerbliche Flotten. Induktive Ladesysteme weisen einen hohen Bedienungskomfort auf und lassen sich vandalismussicher im Straßenbelag integrieren. Allerdings sind die Systemkosten höher und der Übertragungswirkungsgrad geringer als bei leitenden Lösungen. Ihre Anwendung wird in Nischen erfolgen, wo man bereit ist, den ergonomischen Mehrwert zu bezahlen bzw. sich von den Mitbewerbern am Markt differenzieren möchte. Sollen längere Distanzen mit einem Elektrofahrzeug zurückgelegt werden, sind Plug-In Hybride aus heutiger Sicht dafür am besten geeignet, da sie das bestehende Tankstellennetz verwenden können. Demgegenüber stehen Alternativen wie die Brennstoffzelle, Schnellladung, Batteriewechsel oder induktive Stromhighways. Diese werden jedoch aus unterschiedlichen Gründen kurz- bis mittelfristig keine Rolle spielen.

Abstract

With more stringent regulations on emissions and fuel economy, global warming and constraints on energy resources, alternative powertrains play a crucial role in developing a sustainable mobility in the future. Electric, hybrid and fuel cell Vehicles have, thus, attracted more and more the attention of automakers, governments and customers in the recent years. To overcome their limited range and high cost, as well as to integrate volatile renewable energy sources into the grid, new business models have to be developed and suitable charging infrastructure installed, in order to attract new customers and other stakeholders to enter the market.

In this diploma thesis, selected charging concepts are being analyzed in terms of technical, economic and organizational criteria, based on a comprehensive literature study in the field of E-Mobility. In a holistic approach, strengths and weaknesses shall be unveiled and may serve as a possible foundation for decision makers and future policies. To embrace different dimensions – in consequence of various stakeholders – an extensive list of criteria has been evaluated. Given the fact, that fuel cell vehicles are assigned to electric vehicles, pro's and cons of hydrogen compared to electricity are covered, too.

In the stage of market entry, conductive charging systems are most convenient for early adopters, as the basic infrastructure in the form of sockets is already widely in place (at home, at work). If electric vehicles however reach a higher market share, public charging infrastructure will have to be built, for which other techniques are also being discussed. Battery switch stations are particularly interesting for customers without charging spots at home or rather prefer short charging times. Typical target groups would be so-called “curb-side users”, as well as commercial fleets (e.g. taxi). Inductive chargers offer superior operating comfort and are safe against vandalism, cost more, however, and feature less efficiency than their conductive counterparts. Application will therefore be limited to niches where ease of use is highly appreciated or automakers strive to differentiate from their competitors in the market (premium segment), respectively. If greater distances shall be achieved, plug-in hybrid vehicles are currently the best option, as they have unlimited access to existing gas stations. Alternatively, fuel cells, quick charging, battery switch and dynamic inductive charging are discussed to extend the range of electric vehicles. However, due to both technical and economic reasons, none of them will play a key role in the near future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	1
1.3	Festlegung des Untersuchungsrahmens	2
1.4	Aufbau der Arbeit	2
2	Mobilität & Umwelt	4
2.1	Energie- und Rohstoffverbrauch	4
2.2	Schadstoffemissionen des Verkehrs	6
2.3	Flächenverbrauch & Verkehrsunfälle	8
2.4	Verkehrsaufkommen / Kfz-Bestand	9
2.5	Fahr- und Nutzerprofile	10
2.5.1	Berufspendler	12
2.5.2	Dienstliche und geschäftliche Fahrten	12
2.5.3	Private Erledigungen und Einkäufe	12
2.5.4	Freizeitfahrten	12
3	Grundlagen der Elektromobilität	14
3.1	Fahrzeug	14
3.1.1	Geschichte des Elektroautos	14
3.1.2	Fahrzeugskonzepte	15
3.1.3	Betrachtete Fahrzeuge	21
3.2	Energiespeicher	22
3.2.1	Technische Anforderungen	22
3.2.2	Ökonomische Kriterien	24
3.2.3	Ökologische Kriterien	24
3.2.4	Batterietechnologien	25
3.2.5	Vergleich der Batterietechnologien	27
3.3	Energiewirtschaft	29
3.3.1	Strombedarf	29
3.3.2	Erneuerbare Energien und Elektromobilität	32
3.3.3	Vehicle-to-Grid Konzept	35
3.4	Markt	37
3.4.1	Neue Mobilitätskonzepte	37
3.4.2	Neue Geschäftsmodelle	38
3.4.3	Neue Kooperationen	41

4	Bewertungsmethodik.....	43
4.1	Technologische Anforderungen.....	43
4.2	Ökonomische & organisatorische Anforderungen.....	44
4.3	Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte.....	45
4.4	Stakeholder.....	45
4.5	Nutzwertanalyse & Szenariobewertung.....	46
5	Konzeptanalyse und -bewertung.....	49
5.1	Konduktive Ladesysteme.....	49
5.1.1	Konzept.....	49
5.1.2	Technologische Anforderungen.....	52
5.1.3	Ökonomische & organisatorische Anforderungen.....	57
5.1.4	Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte.....	61
5.1.5	Stakeholder.....	62
5.1.6	Nutzwertanalyse und Szenariobewertung.....	63
5.2	Batteriewechselsysteme.....	65
5.2.1	Konzept.....	65
5.2.2	Technologische Anforderungen.....	67
5.2.3	Ökonomische und organisatorische Anforderungen.....	69
5.2.4	Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte.....	73
5.2.5	Stakeholder.....	74
5.2.6	Nutzwertanalyse und Szenariobewertung.....	75
5.3	Induktives Laden.....	77
5.3.1	Konzept.....	77
5.3.2	Technologische Anforderungen.....	80
5.3.3	Ökonomische und organisatorische Anforderungen.....	84
5.3.4	Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte.....	87
5.3.5	Stakeholder.....	88
5.3.6	Nutzwertanalyse und Szenariobewertung.....	89
5.4	Wasserstoff.....	91
5.4.1	Konzept.....	91
5.4.2	Technologische Anforderungen.....	94
5.4.3	Ökonomische und organisatorische Anforderungen.....	98
5.4.4	Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte.....	103
5.4.5	Stakeholder.....	103
5.4.6	Nutzwertanalyse und Szenariobewertung.....	104
6	Konzeptvergleich.....	107
6.1	Stand der Technik.....	107
6.2	Wirtschaftlichkeit.....	109
6.3	Ergebnis und Ausblick.....	111

7	Verzeichnisse	113
7.1	Literaturverzeichnis	113
7.2	Abbildungsverzeichnis	125
7.3	Tabellenverzeichnis	128
7.4	Abkürzungsverzeichnis	130
8	Anhang.....	I
8.1	Lagerbestand bei Batteriewechselstationen.....	I
8.2	Nutzwertanalyse – Gesamtwertung	II
8.3	Szenariobeschreibung	III

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Umweltbewusstsein, welches sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend entwickelt hat, führt dazu, dass beim motorisierten Individualverkehr Maßnahmen getroffen werden müssen, um Belastungen in Form von CO₂-Emissionen, Feinstaub und Lärm erheblich zu reduzieren. Durch Optimierung der Verbrennungskraftmaschine sind zwar Verbesserungen möglich, allerdings müssen Fahrzeughersteller alternative Antriebskonzepte entwickeln, um künftigen nationalen, sowie internationalen Umweltstandards gerecht zu werden.¹

Als eine der möglichen Alternativen wird dabei Elektromobilität angesehen, die in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen hat. Auf Basis von Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, bieten Elektrofahrzeuge großes Potenzial, die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen, sowie die Abhängigkeit von Erdölimporten stark zu verringern. Für diese Antriebsform sprechen ferner die lokale Emissionsfreiheit², eine höhere Energieeffizienz, der geräuscharme Betrieb, sowie die Möglichkeit, Elektrofahrzeuge zur Stabilisierung des Stromnetzes nutzen zu können.³

Die hohen Anschaffungskosten und die beschränkte Reichweite der verfügbaren Akkumulatoren verhindern bisher den massentauglichen Einsatz von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Um die Kundenakzeptanz zu steigern, sollten folgende Punkte entsprechend forciert werden: Verbesserungen in der Batterietechnologie (von den Kunden wird eine Mindestreichweite von ca. 400km erwartet⁴) und Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur, die die häufig erforderlichen Ladevorgänge berücksichtigt, sowie eine möglichst ergonomische Bedienung erlaubt.⁵

Während Hybridfahrzeuge auf das bestehende Tankstellennetz zurückgreifen, müssen für Elektrofahrzeuge geeignete Lademöglichkeiten noch errichtet werden. Dafür sind verschiedene Ladetechniken in Diskussion. Ebenso bietet sich langfristig Wasserstoff als alternativer Energieträger für Automobile an.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die jeweiligen Stärken und Schwächen der Ladekonzepte herauszuarbeiten, sowohl hinsichtlich technologischer Kriterien, als auch unter dem Aspekt

¹ vgl. Nansai u.a. (2001), S. 251f.

² Bei rein elektrischem Fahrbetrieb.

³ vgl. VCÖ (2009), S. 9f.

⁴ vgl. Gerl (2002), S. 67.

⁵ vgl. Naunin (2007).

der Wirtschaftlichkeit. Die Untersuchung verfolgt dabei einen ganzheitlichen Ansatz, der die verschiedenen Teilaspekte in diesem Themenbereich zusammenführt. Obwohl zahlreiche Publikationen sich in den letzten Jahren mit Elektromobilität und einer zugehörigen Ladeinfrastruktur beschäftigt haben, fehlt bisher eine breite techno-ökonomische Betrachtung, die mehrere Konzepte einschließt und diese nach objektiven Kriterien einander gegenüberstellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll dem interessierten Leser daher ein möglichst vollständiges Bild der diskutierten Ladekonzepte vermittelt werden, das über die Sichtweise einzelner Interessensgruppen hinausgeht, und das als Entscheidungshilfe in zukünftigen Auswahlprozessen dienen kann.

1.3 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind Konzepte zur adäquaten Versorgung von Elektrofahrzeugen mit Strom. Die folgenden Analysen beschränken sich daher auf mehrspurige Kraftfahrzeuge, die eine funktionierende Ladeinfrastruktur benötigen bzw. regelmäßig verwenden. Diese sind neben rein batteriebetriebenen Elektroautos⁶, sogenannte Plug-In Hybridfahrzeuge, die je nach Bauart die Verbrennungskraftmaschine (VKM) auch als Stromgenerator verwenden⁷, sowie Brennstoffzellenfahrzeuge⁸.

Bei den Ladetechniken erfolgt eine Eingrenzung auf die aus heutiger Sicht relevanten Technologien, nämlich konduktive (kabelgebundene) Ladung, induktive (drahtlose) Stromübertragung und Batteriewechselsysteme. Schleifkontakte (Oberleitungen) werden nicht weiter betrachtet, da sie sich für die automobilen Anwendung nur bedingt eignen.⁹ Ferner werden Wasserstoff und Elektrizität als Energieträger in der automobilen Anwendung miteinander verglichen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Ausgangspunkt der Arbeit ist eine umfassende Literaturrecherche auf dem Gebiet der verschiedenen Ladetechniken. Hinzu kommen Forschungsberichte und aktuelle Studien, die sich auf breiter Basis mit Elektromobilität beschäftigen. Da dieses Thema aktuell auf große mediale Aufmerksamkeit stößt, sowie einer entsprechenden Dynamik in der Entwicklung unterliegt, finden ebenso Beiträge aus Fachzeitschriften und Journalen, sofern zulässig, Eingang in die Analyse. Daraus wurden, in Abstimmung mit dem wissenschaftlichen Betreuer, wesentliche Anforderungen abgeleitet, um die verschiedenen Dimensionen der Ladeinfrastruktur bestmöglich zu erfassen und zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit soll

⁶ Battery Electric Vehicle (BEV)

⁷ Plug-In Hybrid Vehicle (PHEV); Range Extended Electric Vehicle (REEV)

⁸ Fuel Cell Electric Vehicle

⁹ Engel (2009a), S. 75ff.

dem interessierte(n) Leser(In) einen Überblick zu diesem umfangreichen Themengebiet geben und verschiedene Handlungsalternativen, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren, qualitativ bewerten, sowie einander gegenüberstellen.

Als Einstieg werden in Kapitel 2 der status quo des heutigen Individualverkehrs erläutert, und ökologische Herausforderungen, die aus dem steigenden Verkehrsaufkommen resultieren, näher beschrieben. Dies sind die Beweggründe für den Umstieg auf alternative Antriebskonzepte, die in Zukunft ressourcen- und umweltschonendere Mobilität gewährleisten sollen. Das aktuelle Nutzerverhalten wird analysiert, um die individuellen Mobilitätsbedürfnisse besser darzulegen.

In Kapitel 3 erfolgt eine Einführung in die grundlegenden Aspekte der Elektromobilität. Neben den unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten, sind vor allem die Eigenschaften der Energiespeicher wesentlich, da sie Einfluss auf die konkrete Fahrzeuggestaltung, ebenso wie die Ladeinfrastruktur haben. Aus Sicht der Energiewirtschaft bieten Elektrofahrzeuge zudem das Potenzial, erneuerbare Energien besser in das Stromnetz zu integrieren. Energieversorgungsunternehmen zeigen daher besonderes Interesse an Elektromobilität¹⁰. Weiters werden kurz die möglichen Auswirkungen bzw. Veränderungen auf dem Markt beschrieben.

Die Bewertungsmethodik wird in Kapitel 4 genauer erläutert. Die Methode der Nutzwertanalyse in der gewählten Form wird hierbei kurz beschrieben und es findet sich eine Erläuterung der gewählten Szenarien, die Eingang in die Bewertung finden.

Konzeptanalyse und –bewertung sind in Kapitel 5 zu finden. Zunächst wird die jeweilige Ladetechnik näher beschrieben, im Rahmen der ökonomischen Analyse damit verbundene Kosten und mögliche Geschäftsmodelle betrachtet. Ferner soll aufgezeigt werden, ob die bestehende Infrastruktur für die Errichtung genutzt werden kann, und welche Fahrprofile besonders für die jeweilige Technik geeignet sind. Durch eine Nutzwertanalyse sollen die Ladekonzepte auf den Erfüllungsgrad definierter Anforderungen hin untersucht, und damit qualitativ bewertet werden. Zudem wurden zwei Szenarien (worst / best case) herangezogen, die eine unsichere Marktentwicklung bei Elektrofahrzeuge, in der Bewertung berücksichtigen. Abschließend werden relevante Pilotprojekte kurz vorgestellt, sowie ein Ausblick auf die mögliche Form der Wertschöpfungsverteilung gegeben.

Kapitel 6 vergleicht die Ergebnisse der jeweiligen Konzeptbewertung und fasst deren Relevanz zusammen. Neben einer kritischen Auseinandersetzung mit den Ergebnissen, wird eine realistische Einordnung von Elektrofahrzeugen am Gesamtmarkt gegeben, sowie mögliche Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität skizziert.

¹⁰ vgl. Kuhnert u.a. (2010), S. 47f.

2 Mobilität & Umwelt

Mobilität, d.h. Bewegungsfreiheit, ist ein Grundbedürfnis des Menschen, welches unsere evolutionäre Entwicklung stets begleitet hat. Schon frühzeitig versuchte der Mensch seine Reisegeschwindigkeit – und damit verbunden auch seine Reichweite – zu erhöhen. Mit der Erfindung des Rades wurden Fortbewegungsmittel entwickelt, die Personen und Güter über längere Strecken transportieren konnten. Über Jahrtausende waren Tiere dafür die einzige Antriebsquelle¹¹. Mit der Erfindung der Dampfmaschine stand jedoch nicht nur eine neue Antriebsform zu Verfügung, auch das Mobilitätsverhalten änderte sich. Die Eisenbahn, als erstes wirkliches Massenverkehrsmittel, wurde erfunden und war zudem auch noch schneller und bequemer als Pferd oder Kutsche. Mit der Erfindung des Automobils 50 Jahre später kam auch die Rückkehr zum Individualverkehr, schließlich besaß es alle gewünschten Eigenschaften: Freiheit und Unabhängigkeit in der Wahl des Reiseziels, der Reiseroute und Reisezeit, zudem noch die Geschwindigkeit eines Zuges.¹²

Die Gesellschaft der Industriestaaten ist auf das engste mit dem Automobil verbunden, welches eine zentrale Rolle im täglichen Leben einnimmt. Das starke Wachstum des Autoverkehrs in den letzten Jahrzehnten zeigt mittlerweile aber auch dessen Grenzen deutlich auf: Energieverbrauch, Klimawandel, Unfallfolgen, Zersiedelung – bei vielen aktuellen Herausforderungen spielt der Verkehr eine wichtige Rolle und erfordert die Suche nach Alternativen.

Das folgende Kapitel befasst sich mit den verschiedenen Beeinträchtigungen der Natur durch das Automobil, welche die Entwicklung neuer, nachhaltiger Mobilitätskonzepte notwendig macht. Elektromobilität stellt hierbei eine mögliche Alternative dar, die – wie gezeigt werden soll – über zahlreiche Vorteile für das Gesamtsystem Verkehr verfügt. Ergänzend soll das Mobilitätsverhalten in entwickelten Volkswirtschaften kurz dargestellt werden.

2.1 Energie- und Rohstoffverbrauch

Im Jahr 2009 betrug der weltweite Erdölverbrauch 3.882 Mio. Tonnen, wovon 740,2 Mio. Tonnen auf die EU-27 entfielen. Anteilsmäßig stellt Erdöl damit den wichtigsten Energielieferanten dar, noch vor Kohle, Erdgas und Kernenergie¹³. Der mit Abstand wichtigste Verbraucher von Erdölprodukten ist der Verkehr. Rund 94% der benötigten

¹¹ Anm: Die Betrachtungen beschränken sich auf den Landverkehr, Wasser- und Lufttransportmittel bleiben ausgeschlossen.

¹² vgl. Gruden (1994), S. 2.

¹³ vgl. Internetquelle 1.

Energie wird in diesem Bereich durch Erdöl gedeckt¹⁴ und es ist davon auszugehen, dass der Bedarf weiter zunehmen wird. Der Energieverbrauch des Verkehrs ist in den Staaten der EU-27 zwischen 1995 und 2005 um etwa 21% gestiegen und damit mehr als doppelt so stark wie der Gesamtenergieverbrauch Europas im gleichen Zeitraum¹⁵. Dies verdeutlicht die starke Abhängigkeit des Verkehrssektors von fossilen Rohstoffen. In Österreich werden mehr als drei Viertel des Erdöls für den Verkehr verwendet (siehe Abb. 2-1).

Erdölverbrauch in Österreich 2009 nach Verwendung

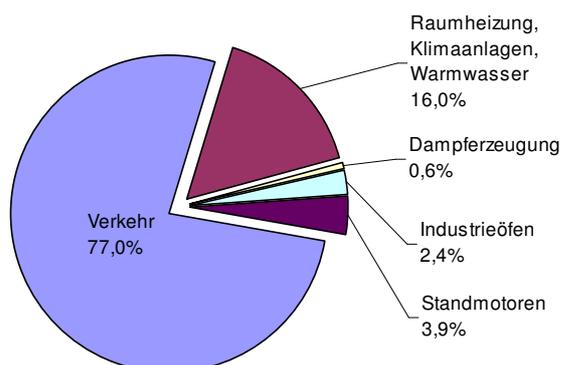


Abbildung 2-1: Erdölbilanz Österreich 2009 [siehe Internetquelle 3]

Insgesamt betrug der Verbrauch in Österreich somit ca. 422 PJ, damit verbunden ist auch eine hohe Importabhängigkeit. 2005 wurden bereits 93% des Bedarfs durch ausländisches Erdöl gedeckt.¹⁶ Die starke Nutzung fossiler Energieträger für den Verkehr hat aber entscheidende Nachteile: die erforderlichen Ressourcen sind begrenzt und die Verbrennungsprodukte begünstigen den Klimawandel.

Thermische Kraftmaschinen weisen prinzipbedingt eine geringe Effizienz auf, da sie einen Wirkungsgrad von nur etwa 30% im stationären Betrieb erreichen. Mehr als zwei Drittel des Energieinhalts werden als Wärmeverluste an die Umgebung abgegeben. Da Erdöl auch für andere Branchen, wie die Pharma- oder Textilindustrie, einen sehr wertvollen Rohstoff darstellt, liegt es daher nahe, sorgsamer damit umzugehen und insbesondere beim Verkehrssektor nach Veränderungen zu suchen.¹⁷

Elektromobilität bietet hier einen interessanten Ansatz, denn sie erlaubt eine breitere Diversifizierung der eingesetzten Primärenergieträger. Damit ist neben der Reduzierung der Abhängigkeit von Erdöl auch der Zugang zum gesamten Spektrum der erneuerbaren

¹⁴ Das entspricht über 60% des globalen Erdölverbrauchs [vgl. Internetquelle 2].

¹⁵ vgl. VCÖ (2007), S. 28.

¹⁶ vgl. VCÖ (2007), S. 29.

¹⁷ vgl. Geitmann (2010).

Energien möglich¹⁸. In Österreich, etwa, wären Elektrofahrzeuge durch den hohen Anteil von Wasserkraft in der Stromerzeugung bedeutend weniger abhängig von fossilen Energieträgern als konventionelle Diesel- und Benzin-Pkw (siehe Abb. 2-2)

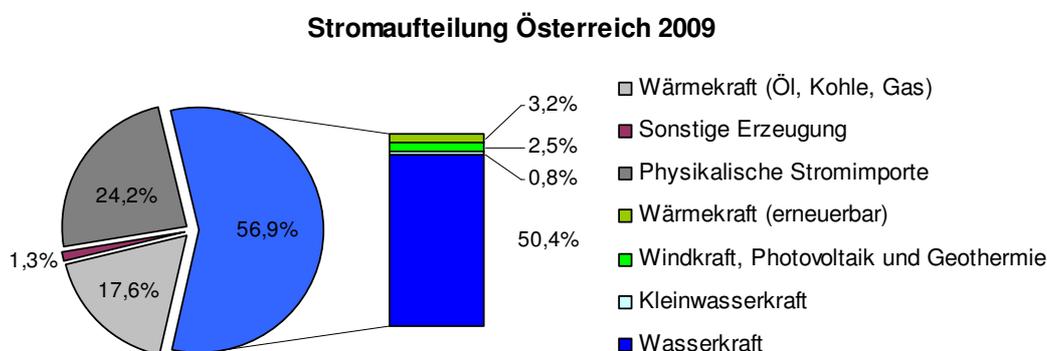


Abbildung 2-2: Aufbringung von Strom in Österreich 2009 [siehe Internetquelle 4]

2.2 Schadstoffemissionen des Verkehrs

Schon Anfang der sechziger Jahre erkannte man die negativen Auswirkungen auf die Luftqualität durch die bei herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren entstehenden Schadstoffemissionen. Man definierte Grenzwerte, die im Laufe der Jahre immer weiter verschärft worden sind. Zu diesen limitierten Schadstoffen zählen neben Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickstoffoxide (NO_x) seit geraumer Zeit auch Partikel (PM), die bei der Dieselerbrennung auftreten und durch ihre geringe Größe (wenige µm) Beschwerden der Atemwege hervorrufen können. Die Automobilindustrie entwickelt laufend Technologien, um die vorgegebenen Grenzwerte einzuhalten, wie etwa den 3-Wege Katalysator, Partikelfilter oder moderne SCR (Selective Catalytic Reduction)-Systeme. Neben diesen Schadstoffen rückten Mitte der achtziger Jahre die anderen, an sich für den Menschen unschädlichen, Spurengase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (N₂O) und voll-/teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW) ins Zentrum des Interesses. Die Veränderung ihrer natürlichen Konzentration in der Erdatmosphäre trägt dazu bei, den Treibhauseffekt zu verstärken und damit den Klimawandel zu begünstigen. Vor allem die CO₂-Emissionen, die unmittelbar mit dem Verbrauch eines Fahrzeugs zusammenhängen sind zentrales Diskussionsthema in der Umweltpolitik. Sie wurden bisher nicht limitiert, allerdings hat die EU bereits Flottengrenzwerte definiert, die sich nach dem durchschnittlichen Verbrauch aller verkauften Fahrzeuge eines Herstellers richten.¹⁹

¹⁸ vgl. Bundesregierung (2008), S. 4.

¹⁹ vgl. Geringer (2006), S. 268f.

Die größte Klimawirkung hat jedoch kein Industriegas, sondern der in hohen Luftschichten befindliche Wasserdampf (H₂O). Trotzdem werden die Auswirkungen des seit Beginn der Industrialisierung stark steigenden, (anthropogenen) globalen CO₂- Ausstoßes auf die Umwelt nicht mehr bezweifelt und es wird nach Maßnahmen gesucht, diesen in Zukunft wieder entsprechend zu reduzieren.²⁰

Der Verkehr gilt dabei als einer der Hauptverursacher: Im Jahr 2004 betrug dessen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen im globalen Mittel 13,1%. Nach der Energieerzeugung wies der Transportsektor²¹ mit 120% (zwischen 1970 und 2004) das größte Wachstum aller Sektoren auf. Durch die zunehmende Motorisierung in den Schwellenländern ist auch in Zukunft weiter mit starken Zuwächsen zu rechnen (siehe Abb. 2-3):

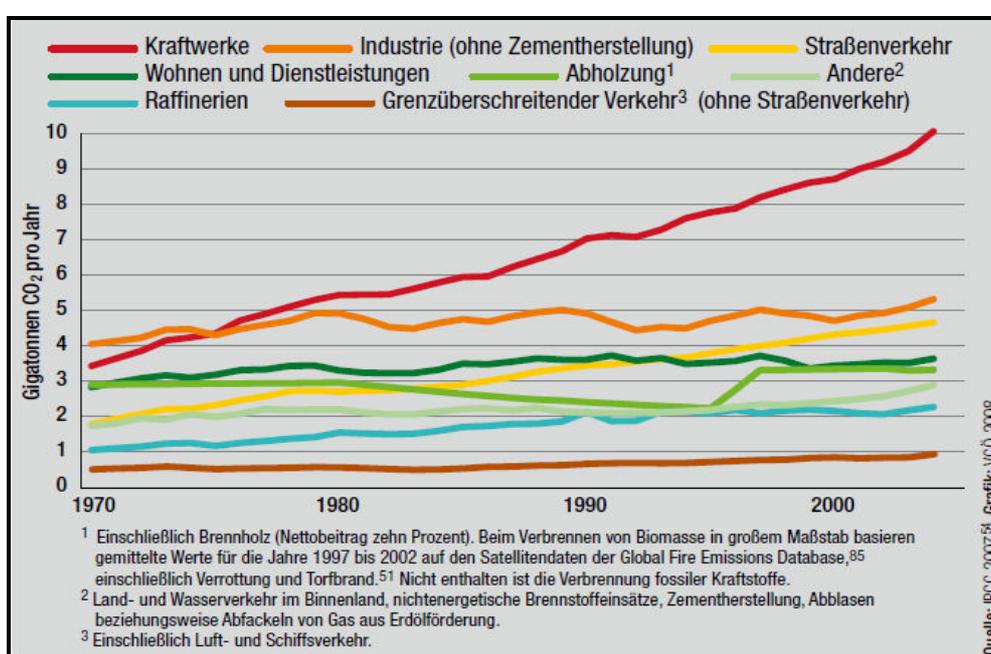


Abbildung 2-3: Weltweite CO₂-Emissionen nach Sektoren [siehe VCÖ (2008), S. 12]

Im Jahr 2006 lagen die CO₂-Emissionen des Verkehrs in Österreich bei rund 22,8 Mio. Tonnen, davon entfielen 94% (21,5 Mio. Tonnen) auf den Straßenverkehr und stellen somit ein Viertel der gesamten Treibhausgasemissionen Österreichs dar (siehe Abb. 2-4). Der PKW-Verkehr machte hierbei 59% der Emissionen (12,6 Mio. t) aus, der Rest war dem LKW-Verkehr zuzurechnen (8,9 Mio. t). Dabei ist anzumerken, dass den Berechnungen der in Österreich verkaufte Treibstoff zugrunde gelegt ist, nicht die tatsächlich in Österreich gefahrenen Kilometer. Durch niedrigere Preise an den Tankstellen stellt der sog. „Tanktourismus“ ein erhebliches Problem für Österreichs CO₂-Bilanz dar.²²

²⁰ vgl. Geitmann (2010).

²¹ Inklusiv Flugverkehr

²² vgl. Rebernick (2008) (zit. nach: VCÖ (2008), S. 15.)

Treibhausgasemissionen in Österreich nach Sektor 2006

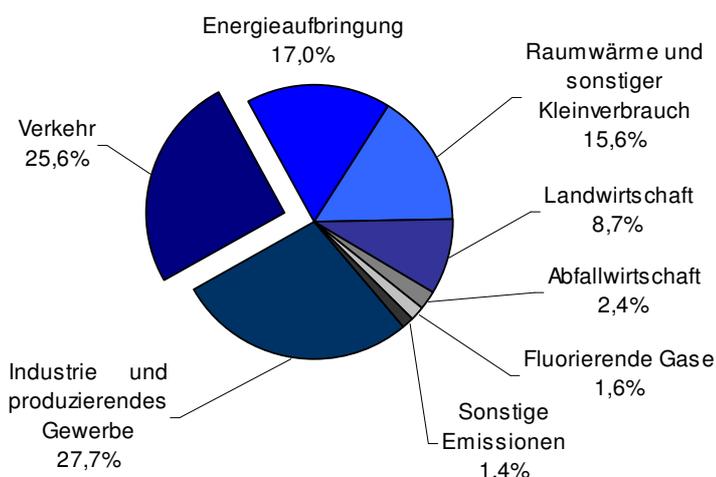


Abbildung 2-4: Verkehr ist einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen

[siehe VCÖ (2008), S. 15.]

Diese Zahlen zeigen sehr deutlich, dass der motorisierte Individualverkehr (MIV), um langfristig tragbar zu bleiben, auf nachhaltige Energieressourcen umsteigen muss. Elektromobilität kann durch den „Kraftstoff“ Strom wesentlich zur CO₂-Reduktion beitragen (siehe Kapitel 2.1). Allerdings verursachen auch Elektrofahrzeuge CO₂-Emissionen. Deren Höhe ist stark von den verwendeten Primärenergieträgern, sowie dem Energieeinsatz in der gesamten Wertschöpfungskette abhängig. Durch *Well-to-Wheel* - Analysen versucht man den Kohlendioxid-Ausstoß von der Rohstoffgewinnung (Well) bis zur Benützung des Fahrzeugs (Wheel) zu untersuchen und entsprechende Einsparungspotenziale aufzuzeigen. Ein wesentlicher Vorteil von Elektromobilität ist die lokale Schadstofffreiheit der Fahrzeuge, was die Luftqualität, vor allem in Ballungszentren deutlich verbessern würde. Zudem sind Elektroautos im Betrieb äußerst geräuscharm und tragen damit zu einer geringeren Lärmbelastung des Verkehrs bei.²³

2.3 Flächenverbrauch & Verkehrsunfälle

Unabhängig von der Wahl des Fahrzeugs ist bei einem weiteren Anstieg des Verkehrs auch der Ausbau entsprechender Verkehrsflächen und Infrastruktur notwendig, die zwangsläufig zu Beeinträchtigungen der natürlichen Umgebung führen.

Spricht man von Auswirkungen auf die Umwelt, so ist darin auch das menschliche Leben enthalten. Verkehrsunfälle gehören deshalb ebenfalls zu der wesentlichen Umweltproblematik des Verkehrs²⁴. Die FIA, der Weltautomobilverband, hat daher eine

²³ Vgl. VCÖ (2009), S. 10.

²⁴ vgl. Gruden (1994), S. 3.

Kampagne gestartet, um auf die Wichtigkeit dieses Thema hinzuweisen und entsprechende Maßnahmen für mehr Sicherheit im Straßenverkehr zu erarbeiten.²⁵

Diese Beeinträchtigungen werden durch vermehrten Einsatz von Elektrofahrzeugen nicht verringert oder gar beseitigt, sondern sind im Rahmen des Gesamtsystems Verkehr entsprechend zu behandeln.

2.4 Verkehrsaufkommen / Kfz-Bestand

Die ökologische Problematik des Individualverkehrs ist stark mit der Dichte der Fahrzeuge verbunden. Mit Beginn der Massenmotorisierung in den fünfziger Jahren ist das Automobil zum Symbol für Fortschritt und Technik geworden. Die Mobilitätsform der westlichen Industriestaaten dient nun als Vorbild für die aufstrebenden Schwellenländer wie Indien oder China, die bereits aufholen und starke Zuwächse bei den Neuzulassungen (siehe Abb. 2-5) verzeichnen. So ist beispielsweise China im vergangenen Jahr zum größten Automarkt der Welt mit einem Absatz von 13,8 Mio. Fahrzeugen avanciert.²⁶ Alleine wenn diese beiden Länder eine Autodichte erreichen wie etwa Österreich Ende der siebziger Jahre (ein PKW auf vier Menschen) dann würde dies eine Verdopplung des heutigen Fahrzeugbestands von etwa 600 Mio. auf 1,2 Mrd. Fahrzeugen bedeuten, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Umwelt.²⁷

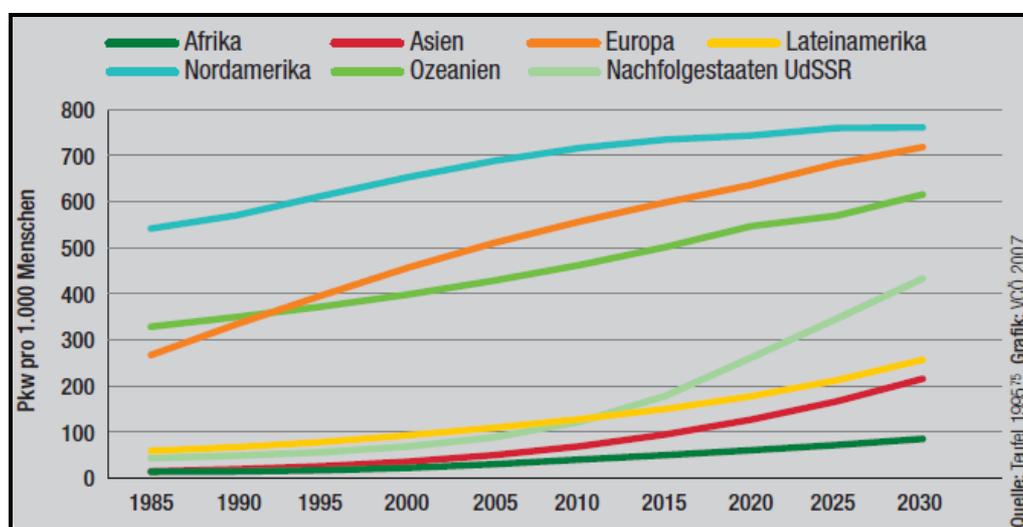


Abbildung 2-5: Globale Autodichten nach Region [siehe VCÖ (2007), S. 14]

In Österreich betrug der gesamte Kfz-Bestand Ende 2009 5,981.075 Fahrzeuge, davon entfielen 4,359.944 auf zugelassene PKW. Das entspricht einem Zuwachs von 1,8% gegenüber 2008. Im Durchschnitt kommen somit 521,8 Autos auf 1000 Einwohner.

²⁵ vgl. Internetquelle 5.

²⁶ vgl. Internetquelle 6.

²⁷ vgl. VCÖ (2007), S. 14.

Interessant dabei ist, dass Wien im Schnitt mit 393,5 Fahrzeugen auf 1000 Einwohner die geringste Dichte aufweist, was auch auf das gut ausgebaute öffentliche Verkehrsnetz zurückzuführen ist. Sieht man sich die verschiedenen Antriebsformen an, so kann man klar erkennen, dass der Dieselmotor in Österreich eine dominante Rolle einnimmt. Alternative Antriebe machen hingegen derzeit nur 0,13% des PKW-Bestands aus (siehe Abb. 2-6).

Anteil verschiedener Antriebe am PKW-Bestand 2009

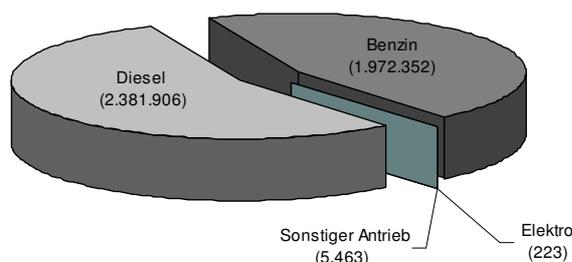


Abbildung 2-6: Anteil verschiedener Antriebe am österreichischen PKW-Bestand 2009

[siehe Internetquelle 7]

Die Zulassungsstatistik erfasst jedoch nicht das Mobilitätsverhalten der Menschen, welches darüber entscheidet, wie oft der PKW zum Einsatz kommt und welche Strecken damit gefahren werden. Aber auch hier zeigt sich, dass das Auto das mit Abstand wichtigste Transportmittel ist. 74% der im Jahr 2005 zurückgelegten Personenkilometer entfielen auf PKW, motorisierte Zweiräder und Flugverkehr, wobei der PKW-Verkehr mit 61% weitaus am größten war.²⁸

Diese Beobachtungen verdeutlichen, welche Potenziale eine größere Verbreitung von Elektrofahrzeugen unter ökologischen Betrachtungen bieten.

2.5 Fahr- und Nutzerprofile

Aus technischer Sicht reichen Elektrofahrzeuge aktuell nicht an die Leistungsdaten konventionell angetriebener Automobile heran. Das liegt vor allem an der hohen Energiedichte fossiler Treibstoffe, die bisher von verfügbaren Batterietechnologien nicht erreicht wird. Doch es stellt sich zunehmend die Frage, ob diese Reichweiten für die Massenmotorisierung überhaupt notwendig sind. Untersucht man das Mobilitätsverhalten der Menschen, so kann beobachtet werden, dass etwa in Österreich statistisch gesehen 95% aller Autofahrten kürzer als 50km und fünf sechstel sogar kürzer als 20km sind²⁹.

²⁸ vgl. VCÖ (2008), S. 15.

²⁹ vgl. VCÖ (2009), S. 10.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch in anderen europäischen Ländern, wie etwa Deutschland³⁰. Diese Reichweiten sind mit Elektroautos problemlos zu bewältigen, für längere Strecken ist dies aus heutiger Sicht technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Um nachhaltige Mobilität zu ermöglichen, werden Verkehrsteilnehmer daher in Zukunft jenes Transportmittel auswählen, das optimal für den jeweiligen Einsatz geeignet ist (multimodale Mobilität). Elektroautos werden in diesem Verkehrssystem entstehende Nischen füllen, um bestmögliche Mobilität zu gewährleisten, z.B.: in Regionen, die einen Betrieb von öffentlichem Nahverkehr nicht wirtschaftlich ermöglichen.³¹

Neben dem durchschnittlichen Fahrverhalten können auch Fahrprofile einzelner Nutzergruppen aus dem sog. „Modal Split“ bestimmt werden (siehe Abb. 2-7), der „die Aufteilung der Transportleistung auf verschiedene Verkehrsträger bzw. –mittel“³² bezeichnet.

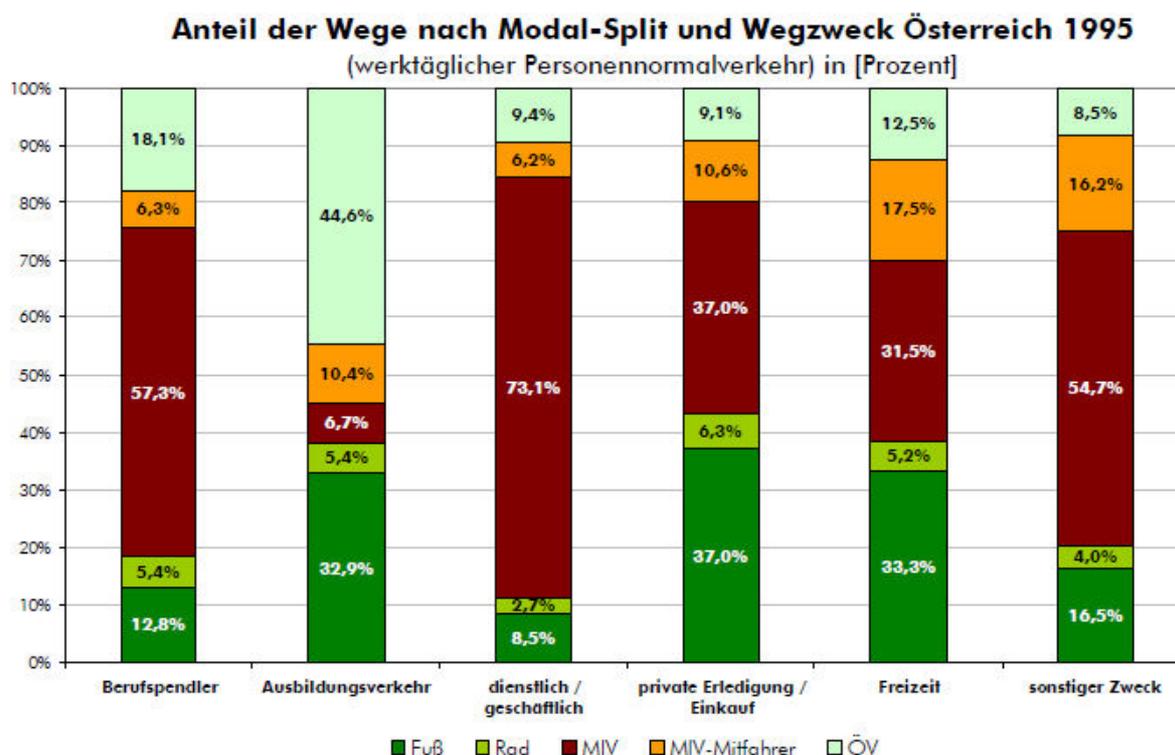


Abbildung 2-7: Anteil der werktäglichen Wege nach Wegzweck und Modal-Split Österreich 1995
[siehe Herry u.a. (2007), S. 100]

Als Grundlage für die ausgewählten Fahrprofile dienen die Anteile der (werk-)täglich zurückgelegten Wege nach Wegzweck im motorisierten Individualverkehr. Die häufigsten Wegzwecke – Berufspendler, dienstlich/geschäftlich, private Erledigungen und Freizeit – bilden die in weiterer Folge betrachteten Fahrprofile. Im Anschluss sollen diese hinsichtlich Weglänge, Wegdauer und Anzahl der täglichen Wege näher charakterisiert werden, sowie

³⁰ vgl. Gerl (2002), S. 66.

³¹ vgl. VCÖ (2009), S. 11f.

³² [Internetquelle 8]

um Elektrofahrzeugspezifische Kennzahlen erweitert werden. Alle Werte beziehen sich hierbei ausschließlich auf Werktage.³³

2.5.1 Berufspendler

„In [6] wird die durchschnittliche Weglänge eines Berufspendlers mit 14,4 km angegeben, und im Mittel benötigt er nach [2] dafür 24 Minuten. Diese Strecke legt er pro Tag zweimal zurück, von zu Hause, z.B. zum Arbeitsplatz oder zu einer Park-and-Ride Anlage und wieder retour. In dem verwendeten Modell bekommen die BEV dieses Fahrprofils die Möglichkeit an beiden Abstellorten zu laden. Das heißt, dass der Berufspendler zweimal am Tag die Batterie auflädt. Die dafür verwendete Batterie ist (...) eine Li-Ionen-Batterie, und ihre Nennenergiemenge beträgt laut [7] 20 kWh. Der Grid-to-Wheel-Verbrauch wird ebenfalls nach [7] mit 0,14 kWh/km angenommen.“

2.5.2 Dienstliche und geschäftliche Fahrten

„Laut [7] werden von Personen des Fahrprofils Dienstfahrer drei Strecken pro Tag zurückgelegt. Die durchschnittliche Weglänge beträgt nach [6] 23,7 km mit einer mittleren Wegdauer von 36 Minuten [2]. In [7] werden für die Nennenergiemenge 25 kWh und für den Grid-to-Wheel-Verbrauch 0,16 kWh/km veranschlagt. (...) Die Dienstfahrer bekommen nur zu Hause die Möglichkeit ihre Li-Ionen Batterie zu laden. Dadurch wird der Ladevorgang pro Tag auch nur einmal durchlaufen und zwar nach der letzten Fahrt.“

2.5.3 Private Erledigungen und Einkäufe

„Die BEV dieses Fahrprofils legen pro Weg im Mittel 7,4 Kilometer [6] zurück und benötigen für eine Strecke durchschnittlich 16 Minuten [2]. Laut [7] werden pro Tag vier solcher Wege absolviert. Wie bei den beiden vorhergehenden Fahrprofilen wurden auch bei diesem der Grid-to-Wheel Verbrauch und die Nennenergiemenge der Batterie von [7] übernommen. Die Werte der Parameter betragen 0,12 kWh/km und 10 kWh. In diesem Fahrprofil werden die Batterien nur zu Hause nach der letzten Fahrt geladen.“

2.5.4 Freizeitfahrten

„Beim letzten Fahrprofil beträgt die durchschnittliche Weglänge laut [6] 11 km und wird zweimal pro Tag zurückgelegt. Die im Mittel pro Strecke benötigte Zeit ist 25 Minuten [2]. Grid-to-Wheel-Verbrauch und Batterieenergiemenge (...) besitzen die Werte 0,12 kWh/km und 10 kWh. Das Aufladen der Li-Ionen Batterie findet nur zu Hause einmal pro Tag nach der letzten Fahrt statt.“³⁴

³³ vgl. Litzlbauer (2009), S. 20.

³⁴ vgl. Litzlbauer (2009) S. 19f.

Tabelle 2-1 fasst die angegebenen Parameter für die jeweiligen Fahrprofile nochmals zusammen:

Fahrprofile	Berufspendler	Dienstfahrer	Private Fahrten	Freizeit
Nennenergiemenge der Batterie	20 kWh	25 kWh	10 kWh	10 kWh
Grid-to-Wheel-Verbrauch	0,14 kWh/km	0,16 kWh/km	0,12 kWh/km	0,12 kWh/km
Gesamtstrecke/Tag	28,8 km	71 km	29,6 km	22,1 km
Zeitdauer / Strecke	24 min	36 min	16 min	25 min
Anzahl der Wege / Tag	2	3	4	2
Erwartungswert μ_1	06:30	07:15	08:15	11:30
Standardabweichung σ_1	1,2 h	1,25 h	1,3 h	3,5 h
Erwartungswert μ_2	15:30	11:30	10:15	18:00
Standardabweichung σ_2	2,7 h	1,7 h	1,3 h	1,5 h
Erwartungswert μ_3	---	16:30	14:15	---
Standardabweichung σ_3	---	1,7 h	1,25 h	---
Erwartungswert μ_4	---	---	15:15	---
Standardabweichung σ_4	---	---	1,1 h	---
Lademöglichkeit nach Weg 1	Am Arbeitsplatz	nicht gegeben	Nicht gegeben	Nicht gegeben
Lademöglichkeit nach Weg 2	zu Hause	nicht gegeben	Nicht gegeben	Zu Hause
Lademöglichkeit nach Weg 3	---	zu Hause	Nicht gegeben	---
Lademöglichkeit nach Weg 4	---	---	Zu Hause	---

Tabelle 2-1: Relevante Parameter für die betrachteten Fahrprofile [siehe Litzlbauer (2009), S. 21]

3 Grundlagen der Elektromobilität

In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Elemente der Elektromobilität näher beschrieben werden. Zunächst soll die Rolle des Elektrofahrzeugs in der Automobilgeschichte erläutert, und ein Überblick über aktuelle Fahrzeugkonzepte gegeben werden. Zudem erfolgt eine Eingrenzung auf die für eine Ladeinfrastruktur relevanten Antriebsformen. Den Akkumulatoren kommt eine zentrale Rolle bei Elektrofahrzeugen zu. Deren spezifischen Eigenschaften legen die Reichweite fest und damit auch die Anforderungen an die Lademöglichkeiten, hinsichtlich Ladeleistung bzw. Verweildauer am Stehplatz und Dichte des Ladenetzes. Die wichtigsten, für Automobile geeigneten, Batterietechnologien werden hierbei kurz vorgestellt und miteinander verglichen. Durch den Treibstoff „Strom“ wird die Energiewirtschaft Teil der automobilen Wertschöpfungskette. Für sie ist von Interesse, ob der zusätzliche Bedarf die verfügbaren Kapazitäten übersteigt. Warum Elektromobilität den Ausbau erneuerbarer Energien fördert und wie sie hilft, diese besser in das Stromnetz zu integrieren soll ebenso an dieser Stelle erklärt werden. Abschließend werden mögliche Auswirkungen auf den Markt skizziert. Elektromobilität bietet in diesem Zusammenhang Potenziale für neue Kooperationen, Geschäftsmodelle und alternative Mobilitätskonzepte.

3.1 Fahrzeug

3.1.1 Geschichte des Elektroautos

Schon seit Beginn der mehr als 100-jährigen Automobilgeschichte gab es parallel Fahrzeuge mit Elektroantrieb und Verbrennungsmotor. Dabei sah es längere Zeit aus, als ob sich die elektrische Antriebsform durchsetzen würde. Vorteile waren das lautlose und ruckfreie Fahren, sowie die einfache und saubere Bedienung des Fahrzeugs. Doch Innovationen, wie die Erfindung des elektrischen Anlassers 1911 und der Wunsch nach immer größeren Reichweiten in Verbindung mit sehr niedrigen Treibstoffpreisen, drängten Elektroautos zusehends vom Markt und sind seitdem nur mehr in Nischen zu finden.³⁵

Erst die Ölkrise in den 1970er Jahren weckte wieder das Interesse an Elektroantrieben. Die Entwicklungen in der Halbleiter- und Steuerungstechnik erlaubten den Ingenieuren neue Lösungswege. Doch die geringen Fortschritte im Bereich der Akkumulatoren verhinderten weiterhin größere Reichweiten und somit einen praxistauglichen Einsatz.³⁶

Seit Beginn der 1990er Jahren ist die immer strengere Abgasgesetzgebung als zusätzlicher Treiber alternativer Antriebskonzepte hinzugekommen. In Kalifornien wurde der „Clean Air Act“ erlassen, der bis 2003 einen Anteil von 10% sog. ZEV's (Zero Emission Vehicle) vorsah

³⁵ vgl. Mikulic u.a. (1994) und Naunin (1994).

³⁶ vgl. Simons (1998).

und die Entwicklung von Brennstoffzellen- oder Elektroautos zusätzlich förderte. Vor allem die hohe Schadstoffimmission (schlechte Luftqualität bzw. Smog) war Auslöser für die schärfere Gesetzgebung. Auch in anderen US-Bundesstaaten, der EU und Japan – die zu der Zeit wichtigsten Automärkte der Welt – traten immer strengere Abgasnormen in Kraft.³⁷

In der letzten Dekade ist die Diskussion um die globale Klimaerwärmung hinzugekommen, in der der anthropogene CO₂-Ausstoß eine zentrale Rolle einnimmt. Angesichts dieser treibenden Faktoren erhoffen sich viele Hersteller wieder eine reelle Marktchance für das Elektrofahrzeug. Die Reichweitenproblematik könnte etwa durch Hybridisierung des Antriebsstranges entschärft werden. Die Fortschritte in der Batterietechnologie erlauben bereits akzeptable Reichweiten, die für viele Einsatzbereiche ausreichend sind.³⁸ Wirft man einen Blick auf die Pläne und angekündigten Modelle der Hersteller, kann davon ausgegangen werden, dass die automobiler Zukunft – zumindest teilweise – elektrisch sein wird. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob die hohen Erwartungen an dieses Antriebskonzept auch erfüllt werden können.

3.1.2 Fahrzeugkonzepte

*„In den ersten 100 Jahren wurde unter einem Elektroauto ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug verstanden, d.h. ein Fahrzeug, das einen Elektroantriebsmotor hat, der aus einer Batterie gespeist wird. Dadurch, dass die Batterietechnologie sich nicht so schnell entwickelt hat wie man sich erhoffte, sind in den letzten 15 Jahren andere Energiesysteme entwickelt worden, die den elektrischen Antriebsmotor mit Energie versorgen können. Dies ist zum einen die Brennstoffzelle, die in ihrer reinen Version als Eingangsenergien Wasserstoff und Sauerstoff erfordert und aus ihnen elektrische Energie erzeugt, zum anderen sind es Hybrid-Elektrosysteme, die einen Verbrennungsmotor und (mindestens) einen Elektromotor enthalten und entweder als Parallelhybrid gemeinsam oder als Serienhybrid über einen Elektromotor ein Fahrzeug antreiben. In jedem Fall ist eine elektrische Antriebsmaschine im Fahrzeug enthalten und rechtfertigt somit den Namen **Elektrofahrzeug**.“³⁹*

Die Bewertung elektrischer Antriebe beschränkt sich nicht auf die Motorleistung und die Batteriekapazität. Es sind noch weitere Kriterien zu berücksichtigen, um verschiedene Fahrzeugtypen miteinander vergleichen zu können:⁴⁰

- ◆ Lokale Emissionsfreiheit

³⁷ vgl. Geringer (2006) und Simons (1998).

³⁸ vgl. Naunin (2007a).

³⁹ Naunin (2007b), S. 1.

⁴⁰ Simons (1998), S. 102.

- ◆ Emissionsminderung der limitierten Schadstoffe in der Gesamtenergieumwandlungskette
- ◆ CO₂-Emissionsminderung und Senkung des Energieverbrauchs der Gesamtenergieumwandlungskette

Um diese Anforderungen bestmöglich zu erfüllen gibt es verschiedene Konzepte, die in weiterer Folge kurz vorgestellt werden sollen.

3.1.2.1 Reine Elektrofahrzeuge

Diese Fahrzeuge werden ausschließlich mit einer Batterie betrieben, die den Strom für den Antrieb liefert. Sie werden unter dem Begriff Battery Electric Vehicle (BEV) zusammengefasst und emittieren lokal keine Emission. Es existieren unterschiedliche Bauformen:

a) Konversionsfahrzeuge

Unter einem Konversionsfahrzeug versteht man die Modifizierung eines herkömmlichen Fahrzeugs auf einen elektrifizierten Antriebsstrang. Durch die Nähe zur Großserie kann das Fahrzeug in relativ kurzer Zeit mit den aktuellen Qualitäts-, Sicherheits- und Komfortstandards am Markt angeboten werden. Zum einen reduziert sich zwar die Entwicklungszeit, zum anderen fehlen jedoch geeignete Bauräume für die effiziente Unterbringung der Batterien. Zudem wird das Zuladungsgewicht deutlich verringert. Die Konversionslösung ist meist der erste Ansatz eines Herstellers, aber nicht konsequent auf die Erfordernisse eines Elektroantriebs ausgelegt und kann daher auch nicht alle Vorteile voll ausnützen.⁴¹

Abb. 3-1 zeigt zwei Beispiele solcher umgebauten Standardmodelle, *VW Golf Blue E-Motion* und *Renault Fluence Z.E.* Rein äußerlich sind sie von den Modellen mit Verbrennungsmotor nicht zu unterscheiden



Abbildung 3-1: Beispiele Konversionsfahrzeug

[siehe Internetquelle 9 und 10]

⁴¹ vgl. Mikulic u.a. (1994), S. 20; Kalberlah u.a. (1994), S. 150ff.

b) Purpose-Design Fahrzeuge

Elektroautos, bei denen sich die Neuartigkeit nicht auf den elektrischen Antrieb und seine Komponenten beschränkt, nennt man *Purpose-Design* Fahrzeuge. Sie können das Potenzial hinsichtlich Energie- und Emissionseinsparung vollständig ausnutzen. Solche, heute am Markt verfügbare Modelle, sind jedoch in Anspruch und Leistung mit herkömmlichen Autos nicht vergleichbar. Typische Eigenschaften sind ein geringes Gewicht, geringe Reichweiten, sowie ein eingeschränktes Platzangebot. Sie sind vorwiegend für den Stadtverkehr und den Kurzstreckeneinsatz konzipiert, die den Großteil der täglichen Fahrten ausmacht. Dadurch werden die Vorteile des Elektroantriebs optimal genutzt (hohes Anfahrmoment, lokale Emissionsfreiheit), sowie die benötigte Batteriekapazität sinnvoll begrenzt⁴². Nachteilig ist, dass hinsichtlich des Komforts und der Qualitäts- und Sicherheitsstandards Abstriche gemacht werden müssen, was bis heute zu geringen Stückzahlen geführt hat. Ein Vertreter dieser Fahrzeugkategorie ist das Modell *City* des norwegischen Herstellers *Think!*:



Abbildung 3-2: Beispiel Purpose-Design Fahrzeug [siehe Internetquelle 11]

Etablierte Hersteller definieren Purpose-Design etwas anders, nämlich als optimale Auslegung eines Fahrzeugs auf den E-Antrieb, ohne Kompromisse bei den aktuellen Standards eingehen zu müssen⁴³. Aufgrund der längeren Entwicklungszeiten für solche Fahrzeuge, werden sie in den nächsten Jahren aber kaum auf den Markt kommen. Eine Ausnahme stellt das BMW Mega City Vehicle (MCV) dar, welches ab 2013 in Leichtbauweise produziert werden soll⁴⁴.

c) Solarmobile

Elektrofahrzeuge mit integrierten Solarzellen können sowohl im Stand, als auch während der Fahrt aufgeladen werden. Die relativ geringe Energieaufnahme erfordert eine sehr leichte Konstruktion und eine große Fläche für die Photovoltaikzellen. Dadurch entsteht die für Solarmobile typische Form (siehe Abb. 3-3). Bisher ging dieser Fahrzeugtyp jedoch nicht über fahrtüchtige Prototypen hinaus und wird auch in naher Zukunft nicht auf den Markt

⁴² Simons (1998), S: 109.

⁴³ vgl. Mikulic u.a. (1994), S. 20.

⁴⁴ vgl. Internetquelle 12.

kommen⁴⁵. Einzelne Bauteile mit Solarzellen zu bestücken könnte jedoch durchaus sinnvoll sein. Die Firma SEV (Solar Electrical Vehicles) bietet etwa ein Solardach für den Toyota Prius an, wodurch sich die Reichweite rein elektrischen Fahrens vergrößern lässt.⁴⁶



Abbildung 3-3: Solarmobil [siehe Internetquelle 14]

3.1.2.2 Hybridfahrzeuge

Als Hybrid wird ein Fahrzeug bezeichnet, in dem „*mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben*“⁴⁷. In der Praxis wird dabei meist die Kombination aus Elektro- und Verbrennungsmotor verstanden, mit den zugehörigen Speichersystemen Batterie (elektrochemisch) und Kraftstofftank (Benzin/Diesel), wenngleich auch andere Kombinationsmöglichkeiten, z.B. Wasserstoff-Brennstoffzelle und Elektromotor möglich wären. Entsprechend der Anordnung von Verbrennungsmotor, E-Maschine, Generator, Batterie und Getriebe können Hybride in

- ◆ Serielle Hybridantriebe,
- ◆ Parallele Hybridantriebe und
- ◆ Leistungsverzweigte und kombinierte Hybridantriebe

eingeteilt werden. Zudem werden sie hinsichtlich ihrer Funktionen und ihrem Nutzen in Micro-, Mild-, Full- und Plug-In Hybride unterschieden⁴⁸ (siehe Tabelle 3-1).

⁴⁵ vgl. Mikulic u.a. (1994)

⁴⁶ vgl. Internetquelle 13.

⁴⁷ Hofmann (2010), S. 3.

⁴⁸ vgl. Hofmann (2010), S. 17.

Funktionen und Nutzen	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full Hybrid	Plug-In Hybrid
Konstruktive Merkmale	Leistungsfähiger Anlasser und regelbarer Generator oder Riemenstarter-generator	Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG)	Trennkupplung zum Verbrennungsmotor oder mehrere E-Maschinen	Elektroantrieb mit Verbrennungsmotor als Range Extender
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Start/Stopp • Eingeschränkt Rekuperation 	<ul style="list-style-type: none"> • Start/Stopp • Rekuperation • Boosten • Generatorbetrieb • Eingeschränkt E-Fahren bei niedrigen Geschw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Start/Stopp • Rekuperation • Boosten • Generatorbetrieb • E-Fahren für kurze Reichweiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Start/Stopp • Rekuperation • Boosten • Generatorbetrieb • E-Fahren für mittlere Reichweiten • Ext. Nachladung
Leistung E-Maschine	2-3 kW	10-15 kW	>> 15 kW	>> 15 kW
Spannungsniveau	12-42 V	42-150 V + 12 V Bordnetz	> 200 V + 12 V Bordnetz	> 200 V + 12 V Bordnetz
Typische Batterietechnologie	Blei-Säure, AGM	NiMH, Li-Ion, Super Caps, + Blei-Säure	NiMH, Li-Ion, (+ Blei-Säure)	NiMH, Li-Ion, (+ Blei-Säure)
Verbrauchseinsparung	5-10%	10-20%	>20%	
Ausgeführte Beispiele	BMW 1er 2007 Saturn Vue Greenline Hybrid 2007 Saturn Aura Greenline Hybrid 2007	Chevrolet Silverado 2004 Citroën C4 Hybrid HDi 2006 GMC Sierra 2004 Honda Civic IMA 2004 u. 2006 Honda Insight IMA 1999	Audi Duo 1997 Audi Q7 Hybrid 2005 BMW X3 Efficient Dynamics 2005 Chevrolet Tahoe Hybrid 2008 Ford Escape Hybrid 2005	Volvo Recharge Renault Kangoo Elect'road Renault Kangoo Cleanova II Opel Flextrime VW TwinDrive
		Peugeot 307 Hybrid HDi 2006 Saturn Aura Greenline Hybrid Mercedes S400 Hybrid	GMC Yukon Hybrid 2008 Lexus RX400h 2005 Toyota Prius 2001 Mercedes ML450 Hybrid	

Tabelle 3-1: Hybridvarianten [siehe Hofmann (2010), S. 19]

Oftmals taucht auch der Begriff Elektrofahrzeuge mit „Range Extender“ auf. Obwohl streng genommen eigentlich ein Plug-In Hybridfahrzeug⁴⁹, hat die VKM einen viel stärkeren Charakter als Stromgenerator wie bei den geplanten oder bereits ausgeführten Plug-In Hybrid-Modellen und wird deshalb als eigenständige Variante geführt. Bekanntester Vertreter von Hybriden ist der *Toyota Prius*, der eine Vorreiterrolle eingenommen hat und in der nächsten Modellgeneration als Plug-In Hybrid erhältlich sein wird:



Abbildung 3-4 *Toyota Prius* PHEV [siehe Internetquelle 15]

3.1.2.3 Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Brennstoffzelle erzeugt durch eine chemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie, die einen E-Motor antreibt. Das Prinzip ist engverwandt mit dem einer Batterie, arbeitet jedoch irreversibel und ist damit genau betrachtet ein Energiewandler und kein Energiespeicher⁵⁰. Abb. 3-5 zeigt die schematische Darstellung einer Brennstoffzelle:

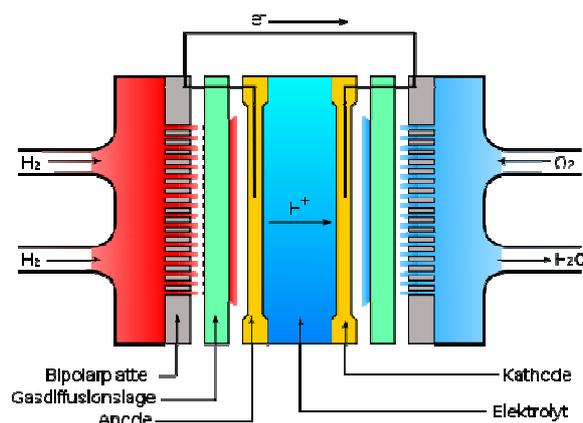


Abbildung 3-5: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [siehe Internetquelle 15]

⁴⁹ vgl. Hofmann (2010), S. 20.

⁵⁰ vgl. Hofmann (2010), S. 110.

Bisher existieren Prototypen aller namhaften Hersteller, die oftmals in Kombination mit einer Batterie als Hybridvarianten ausgeführt werden. Allerdings sind viele Fragen für einen praxistauglichen Einsatz noch offen und auch die Herstellungskosten für die Zellstapel⁵¹ – auch „Stacks“ genannt – sind derzeit noch zu hoch. Langfristig ist eine Markteinführung dieser Technologie jedoch durchaus realistisch⁵². Abb. 3-6 zeigt die Ausführung eines Brennstoffzellenprototyps von *Daimler*:



Abbildung 3-6: Brennstoffzellenfahrzeug von *Daimler* [siehe Internetquelle 17]]

3.1.3 Betrachtete Fahrzeuge

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Fahrzeuge betrachtet, die, bedingt durch ihre Konzeption, Relevanz für die Ladeinfrastruktur haben. Diese sind

- ◆ Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV)
- ◆ Plug-In Hybridelektrische Fahrzeuge (PHEV)
- ◆ Elektrofahrzeuge mit Range Extender (REEV) und langfristig auch
- ◆ Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)⁵³

Die übrigen Antriebskonzepte werden durch die geringen Speicherkapazitäten bzw. durch die direkte Umwandlung von Sonnenenergie nur geringe Mengen an Strom für die Fortbewegung benötigen.

Tabelle 3-2 zeigt einen Überblick über die in den nächsten Jahren am (europäischen) Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge.

⁵¹ „Verbund elektrochemischer Zellen, der üblicherweise durch Serienschaltung, d.h. parallele Anordnung von Elektroden, bipolaren Platten sowie elektrolytgefüllte Zwischenräume realisiert wird.“ [Ledjeff 1995, S. 179]

⁵² vgl. Schubert (2007), S. 120.

⁵³ Brennstoffzelle auch als Range Extender einsetzbar.

Marke / Modell	Marktstart	Marke / Modell	Marktstart
Audi A1 e-tron	unbekannt	Mitsubishi i-MiEV	Okt. 2010
BMW Megacity	2013 / 2014	Nissan Leaf	2011
BYD e6	2011	Opel Ampera	Ende 2011
Chevrolet Volt	2010 (USA)	Peugeot iOn	Dez. 2010
Chrysler 200C EV	2012	Renault Twizy Z.E.	2011
Citroen C Zero	Dez. 2010	Renault Fluence Z.E.	2011
Ford Focus EV	2012	Renault Kangoo Z.E.	2011
Ford Transit EV	2011	Renault Zoe Z.E.	2012
Heuliez Mia	Sept. 2010	eRuf Roadster	2011
Hyundai i10 EV	2012	Smart Fortwo ED	2012
Karabag 500 E	2009	Tesla Roadster	2009
Karmann E3	2012	Tesla Model S	2012
Loremo EV	2012	Toyota FT EV II	2012
Mercedes E-Cell	2013	VW E-up!	2013
Mercedes Vito	Okt. 2010	VW Golf EV	2013

Tabelle 3-2: Marktvorschau für Elektrofahrzeuge in Europa [siehe Internetquelle 18]

Hinzu kommt noch eine Vielzahl an Hybridfahrzeugen. Eine umfassende Marktübersicht und Prognose der globalen Absatzzahlen – unterteilt nach Region und Fahrzeugkategorien – gibt die *Global Electric Vehicles Market Forecast Database* von Frost & Sullivan, die jährlich aktualisiert bzw. um neue Modelle ergänzt wird.⁵⁴

3.2 Energiespeicher

An Energiespeichersysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge werden sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt. Dies sind üblicherweise Fragen der Energiedichte, Leistung, Ladefähigkeit, etc., doch neben den rein technischen, sind ökologische und wirtschaftliche Aspekte bei der Auswahl zu beachten. Daraus ergibt sich ein umfangreicher Anforderungskatalog für den praktischen Einsatz.⁵⁵

3.2.1 Technische Anforderungen

Während für reine Elektrofahrzeuge ein möglichst hohes Energiespeichervermögen den Gebrauchswert des Fahrzeugs bestimmt, steht bei Hybridantrieben⁵⁶ die Leistung des Batteriesystems im Vordergrund. Folgende Aspekte sind ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit des Systems:⁵⁷

⁵⁴ vgl. Frost & Sullivan (2011).

⁵⁵ vgl. Hofmann (2010), S. 147.

⁵⁶ Gilt für Hybridfahrzeuge, die, wenn überhaupt, nur für sehr kurze Strecken rein elektrisch fahren.

⁵⁷ vgl. Köhler (2007), S. 34ff.

Energieinhalt

Für ein durchschnittliches Elektrofahrzeug der Kompaktklasse wird ein auf Gewicht und Fahrstrecke bezogener Energiebedarf von ca. 140 Wh / (km·t) veranschlagt. So benötigt beispielsweise ein Fahrzeug mit einem Gewicht von ca. 1 t und einer Reichweite von 150 km einen Energieinhalt von etwa 20 kWh. Heutige Hybridfahrzeuge besitzen hingegen nur Energiespeicher mit weniger als 1,5 kWh pro t Fahrzeuggewicht, da sie als Leistungsspeicher für kurze Lade- und Entladevorgänge genutzt werden.

Leistung

Elektroantriebe müssen über ähnliche fahrdynamische Eigenschaften wie Autos mit konventionellem Antrieb verfügen. Die typische Leistungsanforderung an eine Traktionsbatterie liegt hierbei im Bereich von etwa 30 kW pro t Fahrzeuggewicht. Aufgrund der Leistungsunterstützung bei Anfahren und Beschleunigen werden bei Hybridfahrzeugen – abhängig vom Fahrzeugtyp – zwischen 30 kW und 60 kW spezifischer Leistung gefordert. Für das „Packaging“ ist zudem ein möglichst hoher Wert für die Leistungsdichte (W/l) interessant, da meist nur begrenzter Bauraum, vor allem bei Hybridfahrzeugen, zu Verfügung steht⁵⁸.

Ladefähigkeit

Generell ist eine schnelle Rückladung leerer Akkumulatoren bei Elektrofahrzeugen gefordert. Die Ladeleistung wird durch den jeweiligen Stromanschluss begrenzt. Haushaltsanschlüsse weisen eine Leistung von 3,7 kW⁵⁹ auf, was bei einer Batterie von 20 kWh zu einer Ladezeit von mind. 6h führt. Durch Erhöhung der Anschlussleistung kann eine Verkürzung der Ladedauer auf unter eine Stunde erreicht werden. Hybridfahrzeuge erzielen vor allem durch elektrische Rückgewinnung der Bremsenergie („Rekuperation“) Kraftstoffeinsparungen im Betrieb. Dies erfordert eine extreme Schnellladefähigkeit und die Abdeckung entsprechender Leistungsspitzen (30 kW/t). Bei Abfall des Ladezustands (z.B.: viele Beschleunigungsvorgänge) ist eine schnelle Nachladung gefragt, mit kontinuierlichen Ladeleistungen bis ca. 10 kW/t.

Lebensdauer

Die Alterung des Energiespeichers, ohne elektrische Belastung bzw. Betrieb, bezeichnet man als *kalendarische Lebensdauer*. Die Hauptursache für den über die Zeit zu beobachtenden Kapazitäts- und Leistungsverlust ist die stark temperaturabhängige und stetige Zersetzung von Elektrolytkomponenten. Neben der „kalendarischen“ gibt es auch eine „Zykluslebensdauer“, die angibt wie oft ein definierter Lastzyklus unter bestimmten

⁵⁸ vgl. Hofmann (2010).

⁵⁹ $P = U \cdot I$; $P = 230V \cdot 16A = 3680 W = 3,68 kW$

Umgebungsbedingungen durchfahren werden kann, bis das Ende der Lebensdauer erreicht wird. Die Zyklenlebensdauer überlagert die kalendarische, sodass Schädigungen kumuliert werden. In der Praxis werden Lebensdauern von etwa 10 Jahren gefordert.⁶⁰

Wirkungsgrad

Ein wichtiges Argument für den Elektroantrieb ist der höhere Wirkungsgrad gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren. Für das Energiespeichersystem bedeutet dies, eine möglichst verlustfreie Energieaufnahme und -abgabe zu realisieren. Durch Widerstände oder elektrochemische Reaktionskinetik bedingte Polarisationsverluste müssen minimiert werden. Es werden hierbei Wirkungsgrade von mehr als 90% gefordert.

3.2.2 Ökonomische Kriterien

Zu den technologischen Hürden für einen praxisgerechten Einsatz im Fahrzeug kommen noch wirtschaftliche hinzu, vor allem durch die hohen Kosten der zusätzlichen Komponenten. Marktstudien zeigen, dass ein Großteil der Kunden bereit wäre, bis zu 2.000€ mehr als für ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu bezahlen⁶¹. Die Batteriekosten liegen aktuell bei ca. 500 €/kWh⁶². Für die oben erwähnte Batterie mit 30 kWh Energieinhalt bedeutet dies einen Stückpreis von ca. 15.000€. Obwohl Komponenten wie Verbrennungsmotor, Getriebe, etc. dabei entfallen, sind die Kosten für Elektrofahrzeuge aus heutiger Sicht dennoch um einiges höher, als vom Kunden akzeptiert wird. Durch geeignete Konzepte, wie Batterieleasing, müssen diese Kosten daher auf die gesamte Nutzungsdauer verteilt werden. Als weitere Anforderungen sind geringer Wartungsaufwand, Serientauglichkeit, Crashesicherheit, Infrastruktur, Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit zu nennen, die ebenfalls über den erfolgreichen Absatz von Elektrofahrzeugen entscheiden werden.⁶³

3.2.3 Ökologische Kriterien

Einige Materialien, die in Batteriesystemen von Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen sind giftig – wie etwa Cadmium oder Blei – und unterliegen strengen rechtlichen Bestimmungen. In der Elektronikindustrie ist die Verwendung bestimmter Substanzen durch eine entsprechende Richtlinie der Europäischen Union bereits verboten⁶⁴. Die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Technik, sowie die Wiederaufarbeitung (Recycling) der Einzelkomponenten mit geringem Aufwand sind daher wichtige Anforderungen an die Energiespeichersysteme.⁶⁵

⁶⁰ vgl. Hofmann (2010).

⁶¹ vgl. o.V.: *Aral Studie - Trends beim Autokauf 2009*. Bochum: 2009, S. 20.

⁶² vgl. Dinger u.a. (2010), S. 5.

⁶³ vgl. Hofmann (2010), S. 147.

⁶⁴ vgl. Internetquelle 19.

⁶⁵ vgl. Mikulic u.a. (1994), S. 23.

3.2.4 Batterietechnologien

Es existieren zahlreiche Batteriekonzepte, um die unterschiedlichen Anforderungen in Zukunft mehr oder weniger gut zu erfüllen:⁶⁶

Blei-Batterien (Pb/PbO₂)

Diese Batterien sind heute als „Starterbatterie“ in den meisten Kfz verbaut und dadurch nur einer geringen zyklischen Dauerbelastung ausgesetzt. Man unterscheidet hinsichtlich des Elektrolyts verschiedene Bauformen: Pb-Flüssigsäure-, Pb-Gel und Pb-AGM (Absorbent Glass Mat) – Batterien, wobei Gel- und Glassfaservlies für Traktionsbatterien in Frage kommen. Standardbauform sind prismatische Zellen, allerdings gibt es auch Wickelzellen für höhere Belastbarkeit und längere Lebensdauer. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist dieser Batterietyp serienreif, allerdings kann er die gestellten Forderungen an ein Elektrofahrzeug nicht erfüllen. Mit entsprechenden Modifikationen ist er für den Einsatz in Micro-Hybridsystemen aber gut geeignet.

Nickel-Metallhydrid-Batteriesysteme (NiMH)

Die NiMH-Batterie gilt als Nachfolgesystem für die NiCd-Batterie, welche aus technischen und ökologischen Gründen in Zukunft nicht zur Anwendung kommen wird. Dieser Batterietyp hat sich in den letzten Jahren als zuverlässiges und leistungsfähiges System für Hochleistungsanwendungen im Fahrzeugbereich erwiesen. Das Konzept ist weitgehend ausgereift und serientauglich. Hinsichtlich der Bauform unterscheidet man zwischen prismatischen (große Zellkapazität) und zylindrischen (kleine Zellkapazität) Zellen. Bei der Energiedichte sind sie Lithium-Ionen-Batterien unterlegen, können dennoch für Hybrid- und Elektrofahrzeuge verwendet werden. Der *Toyota Prius* ist mit diesem Batteriesystem ausgestattet.⁶⁷

ZEBRA⁶⁸-Batterie (Na-NiCl) / Natrium-Schwefel-Batterie (Na-S)

Sowohl Na-NiCl-, als auch Na-S-Batterien sind sogenannte Hochtemperaturbatterien, deren Arbeitstemperatur zwischen 270°C und 390°C liegt. Sie sind robust und weisen eine lange Lebensdauer auf, bei vergleichsweise niedrigen Kosten. Als nachteilig sind die hohe Betriebstemperatur und die Selbstentladung auf Grund von thermischen Verlusten zu nennen, die für den Praxiseinsatz hinderlich sind.

⁶⁶ Für Beschreibung der Konzepte, vgl. Köhler (2007); Hofmann (2010); Mikulic u.a. (1994).

⁶⁷ vgl. Internetquelle 20.

⁶⁸ *Zeolite Battery Research Africa Project* oder *Zero Emission Battery Research Activity*

Lithium-Ionen-/Polymer Batterien (Li-Ion/Li-Polymer)

Lithium-Ionen-Batterien stellen die technisch jüngste Entwicklung im Batteriesektor dar. In der Unterhaltungselektronik und bei Notebooks sind sie bereits erfolgreich im Einsatz und es wird erwartet, dass sie eine dominante Rolle bei Elektrofahrzeugen spielen werden. Zahlreiche Joint-Ventures von OEM's mit Batterieherstellern stellen dies unter Beweis. Aufgrund der im Verhältnis zu wässrigen Medien sehr geringen Leitfähigkeit des festen Elektrolyts, müssen die Elektroden sehr dünn ausgeführt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Fertigung und erhöht somit die Kosten. Bezüglich der Bauformen werden auch hier prismatische und zylindrische Zellen unterschieden, wobei letztere aufgrund der großen und damit langen Elektrodenfläche bevorzugt werden. Prismatische Zellen nützen den zu Verfügung stehenden Bauraum hingegen besser aus. Die einzelnen Zellen werden schließlich zu einem Modul zusammengefasst. Ein aufwändiges Batteriemanagementsystem zur Überwachung der Zellen schützt vor Über- und Tiefladung, sowie gefährlichen Kurzschlüssen, die zum Brand führen können. Bei Energieinhalt, Ladeleistung, Lebensdauer und Wirkungsgrad (fast 100%) sind Li-Ionen Akkus allen anderen Batteriekonzepten überlegen.

Metall-Luft Batterien

Ein weiteres vielversprechendes Konzept sind Zink-Luft-Batterien, die etwa in Hörgeräten zu finden sind. Für den Einsatz in Fahrzeugen sind die darstellbaren Energiedichten derzeit noch zu gering, allerdings haben Entwickler der Schweizer Firma *Revolt* nun signifikante Verbesserungen erzielen können, die diesen Batterietyp am Markt wettbewerbsfähig machen sollen.⁶⁹

Forscher des Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) nutzen die Eigenschaften von Metall-Luft Batterien auf eine andere Weise: das Nachladen kann alternativ zum Stromanschluss durch Tausch des flüssigen Elektrolyten erfolgen. Diese Technologie, „Redox-Flow“ genannt, würde einerseits die Ladedauer erheblich reduzieren, sowie eine interessante Lösung der Reichweitenproblematik bei Elektrofahrzeugen darstellen. Um erneuerbare Energien besser in das Netz integrieren zu können, werden erste Prototypen für den Großeinsatz (einige MW) in der Stromversorgung gerade gebaut. Für den automobilen Einsatz ist die Energiedichte derzeit aber noch zu gering, denn um die Reichweite einer Li-Ionen Batterie zu erreichen, wäre ein 1000l-Tank nötig. Allerdings erscheint eine Anwendung im Straßenverkehr in 5-10 Jahren möglich.⁷⁰

⁶⁹ vgl. Internetquelle 21.

⁷⁰ vgl. Müller (2010), S.92f.

3.2.5 Vergleich der Batterietechnologien

Für reine Elektrofahrzeuge sind aktuell nur Li-Ionen Batterien in der Lage, die gewünschten Anforderungen an Fahrdynamik und Reichweite (Energieinhalt) zu erfüllen. (siehe Tab. 3-3)

Batterietyp	Energiedichte	Spez. Energie	Effizienz	Zyklen	+ / -
PbO₂	30-40 Wh/kg	180 W/kg	70-92%	500-800	+ Bereits lange im Einsatz + 100 km Reichweite + Lebensdauer 3-5 Jahre + Geringe Kosten + Kein Wärme- und Energiemanagement + Erprobtes Recyclingsystem - Sehr schwer
NiMH	60-80 Wh/kg	250 – 1000 W/kg	66%	>1000	+ Empfindlich für Tief-/Überladung + Batteriemanagementsystem notwendig + Preiswert + Bereits im Einsatz (z.B.: Toyota Prius) - Schwerer als Li-Ion
Li-Ion	150-160 Wh/kg	1800 W/kg	99,9%	>2000	+ Geringes Gewicht / Abmessungen + Lange Lebensdauer (> 1J) + Funktioniert auch bei tiefen Temp. + Hohe Zuverlässigkeit
Li-Polymer	130-200 Wh/kg	3000 W/kg	99,8%	>1000	+ Elektrolyt: festflüssiges Polymer-Gel + Völlige Bauform-/Designfreiheit + Hervorragend für Kfz geeignet + Preiswerte Komponenten
ZEBRA	70-110 Wh/kg	150 - 220 W/kg	-	>3000	+ Preis / kommerziell verfügbar - Temperaturempfindlich - Wärmeverluste - Für Massenmarkt eher ungeeignet
Redox Flow	20-35 Wh/kg	-	hoch	-	+ Energiemenge und Leistung unabhängig voneinander + Zyklenfestigkeit & hohe Lebensdauer + Kaum Selbstentladung + Leistungen: 1 kW bis mehrere GW - Noch nicht serienreif
Zink-Luft	3x größer als Li-Ion	Sehr hoch	50%	-	+ O ₂ als Elektrode reduziert Gewicht + Günstige Materialien + Günstige Herstellung + Geringe Selbstentladung - Wenige Zyklen (500 im Labor) - Gegenstand der Forschung (z.B.: Fa. Revolt)

Tabelle 3-3: Kennwert und Eigenschaften verschiedener Batterietechnologien

[vgl. Löser (2011), S. 7ff]

NiMH-Akkumulatoren sind besonders für Hybridfahrzeuge interessant, weil sie kostengünstiger sind, aber dennoch akzeptable Energiedichten aufweisen. Heutige Bleibatterien sind zwar erprobt und günstig, insgesamt aber zu schwer. In früheren Prototypen wurden oftmals ZEBRA-Batterien eingesetzt. Die hohe Betriebstemperatur und Verluste durch Selbstentladung sind jedoch für den Masseneinsatz hinderlich

Für die Zukunft wird Metall-Luft Batterien ein großes Potenzial zugeschrieben, akzeptable Reichweiten für Elektrofahrzeuge zu ermöglichen. Die Energiedichte ist drei Mal höher als bei der Lithium-Ionen Technologie, zudem weisen sie Gewichtsvorteile auf, da Luftsauerstoff als Elektrode dient. Die Forschung konzentriert sich auf den Wirkungsgrad, welcher derzeit (unter Laborbedingungen) nur etwa 50% beträgt.

Bei der Wahl eines geeigneten Batterietyps sind Energie- und Leistungsdichte die zu maximierenden technischen Zielgrößen. Im folgenden Diagramm („Ragone-Diagramm“) werden aktuell am Markt verfügbare Batterietechnologien gemäß beiden Kriterien einander gegenübergestellt:

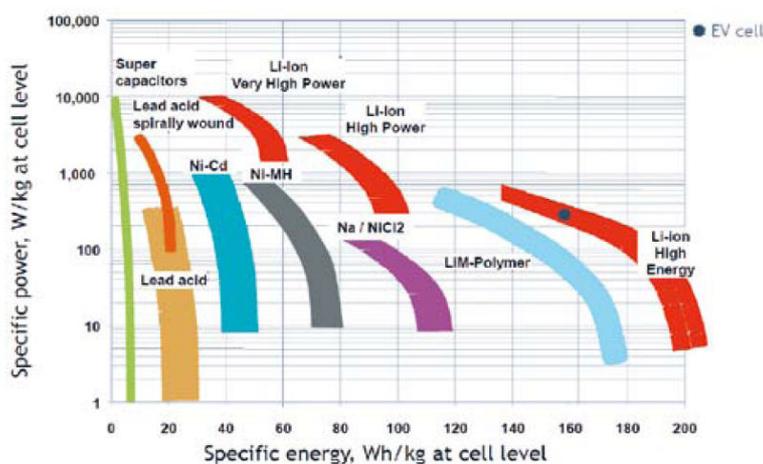


Abbildung 3-7: Ragone-Diagramm für elektrische Energiespeicher

[siehe Saft (2009), (zit. nach: E-Connected (2009), S. 12)]

Es ist gut erkennbar, dass die Li-Ionen/Lithium-Polymer Technologie die größte Bandbreite abdeckt und daher am besten die Anforderungen der Automobilindustrie erfüllt. So werden etwa bei batteriebetriebenen Fahrzeugen hohe Energiedichten benötigt, Hybridkonzepte hingegen verlangen hohe spezifische Leistungen. Andere Batteriekonzepte sind diesbezüglich nicht so flexibel in der Systemauslegung. Sogenannte „Super Capacitors“ (Super Caps) – also extrem leistungsfähige Kondensatoren – weisen prinzipbedingt eine sehr gute spezifische Leistung auf, die Energiedichte ist jedoch gering. Sie sind daher insbesondere für kurzfristige Leistungsunterstützung bei Hybridfahrzeugen geeignet.

3.3 Energiewirtschaft

3.3.1 Strombedarf

Für die Energieversorgungsunternehmen (EVU) ist von Bedeutung, welche Lademengen für das Aufladen der Energiespeicher notwendig sein werden und ob die Übertragungs- und Durchleitungskapazität der Netze dafür ausreichen⁷¹. Zu Beginn der Markteinführung werden mögliche Auswirkungen auf das Netz praktisch nicht spürbar sein, allerdings könnte eine hohe Dichte an Elektrofahrzeugen und Ladevorgängen dazu führen, die bestehende Netzinfrastruktur, bei der zu bereitstellenden Leistung zu überlasten. Die Auswirkungen von Elektromobilität auf das Stromnetz hängen von verschiedenen Faktoren ab:⁷²

- ◆ Penetration des Marktes mit Elektrofahrzeugen
- ◆ Mobilitätsverhalten und dem daraus resultierendem Lade-(leistungs-)bedarf
- ◆ Angebot an Ladeleistung
- ◆ Zunehmender Informations- und Datenaustausch

Der erste Faktor ist derzeit noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Schätzungen gehen hierbei von einigen Prozent – gemessen am gesamten Fahrzeugbestand – aus⁷³. Das Mobilitätsverhalten der Menschen ist hingegen bereits gut erforscht, denn es ist nicht davon auszugehen, dass es sich – zumindest kurz- und mittelfristig – ändern wird. Die Grenzwerte für mögliche Ladeleistungen bestimmen die zu Verfügung stehende Infrastruktur, die verbauten Batterieleistungen, sowie das Ladeverhalten der Kunden. Der Datenaustausch spielt vor allem in einer intelligenten Netzsteuerung eine wichtige Rolle. Solche sog. *Smart Grids* sind aktuell in der Praxis aber noch nicht realisiert. Pilotprojekte dazu laufen z.B.: in Australien, Deutschland, den USA und China. Die wichtigste Frage, die es daher aus heutiger Sicht zu beantworten gilt, ist die nach dem erwarteten Ladeverhalten. In Smole u.a.⁷⁴ wurde untersucht, welche Auswirkungen eine 20% Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen auf die österreichische Energiewirtschaft haben würde. Für die Analyse wurde zuerst ein Lastprofil (Stromverbrauchsverteilung über den Tag) auf Basis von Daten der E-Control⁷⁵ für einen typischen Sommer- und einen typischen Wintertag erstellt:

⁷¹ Smole u.a. (2009), S. 9.

⁷² E-Connected (2009), S. 29.

⁷³ E-Connected (2009), S. 30.

⁷⁴ PKW (200km Reichweite / 30kWh Batteriekapazität), Leichte Nutzfahrzeuge (250km / 50kWh) & Einspurige Fahrzeuge (80km / 4kWh).

⁷⁵ Regulierungsbehörde der leitungsgebundenen Energien Elektrizität und Erdgas in Österreich.

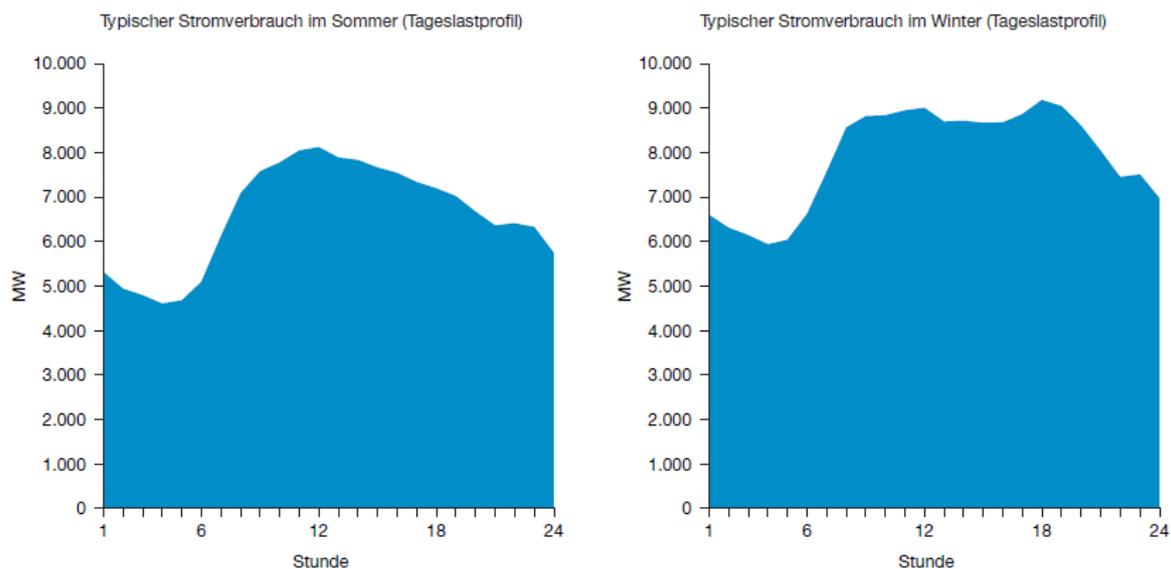


Abbildung 3-8: Typischer Tagesverlauf des Stromverbrauchs (Lastprofil) für Sommer und Winter
 [siehe Smole u.a. (2009), S. 10]

An einem durchschnittlichen Sommertag wird in der Nacht relativ wenig Strom verbraucht. Zu Mittag wird ein Maximum erreicht, bis am Abend sinkt der Verbrauch stetig. Im Winter hingegen wird allgemein mehr Strom benötigt, der Tagesverlauf wird durch zwei Lastspitzen zu Mittag und am Abend gekennzeichnet und nimmt auch am Nachmittag nicht wirklich ab.

In einem zweiten Schritt wurde die Gesamtladekurve für einen Tag ermittelt (siehe Abb. 3-9).

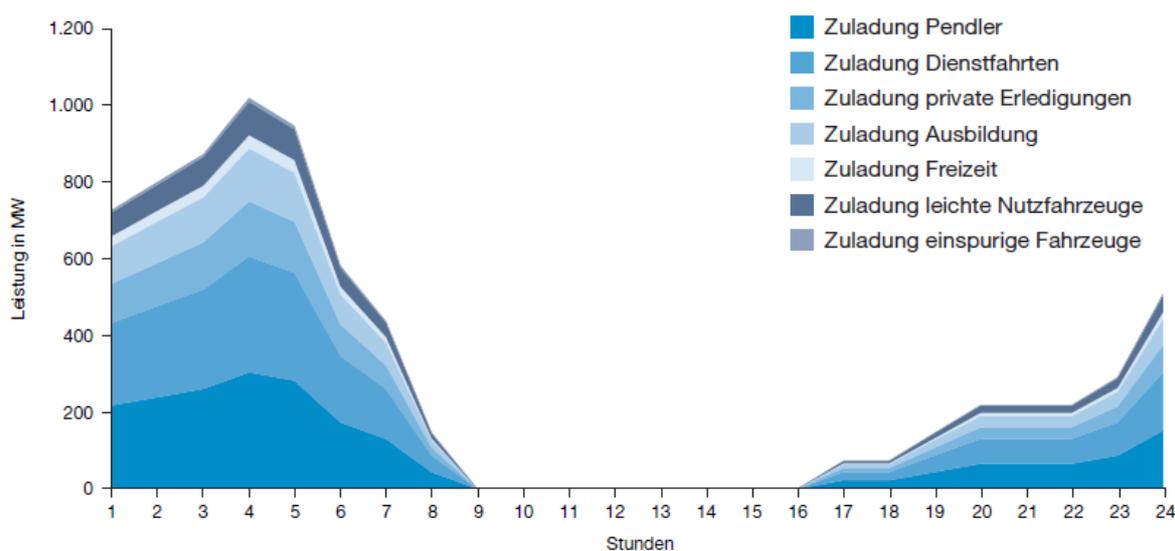


Abbildung 3-9: Gesamtladekurven für einen Tag (24h-Verlauf) bei 20% Elektrofahrzeugen
 [Smole u.a. (2009), S. 11]

Dabei wurden einige vereinfachende Annahmen getroffen:

- ◆ Vollständige Entladung der Akkumulatoren
- ◆ Durchschnittliche Ladezeit ca. 7h (Normalladung)
- ◆ Beladen vorwiegend in der Nacht, Ladung untertags nur bei vollständiger Entladung

Das Lastprofil und die Gesamtladekurve werden schließlich addiert, um einen Gesamtstromverbrauch zu ermitteln. Wie man gut erkennen kann, werden weder an einem durchschnittlichem Sommer- noch an einem typischen Wintertag die bisherigen Lastspitzen übertroffen. Ein weiterer positiver Effekt aus Sicht des EVU ist die „Glättung“ der Lastkurve.

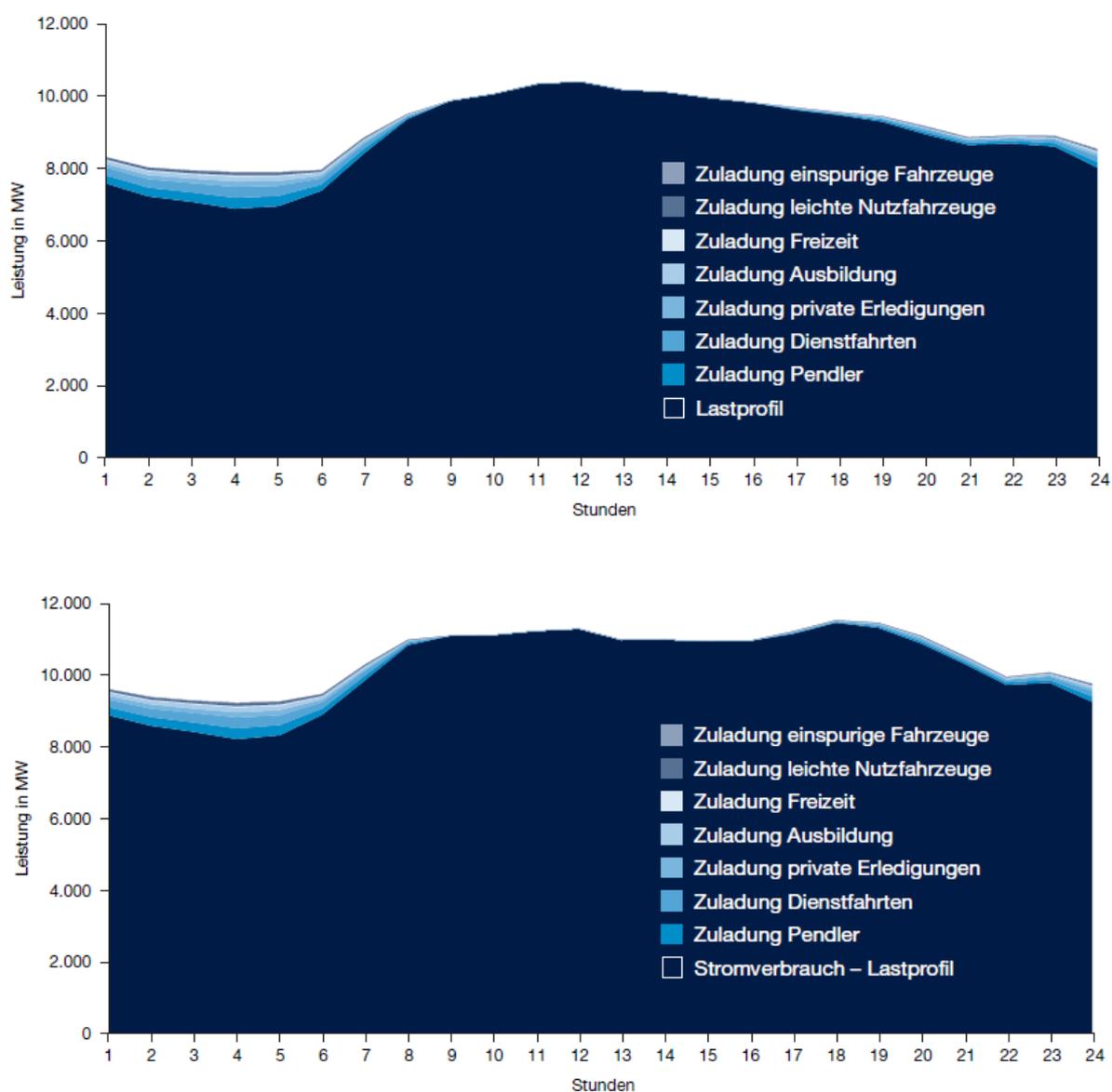


Abbildung 3-10: Gesamtstromverbrauchsprofil inkl. Ladeenergien für einen typischen Sommer- (oben) und einen typischen Wintertag (unten) (20% Elektrofahrzeuge, 2% Stromverbrauchssteigerung)

[siehe Smole u.a. (2009), S. 12]

Der gesamte Stromverbrauch steigt pro 100.000 zugelassener Elektrofahrzeuge um etwa 0,3%⁷⁶. Für die EVU sind daher keine besonderen Maßnahmen erforderlich. Um die Versorgungsqualität in Zukunft sicherstellen zu können, gibt es aus Sicht der Netzbetreiber in diesem Zusammenhang jedoch noch Bedarf für weiterführende Untersuchungen. Einen möglichen Aspekt stellen dabei die Zahl bzw. Häufigkeit von Schnellladungen dar, welche aufgrund der hohen erforderlichen Leistung kritisch für die Netzstabilität sind.⁷⁷

3.3.2 Erneuerbare Energien und Elektromobilität

Folgende erneuerbare Energieträger stehen für die Stromproduktion zu Verfügung:⁷⁸

- ◆ Solarenergie (Photovoltaik (PV), Solarwärmekraftwerk (CSP))
- ◆ Windkraft (On-/Off-Shore)
- ◆ Bioenergie (Biogas, Biomasse)
- ◆ Wasserkraft
- ◆ Geothermie

Bereits der heutige globale Strombedarf (und dessen prognostizierte Zunahme) könnten durch erneuerbare Energieträger potentiell gedeckt werden (siehe Abb. 3-11).

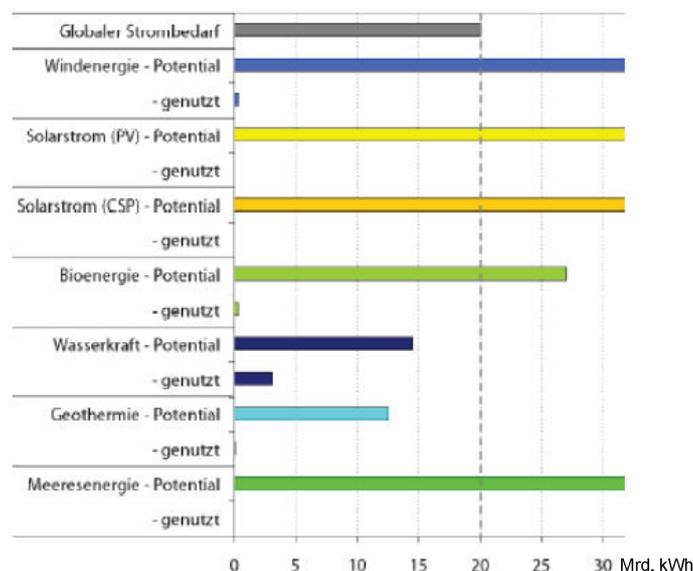


Abbildung 3-11: Technisches Potenzial erneuerbarer Energien weltweit nach Substitutionsmethode
[siehe Schmid (2010), S.9]

⁷⁶ vgl. E-Connected (2009); Smole u.a. (2009).

⁷⁷ vgl. E-Connected (2009), S. 31.

⁷⁸ vgl. Geitmann (2010); Wagner (2009).

Sonne und Wind wären dafür jeweils mehr als ausreichend, allerdings fluktuieren beide Energiequellen stark und stehen geografisch gesehen nicht überall im jeweils erforderlichen Ausmaß zu Verfügung. Vorhandene Potenziale werden heute jedoch noch unzureichend ausgeschöpft, demnach sollte der Ausbau von erneuerbaren Energien global stärker vorangetrieben werden.

Langfristig muss deren Einsatz aber auch wirtschaftlich vertretbar sein. Um alternativen Energietechniken den Markteintritt zu erleichtern, wurden in der Vergangenheit entsprechende politische Rahmenbedingungen geschaffen, die konkurrenzfähige Einspeisentarife gewährleisten. Untersuchungen zeigen aber, dass die Rentabilität keine grundsätzliche, sondern vielmehr eine zeitliche Frage ist. So hatte etwa die Windenergie in den letzten Jahren Zuwachsraten von 30-40% p.A., wobei gleichzeitig eine Kostenreduktion um 10% je Verdopplung der installierten Leistung beobachtet werden konnte. Abb. 3-12 zeigt das Kostensenkungspotenzial für Strom aus erneuerbaren Energien:

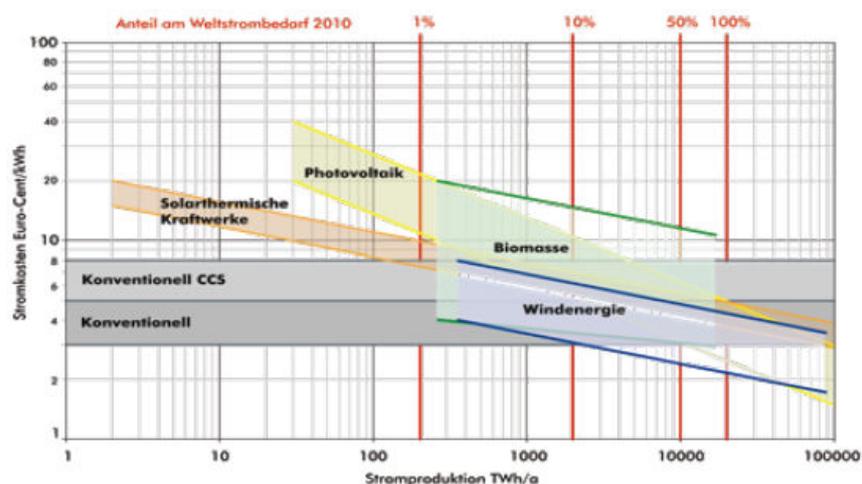


Abbildung 3-12: Entwicklungspotenzial der Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien
[siehe Schmid (2010), S.10]

Durch die natürliche Schwankung bei der Einspeisung alternativer Energiequellen muss die zukünftige Versorgung auf mehrere Säulen bauen. Kurz- und mittelfristig ist die Abdeckung der Lastspitzen und Bereitstellung der Regelenergie mit der heutigen Energietechnik notwendig. Langfristig sind z.B. die in Biomasse gespeicherte Energie, Maßnahmen beim Verbrauchsmanagement (Demand Side Management) und Erzeugungsmanagement (Kombikraftwerke), geeignete Einbindung großer Pumpspeicher für den mittel- bis langfristigen Ausgleich, sowie neue Speicheransätze für die kurzzeitige Netzunterstützung (z.B.: Batteriekapazität von E-Fahrzeugen oder Speicherung erneuerbaren Stroms im Erdgasnetz) zu nennen.⁷⁹

⁷⁹ vgl. Schmid (2009), S. 10ff.

Erneuerbare Energien und Elektromobilität stehen in direkter Wechselbeziehung zueinander. Während Elektrofahrzeuge bei Verwendung des durchschnittlichen Strommixes bei einer Well-to-Wheel-Betrachtung nur geringe CO₂-Emissionsvorteile gegenüber konventionellen Antrieben aufweisen, werden sie durch erneuerbare Energien faktisch zu Nullemissionsfahrzeugen (siehe Abb. 3-13).

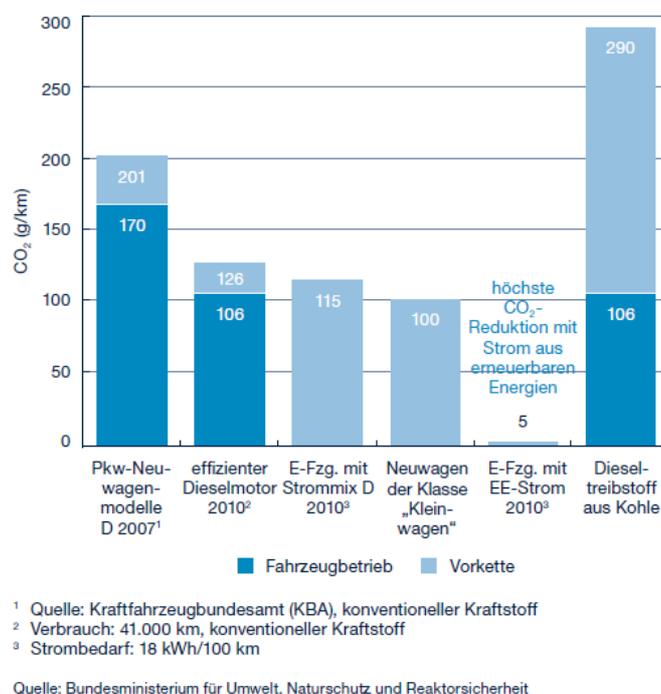


Abbildung 3-13: Übersicht CO₂-Emissionen [siehe Kuhnert u.a. (2010), S.46]

Die deutsche Bundesregierung hat im *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* folgende Maßnahmen definiert, um die Kopplung erneuerbarer Energien mit Elektromobilität voranzutreiben:

„Anzustreben ist eine Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen bei Maßnahmen zur Systemintegration von Strom aus erneuerbaren Energien im Rahmen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) (Verordnungsermächtigung nach § 64 Abs. 1 Punkt 6 zur Integration des Stroms aus erneuerbaren Energien).

Bei der 2013 anstehenden Überprüfung der spezifischen Emissionsziele der CO₂-PKW-Verordnung (Artikel 13 Abs. 5) ist im Rahmen der nachfolgenden Verhandlungen anzustreben, dass Elektrofahrzeuge bei der Verwendung von erneuerbarer Energie mehrfach auf den Flottengrenzwert angerechnet werden. Damit soll auch sichergestellt werden, dass die Ziele der CO₂-PKW-Verordnung noch kosteneffizienter erreicht werden können.

*Es sollte gewährleistet werden, dass der von Elektrofahrzeugen in Deutschland genutzte Strom aus erneuerbaren Energien auf das in der EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien vorgegebene nationale Ziel im Verkehrssektor in vollem Umfang angerechnet wird.*⁸⁰

Diese Maßnahmen sind auch positiv hinsichtlich des Images von Elektrofahrzeugen in der öffentlichen Wahrnehmung zu bewerten und betonen deren umweltfreundlichen Aspekt.

3.3.3 Vehicle-to-Grid Konzept

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien unterliegt einer natürlichen Volatilität, infolge der nicht immer und überall konstant verfügbaren Quellen (Bspe.):

- ♦ Sonnenkraft kann nur untertags genutzt werden,
- ♦ Wind bläst in unterschiedlicher Intensität bzw. nicht ausreichend, und
- ♦ Wasserkraft variiert mit periodisch wechselnden Pegelständen (Meer, Fluss).

Damit steigen die Anforderungen an ein effektives Netzmanagement, das die Versorgung der Kunden sicherstellt. Das Konzept dazu wird *Smart Grid* (Intelligentes Netz) genannt, und soll die Integration dezentraler Stromerzeuger in das bestehende Stromnetz durch intelligente Anpassung von Bedarf und Nachfrage ermöglichen. Elektromobilität spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Batteriespeicher der Fahrzeuge könnten während dem Ladevorgang den Stromüberschuss zwischenspeichern, und bei Bedarf wieder in das Netz einspeisen. Voraussetzung dafür ist, dass die Speichertechnologie dies auch ermöglicht, vor allem betreffend Zyklenlebensdauer und Ladeleistung. Die Möglichkeit der Rückeinspeisung von Strom in das Netz durch Elektrofahrzeuge wird *Vehicle-to-Grid* (V2G) genannt und setzt voraus, dass die Ströme bidirektional fließen können⁸¹. Abb. 3-14 zeigt eine schematische Darstellung dieses Konzepts:

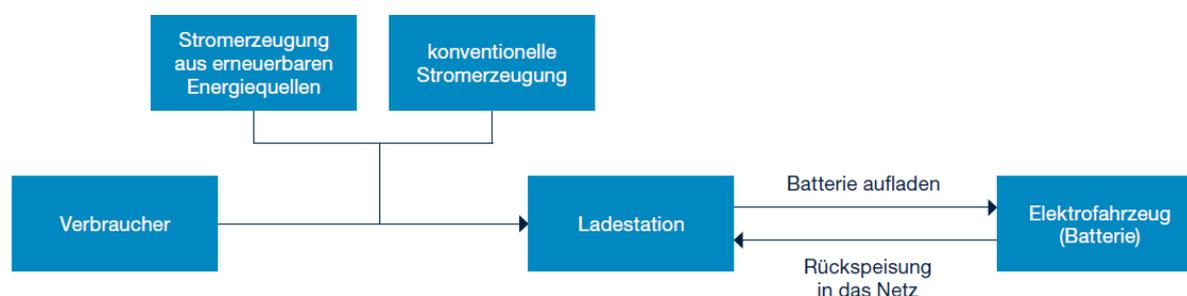


Abbildung 3-14: Vehicle-to-Grid Konzept [siehe Kuhnert u.a. (2010), S.48]

⁸⁰ Bundesregierung (2009), S. 37f.

⁸¹ vgl. Fournier u.a. (2009), S. 696f.

Das Potenzial intelligenter Netze verdeutlicht eine kurze Übersichtsrechnung: werden 200.000 Elektrofahrzeuge gleichzeitig geladen, entspricht dies einer Gesamtanschlussleistung von ca. 1 GW (bei einer angenommenen Anschlussleistung der E-Fzge. von 5 kW). Damit wäre ein Pufferspeicher in der Größenordnung eines Atomkraftwerkes für die Netzsteuerung verfügbar und eine dynamische Anpassung von Bedarf (Verbraucher) und Angebot (Wind, Wasser, etc.) besser möglich.⁸²

Die Einbindung von Elektrofahrzeugen erhöht also die Freiheitsgrade im Stromnetz. Dies kann auch für den Endkunden von wirtschaftlichem Nutzen sein: während längeren Stehzeiten würde sein Fahrzeug bei günstigen Strompreisen (z.B.: in der Nacht) geladen und bei hohen Strompreisen die Batteriekapazität dem Strommarkt zu Verfügung stellen⁸³. Solche Arbitragegeschäfte würden damit einen Deckungsbeitrag für die hohen Anschaffungskosten der Energiespeicher leisten können⁸⁴.

„Ausgehend von einem durchschnittlichen Fahrverhalten zeigen die Berechnungen, dass 82% der Batterieleistungen nicht benötigt wird (Fahrzeuge stehen) und somit wieder in das Stromnetz eingespeist werden können. Weitere 7% der Batteriekapazitäten stehen zeitweise über den Tag zur Verfügung und könnten zusätzlich in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Rund 11% der Batteriekapazität werden täglich für die Fahrten sowie Wiederbeladung benötigt.“⁸⁵

Es muss aber festgestellt werden, dass intelligente Netze in dieser Form derzeit in der Praxis noch nicht verbreitet sind und daher auch Konzepte wie V2G bei Markteinführung von Elektrofahrzeugen keine Rolle spielen werden. Auch mittelfristig kann damit noch nicht flächendeckend gerechnet werden (siehe Tab. 3-4).

	2010-2015	2015-2020	über 2020 hinaus
	Zeitskala mit dem Wachstum der Durchdringung an Elektrofahrzeugen einhergehend		
Abrechnungsmodus	überwiegend Pauschallösungen	Pauschallösungen sowie vermehrt energie- und leistungsbezogene Lösungen	überwiegend energie- und leistungsbezogen
Normalladung (< 10 kW) *	ungesteuert	teils ungesteuert, teils gesteuert	vorwiegend gesteuert
Schnellladung (> 10 kW bis 45 kW)	kaum möglich	eingeschränkt möglich und nur an strategischen Punkten notwendig	von Entwicklungen abhängig
Bidirektionaler Betrieb (V2G)	nicht möglich	kaum möglich	mit Normalladung unter Einsatz „Smart Grids-Lösungen“ vorstellbar

* Normalladung aus Sicht der Netzbetreiber bis 10 kW (3-phasig mit Absicherung 16 A)

Tabelle 3-4: Zeitliche Entwicklung einzelner Bereiche [siehe E-Connected (2009), S.35]

⁸² vgl. Folz (2010), S. 32.

⁸³ Mit einer bestimmten, frei wählbaren, Minimalkapazität.

⁸⁴ vgl. Kruhl (2009), S. 17ff.

⁸⁵ Smole u.a. (2009), S. 18.

3.4 Markt

Die Machbarkeit elektrischer Antriebssysteme ist bereits seit Beginn der automobilen Geschichte bewiesen. Jedoch bestimmen auch nicht-technische Faktoren, ob eine Antriebsform erfolgreich ist, oder nicht. Im Rahmen der Elektromobilität müssen die heute immer noch bestehenden Nachteile geringer Reichweiten und erhöhter Anschaffungskosten durch innovative Mobilitätskonzepte kompensiert werden. Für die Massentauglichkeit von Elektrofahrzeugen sind branchenübergreifend Lösungen zu entwickeln und dem Kunden im Rahmen neuer Kooperationen in gebündelter Form anzubieten. Folgendes Kapitel widmet sich der Frage, wie solche Konzepte aussehen könnten, welche Geschäftsmodelle dahinterstehen und welche Branchen bzw. Unternehmen daran beteiligt sein könnten.

3.4.1 Neue Mobilitätskonzepte

Es ist zu beobachten, dass der Besitz eines Automobils für jüngere Menschen heute weitaus weniger wichtig ist, als früher. Die geringere Bereitschaft ein Auto zu kaufen ist jedoch nicht mit einem geringeren Mobilitätsbedürfnis verbunden. Im Gegenteil, selten waren Menschen so mobil wie heute. Es werden dafür vielfältigere Verkehrsangebote genutzt, darunter auch neue Konzepte, wie z.B.: Car-Sharing oder der ad-hoc Radverleih (*Citybike*⁸⁶). Viele Automobilhersteller haben dies bereits erkannt und denken daher über ganzheitliche Mobilitätsdienste nach, die den reinen Verkauf von Fahrzeugen übersteigen. Ein gutes Beispiel dafür ist das von *Daimler* initiierte Projekt *Car2Go*, welches derzeit in Ulm, Hamburg und Austin (Texas) getestet wird.

Der Reichweitenproblematik von Elektrofahrzeugen muss in irgendeiner Form bei Markteinführung begegnet werden. Dies ist beispielsweise durch IT-gestützte Wegeplanung mit Anzeige der nächsten Ladestation (evtl. mit Reservierungsmöglichkeit) oder ein erweitertes Mobilitätsangebot, welches andere Transportmittel für längere Strecken (z.B.: Bahn, Ersatzwagen mit konventionellem Antrieb, etc.) umfasst, denkbar. Batteriewechselstationen oder Schnellladestationen werden, wenn überhaupt, erst mittelfristig ausreichend verfügbar sein.

Ein weiteres Problem sind die hohen Anschaffungskosten, bedingt durch die teuren Batterien. Dem gegenüber stehen niedrige Betriebskosten, weil der benötigte Strom günstig ist, und auch die Wartungskosten weit unter denen konventioneller Fahrzeuge liegen. Diese Kostenstruktur spricht für eine möglichst kollektive Nutzung eines Elektrofahrzeugs, etwa als Mietwagen oder bei Car-Sharing Verbänden. Dem Car-Sharing Markt wird daher ein entsprechendes Wachstum in den nächsten Jahren vorhergesagt.⁸⁷

⁸⁶ vgl. Internetquelle 22.

⁸⁷ vgl. Weidlich (2010), S. 135f.

Auf der anderen Seite ist es aber auch denkbar, dass sich das Mobilitätsverhalten dem angebotenen Produkt anpasst. Diese These vertritt das Beratungsunternehmen *Bain & Co.* Der Kauf eines Elektroautos ist aus ihrer Sicht mehr als nur der Wechsel der Antriebsform bzw. des Treibstoffs. Er bedeutet einen Systemwechsel, bei dem scheinbar wichtige Produktattribute durch andere ersetzt werden. Geringe Schadstoff- und Lärmemissionen, „ruckfreies“ Fahren und hohe Fahrdynamik (vor allem im städtischen Verkehr) rücken in den Vordergrund, Reichweite und Leistung werden als nicht mehr so wichtig wahrgenommen. Bain & Co. sieht hierbei Parallelen zu *Apples Iphone*, welches durch die völlig neue Bedienoberfläche einen Wandel in der Telekommunikationsbranche bewirkt hat⁸⁸. Ergebnisse aus Kundenbefragungen bei den durchgeführten Feldversuchen scheinen diese Theorie zu stützen.⁸⁹

3.4.2 Neue Geschäftsmodelle

Aus neuen Mobilitätskonzepten ergeben sich auch innovative Geschäftsmöglichkeiten für neue Serviceanbieter. Unternehmen, die integrierte Komplettlösungen für den Kunden anbieten (öffentlicher Nah- und Fernverkehr, Autovermietung, Verkauf von Fahrzeugen) werden in den Markt eintreten und somit spezifisches Know-how aufbauen können. Gleichzeitig wird es Unternehmen geben, die sich auf bestimmte Produkte, z.B.: Ladeinfrastruktur, spezialisieren⁹⁰. Im Rahmen einer Expertenbefragung wurden verschiedene Geschäftsmodelle hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet und anschließend gereiht (siehe Tab. 3-5):

Rang	Geschäftsmodell	Mittelwert ⁹¹
1	Abrechnung über Festvertrag	2,82
2	Integriertes Angebot Elektroauto und Ökostromvertrag	2,75
3	Leasing von Elektroautos	2,67
4	Kombinierte Abrechnung von parken und laden	2,58
4	Mobility on Demand nach gefahrenen Kilometern (Car2Go)	2,58
6	Infrastruktur wird von Stromlieferanten betrieben	2,55
7	Kauf und Verkauf von Strom über das V2G Konzept	2,5
7	Applikation Ortung favorisierter/freier Ladestationen	2,5
9	Multimodale Mobilitätsdienste	2,42
9	Leasing von Batterien um Anschaffungskosten zu senken	2,42

⁸⁸ vgl. Matthies u.a. (2009), S. 7f.

⁸⁹ vgl. Kuhnert u.a. (2010), S. 65.

⁹⁰ vgl. Weidlich (2010), S. 136.

⁹¹ 3 = „Sehr Hoch“ 1 = „Niedrig“

11	Schnellladung	2,42
12	Infrastruktur wird von neuen Akteuren betrieben	2,36
13	Clearinghouse	2,33
14	Verkauf von Smart Home Systemen	2
14	Applikation Anzeige von Energieverbrauchsparametern	2
14	Service Provider	2
14	Aggregator	2
14	Fahrzeugservices	2
14	Drahtlose Ladung	2
20	Ganzheitliches Angebot: Strom und Elektroauto	1,92
21	Infrastructure Provider	1,82
21	Ad-Hoc Abrechnung	1,82
22	Abrechnung über Prepaid Konzept	1,55
23	Integriertes Leasing von Batterien und Batteriewechsel	1,08

Tabelle 3-5: Geschäftsmodelle und deren Bewertung [siehe Weidlich (2010), S. 137f]

Aus der Bewertung und den Kommentaren der Experten konnten weitere Schlüsse in Bezug auf tragfähige Geschäftsmodelle gezogen werden⁹²:

- ◆ V2G-Dienste werden in der Realisierung als schwierig eingeschätzt, da EVU's und Automobilhersteller bisher nicht zusammengearbeitet haben und die Preisbildung in Echtzeit, sowie der Austausch der Messdaten derzeit schwierig sind. (vgl. Kap. 3.3.3)
- ◆ Das kombinierte Angebot von Parken und Laden wird als mögliches Geschäft für Restaurants, Einzelhandel, etc. gesehen. Es ist davon auszugehen, dass das Angebot zu einem Fixpreis bzw. kostenlos sein wird, da eine Einzelerfassung nicht rentabel ist. RWE macht sich dieses Modell zunutze und bietet seine Ladesäule inklusive Wartung und Ökostromvertrag zum Verkauf an.⁹³
- ◆ Es wird davon ausgegangen, dass die hohen Kosten für die Errichtung einer ausreichenden Infrastruktur nicht durch den Stromabsatz alleine rentabel sein werden. Die Infrastruktur muss daher entweder anders genutzt werden (z.B.: Werbefläche) oder vom Staat subventioniert werden.
- ◆ Es werden positive Effekte von einer Verknüpfung von Hausautomatisierungssystemen und intelligentem Lademanagement erwartet. (*Smart Homes*)

⁹² vgl. Weidlich (2010), S. 138f.

⁹³ vgl. Internetquelle 23.

- ◆ Der Aufbau einer Infrastruktur wird mehrere Akteure umfassen, wobei Kunden auch das Angebot von anderen Anbietern, als dem eigenen Vertragspartner, mitnutzen werden. Dies bringt neue Herausforderungen, insbesondere bei der gegenseitigen Verrechnung in Anspruch genommener Leistungen, („Roaming“) mit sich. Es wird sich daher mittelfristig ein Clearinghouse etablieren, das als Datenplattform für die verschiedenen Akteure dient. Allerdings ist noch offen, wer ein solches betreiben soll.

Die Geschäftsmodelle müssen jedenfalls die Hürde der Anschaffungskosten beseitigen und flexible Mobilität aus einer Hand anbieten. Ziel ist die *Total Cost of Ownership* (TCO) – also die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer – auf ein Niveau zu bringen, das mit einem konventionellen Fahrzeug vergleichbar ist oder darunter liegt.⁹⁴

Hierzu ein beispielhafter Vergleich aus dem Kleinwagensegment zwischen einem *VW Polo 1.4* und einem gleichwertigen Elektrofahrzeug (EV). Für beide wurde eine Nutzungsdauer von 7 Jahren bzw. 100.000 km angenommen – die Batterien des EV müssen in dieser Zeit nicht gewechselt werden. Der Restwert beider Fahrzeuge wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

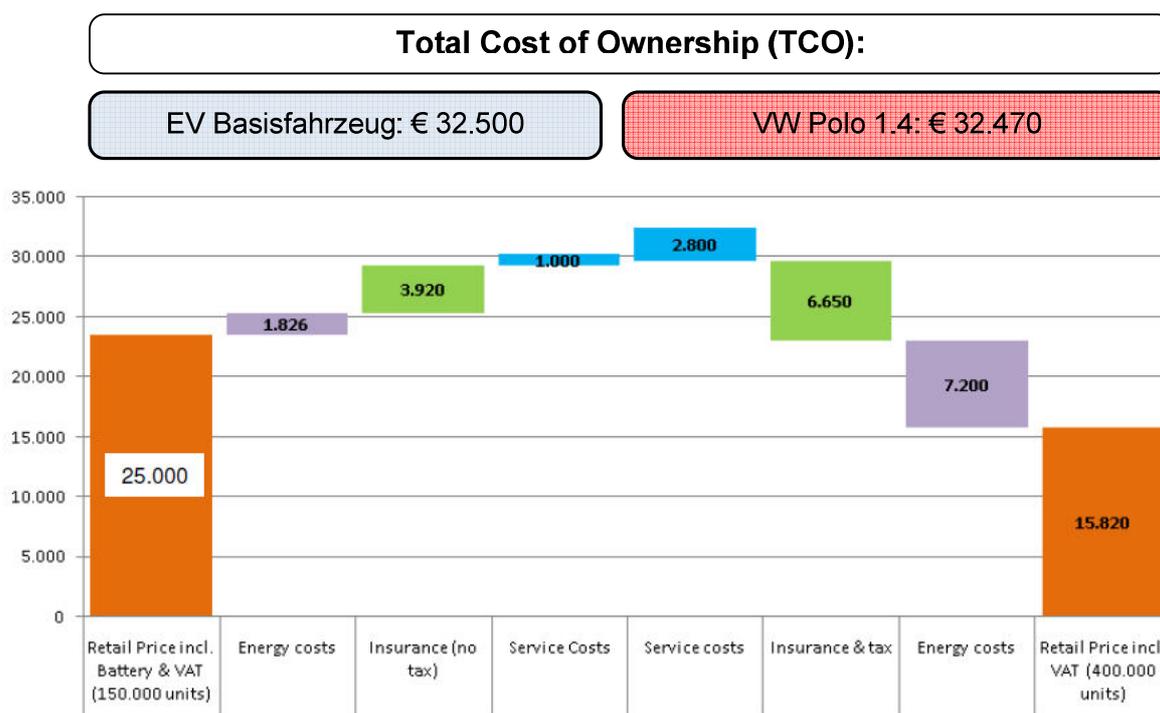


Abbildung 3-15: TCO Vergleich Basis EV und VW Polo 1.4

[siehe Nigl (2010), S. 5, eigene Bearbeitung]

⁹⁴ vgl. Kuhnert u.a. (2010), S. 67.

Der Neupreis des VW beträgt 15.820 € (inkl. 19% MwSt.⁹⁵), hinzu kommen ca. 7000 € für Treibstoff, 6.650 € für Versicherung und Steuern und 2.800 € für Reparaturen⁹⁶. Insgesamt betragen die Kosten daher rund 32.500 €. Sollen die TCO des Elektrofahrzeugs etwa gleich sein, dürfte dieses neu ca. 25.000 € (inkl. 19% MwSt.) kosten, weil der Aufwand für Strom, Versicherung und Reparaturen deutlich geringer ist⁹⁷, als beim VW mit konventionellem Antrieb⁹⁸. Für den Endkunden bleibt jedoch eine Preisdifferenz in der Anschaffung von knapp 10.000 €, die er wahrscheinlich nicht bereit ist, zu zahlen. Würde man diese jedoch auf die gesamte Nutzungsdauer aufteilen, wäre damit die Hürde der hohen Anschaffungskosten beseitigt und ein – zumindest preislich – konkurrenzfähiges Angebot möglich.

3.4.3 Neue Kooperationen

In einem sich gerade erst entwickelndem Markt sind viele Energieversorgungsunternehmen strategische Partnerschaften mit Automobilherstellern eingegangen. Diese dienen dazu, Erfahrungen mit der neuen Technologie zu sammeln, Kundenverhalten zu beobachten, technische Standards zu entwickeln und zu etablieren, sowie gemeinsames Lobbying zu betreiben. Dazu wurden zahlreiche Feld- und Flottenversuche gestartet, die auch von staatlicher Seite finanziell unterstützt werden. Ob diese Partnerschaften langfristig bestehen werden, bleibt vorerst noch abzuwarten. Neben der Zusammenarbeit mit den Herstellern, sind allerdings noch weitere Kooperationen mit anderen Branchen nötig, um langfristig Erfolg bei Elektromobilität zu haben.⁹⁹

Mineralölkonzerne – sie verfügen über ein flächendeckendes Tankstellennetz mit Zusatzangeboten, wie Shops und Imbissen, welche vor allem für Schnelllade- bzw. Batteriewechselstationen attraktiv sind, und deren Errichtung erheblich beschleunigen und vereinfachen. Die Marktkonzentration ist jedoch sehr hoch, sodass die Zahl infrage kommender Partner recht gering ist.

Parkhaus-/Parkplatzbetreiber – sie verfügen über ein Netz an gut gelegenen Stellplätzen, die sich für Ladestationen hervorragend eignen. So verfügen Parkgaragen schon von Haus aus über gute Stromanschlüsse und Kunden stellen für gewöhnlich ihr Fahrzeug für eine längere Dauer dort ab. Auch hier gibt es allerdings nur wenige Akteure am Markt.

Einzelhandel – Supermarkt- und Discounterketten verfügen über entsprechend große Filialnetze und große Parkflächen. Durch Errichtung von Ladesäulen können diese

⁹⁵ Preis ohne länderspezifische Umweltsteuern, wie z.B.: die Normverbrauchsabgabe (NoVA).

⁹⁶ Benzinpreis (fix): 1,2 €/l ; Verbrauch: 6,0 l/100km; Versicherung & Steuer laut Auto Test 08/2008.

⁹⁷ Strompreis (fix): 0,128 €/kWh (80% Nacht-, 20% Tagtarif); Verbrauch: 13,8 kWh/100km.

⁹⁸ vgl. Nigl (2010), S. 5.

⁹⁹ vgl. Dringenberg u.a. (2009), S. 2ff.

wiederum den Mehrwert für ihre Kunden erhöhen bzw. gezielt gewisse Kundengruppen (z.B.: Käufer von Bio-Produkten) ansprechen.

Mobilitätsanbieter – Autovermietungen oder Eisenbahngesellschaften werden mittelfristig eine wichtige Rolle bei Elektromobilität spielen. Sie werden als Anbieter von Services wie Pay-per-Use oder multimodalen Mobilitätsservices auftreten. Es lohnt sich daher schon frühzeitig, strategische Partnerschaften einzugehen, da auch hier die Marktkonzentration sehr hoch ist.

Weitere Partner – Außerdem könnten regionale Energieunternehmen, die sich den Einstieg in Elektromobilität nicht alleine leisten können, sowie Hersteller von Ladeinfrastruktur, IT-Dienstleister für IKT-Lösungen und Telematic-Unternehmen (Navigationshersteller, Kartenanbieter, etc.) mögliche Partner in der Zukunft sein.

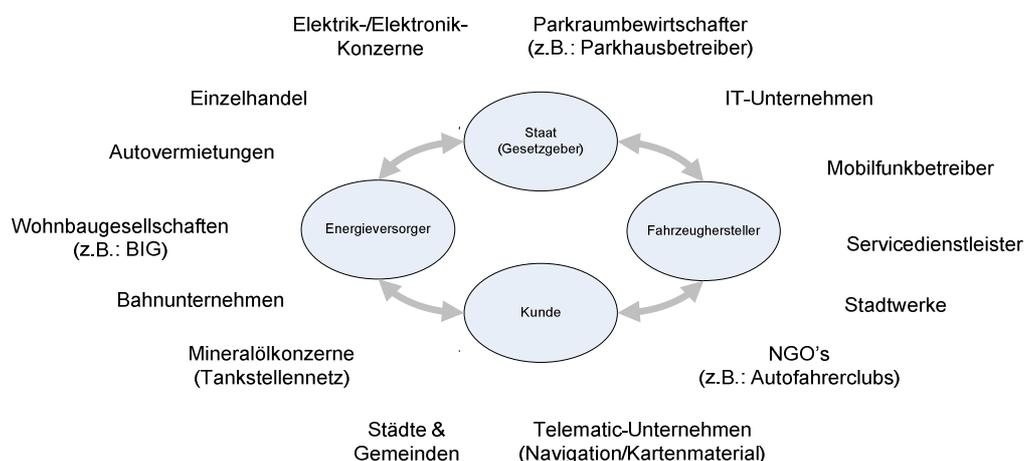


Abbildung 3-16: Interessensgruppen bei Elektromobilität (Bsp.)

Doch auch Automobilhersteller müssen neue Kooperationen suchen, vor allem für die benötigten Schlüsseltechnologien des Elektroantriebs, wie Batteriezellen oder Leistungselektronik. Zur Sicherung der strategischen Zulieferbasis werden sie sich daher an entsprechenden Komponentenlieferanten beteiligen müssen. Hinzu kommen vertikale und horizontale Partnerschaften mit bisherigen Zulieferern, Hochschulen und Forschungsinstitutionen, um den hohen F&E-Aufwand nicht alleine bewerkstelligen zu müssen. Daraus wird ein enges Kompetenznetzwerk entstehen, das somit einen langfristigen Wettbewerbsvorteil gegenüber der (internationalen) Konkurrenz bietet. Zudem können durch erweiterte oder neue Geschäftsmodelle Chancen besser genutzt werden, um zusätzliche Wertschöpfung zu erzielen. Einen weiteren Aspekt stellen in diesem Zusammenhang Fusionen bzw. Unternehmenskäufe (Mergers & Acquisitions) dar, um Know-how, z.B.: in der Produktionstechnik zu erlangen.¹⁰⁰

¹⁰⁰ vgl. o.V.: Management Summary: Oliver Wyman-Studie „Elektromobilität 2025“ – Powerplay beim Elektrofahrzeug (2009), S. 4.

4 Bewertungsmethodik

In diesem Kapitel soll erläutert werden, wie die ausgesuchten Ladekonzepte analysiert und in weiterer Folge miteinander verglichen werden.

Zuerst werden Anforderungen an eine funktionierende, flächendeckende Infrastruktur definiert. Diese orientieren sich an der aktuellen Form der fossilen Kraftstoffbereitstellung und werden durch neue Aspekte (z.B.: die Eignung für die Netzintegration von Strom aus erneuerbaren Energieträgern), die sich aus den speziellen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen ergeben, ergänzt. Es erfolgt zunächst eine getrennte Beschreibung technischer und organisatorisch-ökonomischer Anforderungen. Im Rahmen einer Nutzwertanalyse werden diese anschließend zusammengeführt, um die verschiedenen Dimensionen bestmöglich zu erfassen und zu bewerten.

Der Aufbau und die Wirtschaftlichkeit einer Ladeinfrastruktur sind stark von der Marktdurchdringung elektrisch betriebener Fahrzeuge abhängig. Die Bereitschaft der Kunden sich ein Elektroauto anzuschaffen, wird jedoch ohne entsprechende Ladestellen eher gering sein¹⁰¹. Aufgrund dieser Problematik müssen verschiedene Marktszenarien von Elektro- und Hybridfahrzeugen in die Bewertung Eingang finden. Dabei wurde zwischen szenarioabhängigen und szenariounabhängigen Faktoren unterschieden, um die Komplexität der Bewertung zu reduzieren.

Einen Sonderfall der Elektromobilität stellen Brennstoffzellenfahrzeuge dar. Der Unterschied zu reinen Elektro- und Hybridfahrzeugen liegt dabei lediglich in der Form der Energiespeicherung. Anstatt elektrochemische Speicher zu verwenden, wird in der Brennstoffzelle aus Wasserstoff – oder geeigneten Vorprodukten – Strom erzeugt, der das Fahrzeug antreibt. Der Energieträger Wasserstoff ist zudem ebenso auf den Ausbau erneuerbarer Energien angewiesen, um ökologisch sinnvoll zu sein. Die Errichtung einer geeigneten Infrastruktur ist daher eine mögliche Alternative zu strombasierter Elektromobilität und wird somit in diesem Konzeptvergleich berücksichtigt. Da die Markteinführung von FCEV-Serienfahrzeugen kurz- bis mittelfristig nicht zu erwarten ist, erfolgt an Stelle einer Bewertung, die Beschreibung eines möglichen Übergangsszenarios zur Wasserstoffwirtschaft im Straßenverkehr.

4.1 Technologische Anforderungen

Die technologischen Anforderungen umfassen all jene Aspekte, die sich mit dem Design, den technischen Parametern, sowie der physikalischen Schnittstelle zwischen Ladestelle und Fahrzeug beschäftigen, diese sind:

¹⁰¹ Auto Bild (2006) (zit. nach: Pfaffenbichler u.a. (2009), S. 80).

- ♦ **Ergonomie** – Wie ist der Bedienungskomfort beim Ladevorgang und stellt dieser möglicherweise ein Hindernis für die Kundenakzeptanz dar? Für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen ist das ein wesentliches Kriterium.
- ♦ **Normung & Standardisierung** – Sind Normen für das Ladekonzept absehbar oder gibt es sie bereits? Ist diese Anforderung erfüllt, haben potenzielle Investoren eine höhere Planungssicherheit.
- ♦ **Sicherheit** – Welche potenziellen Risiken birgt das Konzept für Mensch und Umwelt? Für den massentauglichen Einsatz ist die Sicherheit im Betrieb jedenfalls zu gewährleisten bzw. entsprechende Maßnahmen gegen potenzielle Gefahren vorzusehen.
- ♦ **Batterietechnologie** – Wie flexibel ist das Konzept hinsichtlich der Batterien? Ein Ladekonzept muss dabei möglichst alle Batterietypen unterstützen, also universell sein.
- ♦ **Netzintegration** – Inwiefern ist die Ladetechnik geeignet bidirektionale Ströme zu ermöglichen? Die Batterien könnten zukünftig als Pufferspeicher im Stromnetz dienen, die Ladeinfrastruktur muss diese Kapazitäten effizient und schnell zu Verfügung stellen.
- ♦ **Fahrzeugtechnik** – Welchen Einfluss nimmt das Ladekonzept auf das Fahrzeug und welche Fahrzeugtypen werden unterstützt? Das Ladekonzept sollte für alle verfügbaren Fahrzeugmodelle benutzbar sein und die Fahrzeugkonstruktion nur minimal beeinflussen.

4.2 Ökonomische & organisatorische Anforderungen

Zusätzlich ist die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Systeme zu beantworten, sowie die organisatorischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen müssen Geschäftsmodelle entwickelt werden, um die Kosten auf die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeugs abzubilden und die Beschaffung zu erleichtern. Schließlich soll die Eignung der Ladekonzepte für unterschiedliche Nutzerprofile des motorisierten Individualverkehrs beschrieben werden:

- ♦ **Integration in bestehende Infrastruktur** – Inwiefern kann die bereits existierende (Stromnetz, Tankstellen, etc.) für die neu zu errichtende Infrastruktur herangezogen werden? Hält sich der Aufwand für die Adaption (vor allem bei der Markteinführung) in Grenzen, wird das finanzielle Risiko für potenzielle Investoren gemindert. Zudem ist der Ausbau der Infrastruktur schneller möglich und damit kundenfreundlicher.

- ♦ **Ressourcenverbrauch** – Wie hoch ist der zu erwartende Ressourcenverbrauch, vor speziell hinsichtlich des Flächenbedarfs? Neben den Emissionen stellt der Flächenverbrauch auch eine verkehrsbedingte Umweltbelastung dar. Die Anforderung ist als gut erfüllt zu betrachten, wenn kein zusätzlicher Raum benötigt wird.
- ♦ **Geschäftsmodelle** – Unterstützt das Konzept den wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge? Es sollten zusätzliche Einnahmemöglichkeiten durch das Ladekonzept gegeben sein oder Mengeneffekte realisiert werden können, um die Kosten zu reduzieren
- ♦ **Kosten** – Wie teuer ist die Ladetechnik in Anschaffung und Betrieb? Der Kostenfaktor ist sehr wichtig bei Elektrofahrzeugen. Eine teure Ladeinfrastruktur würde den Vorteil des günstigen Strompreises abschwächen und ist daher nicht wünschenswert.
- ♦ **Nutzerprofile** – Für welche Nutzergruppen ist das Konzept geeignet? Der Umstieg auf Elektrofahrzeuge sollte für jeden möglich sein, Art und Beschaffenheit der Infrastruktur haben darauf ebenso Einfluss, wie das jeweilige Fahrzeugkonzept.

4.3 Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte

Neue Mobilitätskonzepte haben das Ziel, die Effizienz des Verkehrsystems als Ganzes zu verbessern. Ein Verkehrsmittel soll möglichst optimal an den jeweiligen Einsatzzweck angepasst werden. Elektrofahrzeuge werden hierbei als Ergänzung des ÖPNV für Kurz- und Mittelstrecke betrachtet. In diesem Punkt soll beleuchtet werden, inwiefern ein Ladekonzept, sich in diese alternativen Mobilitätskonzepte integrieren lässt, bzw. eine kurze Beschreibung aktueller Pilotprojekte erfolgen, die Hinweis auf zukünftige Einsatzgebiete der Ladetechnik geben.

4.4 Stakeholder

Der motorisierte Individualverkehr ist fester Bestandteil unseres täglichen Lebens. Änderungen im Verkehrssystem betreffen daher eine Vielzahl an beteiligten Interessensgruppen. Im Rahmen dieser Arbeit soll nur auf die direkt in der Wertschöpfung beteiligten Parteien etwas näher eingegangen werden, um den Umfang der Arbeit zu begrenzen. Aktuell ist auf der Angebotsseite (Tankstellenbetreiber/Mineralölkonzerne) eine starke Marktkonzentration zu beobachten¹⁰². Durch die vorgeschriebene Trennung von Produktion und Vertrieb in der Elektrizitätswirtschaft¹⁰³, ermöglicht der Kraftstoff „Strom“, neuen Unternehmen in den Markt einzutreten, mit innovativen Lösungen die Angebotsvielfalt

¹⁰² vgl. Dringenberg u.a. (2009), S. 2.

¹⁰³ vgl. Panos (2009), S. 41.

zu erhöhen und damit vorhandene Kostensenkungspotenziale auszuschöpfen. Abhängig von der Ladetechnik ist dies in unterschiedlichen Formen möglich.

4.5 Nutzwertanalyse & Szenariobewertung

a) Nutzwertanalyse¹⁰⁴

„Die **Nutzwertanalyse** dient innerhalb des Entscheidungsprozesses der systematischen Entscheidungsfindung bei der Auswahl komplexer Handlungsalternativen.“¹⁰⁵

Die betrachteten Größen können sowohl monetären, als auch nicht-monetären Charakter haben. Sie wird insbesondere dann angewandt, wenn in einer Entscheidungssituation

- ♦ die Alternativen nicht monetär bewertet werden können oder dies allein zur Entscheidungsfindung nicht ausreicht,
- ♦ die Alternativen gut miteinander vergleichbar sind,
- ♦ eine Vielzahl entscheidungsrelevanter Größen zu berücksichtigen ist.

Die Ermittlung der Zielwerte (Einzelwerte) erfolgt durch vergleichende Betrachtung der Kriterien und der Zuordnung von Zahlenwerten gemäß dem abgeschätzten Grad der Zielerreichung. In dieser Arbeit wurde eine Ordinalskala mit 10 = „Sehr gut erfüllt“ bis 0 = „Nicht erfüllt“ angenommen, da ein qualitativer Vergleich mangels verlässlicher verfügbarer Zahlenwerte als ausreichend erschien. In einem zweiten Schritt soll aus den Einzelwerten die Gesamtbewertung erfolgen. Dazu werden Gewichtungsfaktoren angenommen, die zusammen 100% ergeben. Als besonders wichtig für den Nutzwert werden „Ergonomie“, „Sicherheit“, „Normung & Standardisierung“ und „Kosten“ angesehen (jeweils 15%). Sind diese Anforderungen nur unzureichend erfüllt, ist mit fehlender Kundenakzeptanz bzw. geringem Interesse von Investoren zu rechnen. Der Faktor „Integration in bestehende Infrastruktur (10%)“ nimmt unmittelbaren Einfluss auf die Kosten und entscheidet darüber hinaus, wie schnell die Lademöglichkeiten installiert werden können. Er ist daher ebenfalls bedeutend. Die übrigen Faktoren werden mit jeweils 5% gewichtet, wodurch der jeweilige Einfluss auf den Gesamtnutzwert begrenzt bleibt. Sie sollten bestmöglich erfüllt sein, hängen jedoch nicht nur von der Ladetechnik ab und sollten daher keine K.O. Kriterien darstellen.

Durch Multiplikation der Einzelwerte mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktor entstehen die Nutzwerte der jeweiligen Anforderung. Die Summe aller Nutzwerte ergibt somit den Gesamtwert des Ladekonzepts. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 zeigen das Analyseschema und die zugehörige Bewertungsskala:

¹⁰⁴ vgl. Hoffmeister (2000), S. 278ff.

¹⁰⁵ Hoffmeister (2000), S. 278.

Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Szenarioabhängig
Ergonomie	15%			Nein
Normung & Standardisierung	15%			Nein
Sicherheit	15%			Nein
Batterietechnologie	5%			Ja
Netzintegration	5%			Ja
Fahrzeugtechnik	5%			Nein
Integration in bestehende Infrastruktur	10%			Ja
Geschäftsmodelle	5%			Ja
Kosten	15%			Ja
Ressourcenverbrauch	5%			Ja
Nutzerprofile	5%			Nein
	100%			

Tabelle 4-1: Bewertungsschema Nutzwertanalyse

Sehr gut	+	10
	-	9
Gut	+	8
	-	7
Befriedigend	+	6
		5
	-	4
Ausreichend	+	3
	-	2
Mangelhaft	+	1
	-	0

Tabelle 4-2: Bewertungsskala

Besonderes Kennzeichen der Nutzwertanalyse ist, dass der bewertende Vergleich von Alternativen nicht nur aufgrund objektiver Informationen erfolgt, sondern auch subjektive Einschätzungen mit einbezieht. Darin besteht allerdings auch die Problematik dieses Verfahrens. Die Schätzung der Skalierung, die Wahl der Gewichtung, sowie die vergebenen Punkte sind meist subjektiver Natur, sodass Ungenauigkeiten methodenimmanent sind. Als

Vorteile sind zu nennen, dass sie vergleichsweise einfach durchzuführen ist und dennoch entscheidungsrelevante Informationen und Einsichten vermitteln kann.

*„Die **Nutzwertanalyse** kann jedoch stets nur **Entscheidungshilfe** leisten, die letztendliche Entscheidung kann sie dem Anwender nicht abnehmen.“¹⁰⁶*

Für die betrachteten Ladekonzepte wurden die vergebenen Punkte aus den vorhergehenden Betrachtungen abgeleitet und argumentiert.

b) Szenarien

Die Wahl der unterlegten Szenarien beruht auf einer umfangreichen Studie des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) aus 2009, die sich mit den Markteinführungspotenzialen für Elektromobilität eingehend befasst¹⁰⁷. Dabei wurden aus bereits veröffentlichten Studien Szenarien abgeleitet, die sich aus einer Reihe an verschiedenen Einflussfaktoren, wie etwa Marktentwicklung des Fahrzeugangebots, Preisentwicklung von Erdöl, politischen Maßnahmen, etc. zusammensetzen (siehe Anhang). Die Betrachtungen beschränken sich auf die Substitution von Fahrzeugen mit VKM durch Elektro- und Hybridfahrzeuge – Brennstoffzellenfahrzeuge sind mangels marktfähiger Produkte nicht eingeschlossen. Da eine Bewertung der verschiedenen Ladekonzepte für alle neun Szenarien als zu umfangreich angesehen wird, sollen im Rahmen dieser Arbeit nur das Szenario A0 („Basisszenario“¹⁰⁸), sowie das Szenario A1 („Maximale Förderung“¹⁰⁹) verwendet werden. Szenario A3 („Kaum Tankstelleninfrastruktur“) dient der Abschätzung der Effekte einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur und sollen ergänzend zu Szenario A1 Eingang in die Analyse finden. Szenario A1 und A3 unterscheiden sich lediglich durch Variation des Faktors *„Zunahme des Anteils der Tankstellen mit Schnelllade- und Wartungsmöglichkeit für E-PKW von 10% (2011) auf 100% (2020)“*¹¹⁰.

¹⁰⁶ Hoffmeister (2000), S. 308.

¹⁰⁷ vgl. Pfaffenbichler u.a. (2009), S. 118ff.

¹⁰⁸ Business as Usual (BAU) / „Worst Case“

¹⁰⁹ „Best Case“

¹¹⁰ vgl. Pfaffenbichler u.a. (2009), S. 118.

5 Konzeptanalyse und -bewertung

5.1 Konduktive Ladesysteme

5.1.1 Konzept

Unter dem Konzept der konduktiven Systeme soll hier generell die Verwendung von Kabel und Stecker verstanden werden, die in vielen Pilotprojekten zum Einsatz kommen. Der Kunde stellt die Verbindung zur Ladestelle manuell her, danach beginnt im einfachsten Fall der Ladevorgang. Hierbei können verschiedene Formen unterschieden werden:¹¹¹

Steckdosen – Handelsübliche Steckdosen können bei ausreichender Absicherung und entsprechenden Kabelquerschnitten in der Zuleitung als Ladeinfrastruktur dienen. Über Zugang und Abrechnung bestimmt der jeweilige Besitzer dieser Ladestelle. Gerade in privaten Haushalten stellt diese Form der Infrastruktur eine praktikable Lösung dar, da sie vielfach vorhanden ist. In Skandinavien sind solche Steckdosen sogar öffentlich zugänglich, sodass Verbrennungsmotoren im Winter durch elektrisches Heizen warm gehalten werden können. Schweden besitzt ca. 500.000 dieser Steckdosen. Der Leistungsbereich liegt zwischen 2 und 20 kW.

Abschließbare Steckdosen – Gegenüber normalen Steckdosen werden diese in ein Gehäuse verbaut, der Zugang erfolgt entweder per Schlüssel oder elektronisch. Es wird meist pauschal abgerechnet. In Europa ist das System von *Park & Charge* am weitesten verbreitet. Bei gewöhnlichen Steckern ist Lademanagement nicht möglich, stellt jedoch die mit Abstand kostengünstigste Form der Infrastruktur dar.

Stromstellen – Sind öffentliche Steckdosen mit einem klar definierten Verhalten. Sie dienen als Netzanschlusspunkt und verfügen selbst über keinen Zähler. Dieser muss sich im Fahrzeug befinden. Durch Verbindung mit dem Fahrzeug wird die Stromstelle frei geschaltet und der Ladevorgang kann beginnen. Dies muss nach einem einheitlichen Verfahren erfolgen, damit sie für jeden Kunden zugänglich wird. Lademanagement wäre, z.B.: durch Bandbreitenmanagement, möglich. Die Abrechnung erfolgt via Abbuchung vom jeweiligen Service Provider, z.B.: *Better Place*.

Stromautomaten – Geben gegen Bezahlung Strom an den Kunden ab. Sie sind somit eine um eine intelligente Steuerung und ein Abrechnungssystem erweiterte abschließbare Steckdose. Die Bezahlung erfolgt entweder vor Ort oder mittels Abbuchung. Diese Bauform wird von vielen Herstellern auch als „intelligente Ladesäule“ bezeichnet¹¹² und von

¹¹¹ vgl. Engel (2010a), S. 38f.

¹¹² z.B.: Siemens, Schrack und KEBA [vgl. Internetquelle 24, 25, 26]

Energieversorgern in ihren Pilotprojekten eingesetzt¹¹³. Allerdings sind die Investitionskosten sehr hoch (20.000€) und können durch den Betrieb nicht amortisiert werden¹¹⁴. Leistungen bis 50 kW sind realistisch.

Stromtankstellen – Vergleichbar mit einer konventionellen Tankstelle für Benzin und Diesel, kann man hier gegen Bezahlung sehr hohe elektrische Ladeleistungen abrufen (bis zu 150 kW, DC¹¹⁵). Durch die hohe Betriebsspannung ist das Ladekabel fest mit der Einrichtung verbunden, der Tankvorgang erfolgt in der Regel unter Aufsicht und der Strom wird nicht aus dem Niederspannungsnetz, sondern aus dem Mittelspannungsnetz¹¹⁶ eingespeist.

Des Weiteren können die Anwendungsbereiche von Ladestationen nach ihrem Standort in drei Gruppen eingeteilt werden:¹¹⁷

Privater Bereich – Die Motivation für den Bau einer privaten Infrastruktur wird in den meisten Fällen die eigene Nutzung des Elektrofahrzeugs sein. Die Ladestelle befindet sich in der Regel auf Grund und Boden des Anschlusseigentümers. Als privat sind in diesem Zusammenhang auch Unternehmen anzusehen, die entweder die eigenen Elektrofahrzeuge auf dem Firmenparkplatz laden oder den Mitarbeitern Lademöglichkeiten zu Verfügung stellen. Ebenso sind Car-Sharing-Unternehmen nach dieser Definition als privat einzustufen, denn der ordentliche Betrieb der Fahrzeuge ist hierbei das Ziel. Die Kommunikation dient vor allem dem Fuhrparkmanagement (Unternehmen) oder dem lokalen Energiemanagement (Unternehmen und Haushalte). Das Lastmanagement richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten, sowie der Art der Stromerzeugung. So könnte beispielsweise der benötigte Strom dezentral durch eine eigene Photovoltaikanlage erzeugt werden.

„Meine Infrastruktur auf meinem Boden liefert meinen Strom für meine Elektrofahrzeuge.“¹¹⁸

Gewerblicher Bereich – Das Ziel eines Unternehmens gewerbliche Infrastruktur zu errichten, ist es, damit Gewinne zu erwirtschaften, allerdings sind die Ladestationen in den aktuellen Pilotprojekten nicht wirtschaftlich im Betrieb. Dies wird sich in Zukunft ändern müssen, auch wenn neue Geschäftsmodelle zusätzliche Einnahmen versprechen. Eine andere Möglichkeit wäre, die Ladestellen staatlich zu subventionieren, dies ist aber aus mehreren Gesichtspunkten als kritisch zu sehen¹¹⁹. Prinzipiell sind für diesen Bereich alle verfügbaren Techniken einsetzbar, am besten ist jedoch die Schnelllademethode dafür geeignet, da Kunden für eine kurze Ladedauer bereit sein werden, mehr zu zahlen. Hohe

¹¹³ z.B.: RWE, E.ON [vgl. Internetquelle 27, 28].

¹¹⁴ vgl. Dringenberg u.a. (2009), S. 2.

¹¹⁵ Direct Current (Gleichstrom).

¹¹⁶ vgl. VCÖ (2009).

¹¹⁷ vgl. Engel (2010c), S. 34f.

¹¹⁸ Engel (2010c), S. 35.

¹¹⁹ vgl. Kuhnert u.a. (2010), S. 18ff.

Ladeleistungen werden angestrebt, um den Durchsatz zu maximieren und die Verweildauer des jeweiligen Fahrzeugs entsprechend verkürzen. Der Fokus liegt dabei auf dem Prozess des „Stromtankens“, also unidirektionalen Strömen, die nicht zur Stabilisierung des Gesamtnetzes beitragen werden. Zusätzliche Angebote, wie z.B.: Internetzugang über WLAN-Hotspots könnten das Gesamtpaket abrunden. Das Bezahlen steht also im Vordergrund, daher muss auch die Kommunikation auf diese Anforderungen abgestimmt werden. Gewerbliche Ladestationen werden sich an lukrativen Standorten etablieren und lokale monopolistische Züge tragen, wie dies auch bei gewöhnlichen Tankstellen zu beobachten ist.

„Meine Infrastruktur am besten Standort liefert meinen Strom für eure Elektrofahrzeuge“¹²⁰

Öffentlicher Bereich – Im öffentlichen Raum ist im Gegensatz zu den beiden anderen Bereichen in der Regel keine physische Zugangsbeschränkung möglich. Dies hat eine Reihe zusätzlicher Anforderungen zur Folge. So ist das System einer hohen Vandalismusgefahr ausgesetzt. Auch die Zahl der Stellplätze an einem öffentlichen Parkplatz ist beträchtlich höher, dadurch werden dem Netz bei Lastspitzen enorm hohe Leistungen abverlangt, für das es nicht ausreichend dimensioniert ist. Würden 100 Fahrzeuge mit je 10 kW Leistung gleichzeitig laden (z.B.: am Morgen im Pendlerverkehr), entspräche dies einer erforderlichen Gesamtleistung von 1 MW. Einem intelligenten Lademanagement kommt daher eine zentrale Rolle im Betrieb zu. Auf der anderen Seite ist dadurch auch eine bessere Integration erneuerbarer Energieträger in das Stromnetz möglich. Des Weiteren kann eine Gemeinde mit öffentlicher Infrastruktur die Stadtentwicklung beeinflussen und so den ruhenden Verkehr aktiv lenken.

„Unsere Infrastruktur auf unserem Boden liefert jedermanns Strom an jedes beliebige Elektrofahrzeug“¹²¹

Es existieren auch noch andere Segmentierungen der Anwendungsbereiche¹²², jedoch unterscheiden sie sich nur wenig voneinander. In diesem Zusammenhang wird oftmals der *semi-öffentliche* Bereich genannt (Schulen, Kaufhäuser, etc.), der aus Sicht von Engel, jedoch entweder in die Kategorie *öffentlich* oder *gewerblich* fallen kann, je nachdem welche Art von Infrastruktur der Eigentümer dort errichten lässt.

In Österreich existieren laut Verzeichnis aktuell ca. 3011 Ladestellen¹²³. Diese sind meist nur gegen Voranmeldung nutzbar, da es sich vielfach um private Anschlüsse handelt. Sie unterscheiden sich betreffend Ladeleistung und Steckerverbindungen stark voneinander und verfügen über kein einheitliches Abrechnungssystem (Modellregionen haben jeweils eigene,

¹²⁰ Engel (2010c), S.35.

¹²¹ Engel (2010c), S. 36.

¹²² Vgl. E-Connected (2010), Skarabela (2009).

¹²³ vgl. Internetquelle 29.

nicht kompatible Systeme). Haftungsfragen, beispielsweise bei fehlerhafter Ladung, bleiben oft ungeklärt. Man kann also feststellen, dass die bestehende Infrastruktur den Anforderungen an einen massentauglichen Einsatz bisher nicht gerecht wird und daher noch entsprechend ausgebaut werden muss.

5.1.2 Technologische Anforderungen

↳ Ergonomie

Aus technischer Sicht wird oftmals der ergonomischen Bedienung eines neuen Produktes zu wenig Beachtung geschenkt, spielt aber für die Kundenakzeptanz eine sehr wichtige Rolle. Ein gutes Beispiel dafür sind der *Ipod* und das *iPhone* von *Apple*, die mithilfe eines innovativen Bedienkonzepts ihre jeweiligen Marktsegmente revolutioniert haben und damit einen großen Erfolg bei den Kunden verzeichnen konnten. Ein wichtiger ergonomischer Aspekt bei Elektrofahrzeugen mit Ladekabeln ist die Anschlussposition am Fahrzeug. Bei den bisher vorgestellten Modellen und Prototypen ist bereits eine Vielzahl an Positionen ausprobiert worden, jedoch weisen die meisten erhebliche Nachteile in der Bedienbarkeit auf (siehe Abb. 5-1).

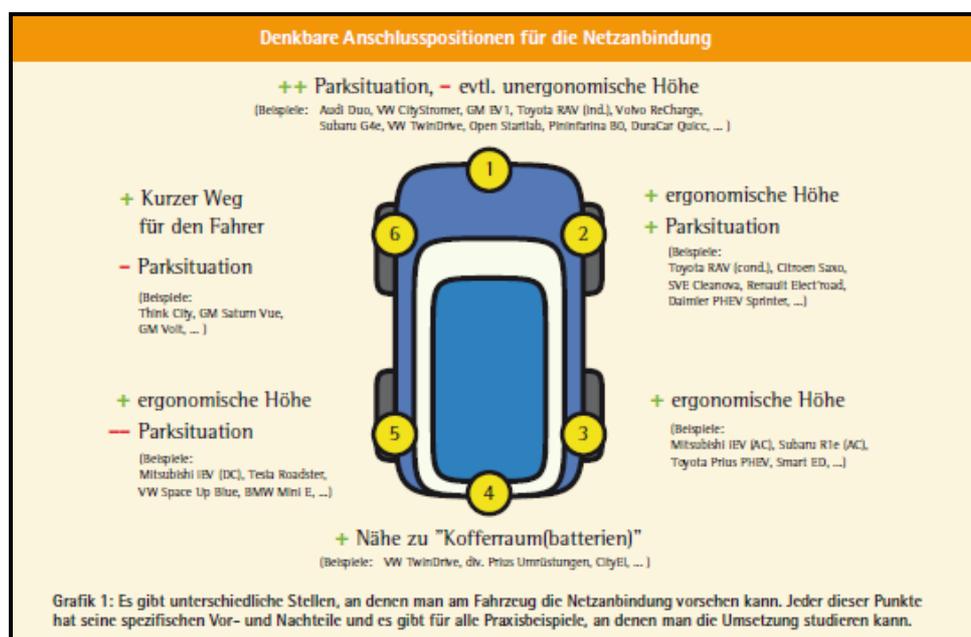


Abbildung 5-1: Anschlussposition für die Netzanbindung [siehe Engel (2009b), S. 60]

Da in vielen Pilotprojekten sog. Konversionsfahrzeuge (Mini E, Smart ED, etc.) zum Einsatz kommen, wurde der Stromanschluss aufgrund konstruktiver Rahmenbedingungen in die Öffnung des bestehenden Tankdeckels integriert. Jedoch erscheint dies für den Massenmarkt nicht als die optimale Lösung. Aus Sicht von Engel¹²⁴ ist die ergonomischste

¹²⁴ vgl. Engel (2009b), S. 63.

Position vorne am Fahrzeug, da sie die kürzesten Kabellängen für die zu Verfügung stehende Parkinfrastruktur garantiert (siehe Abb. 5-2).

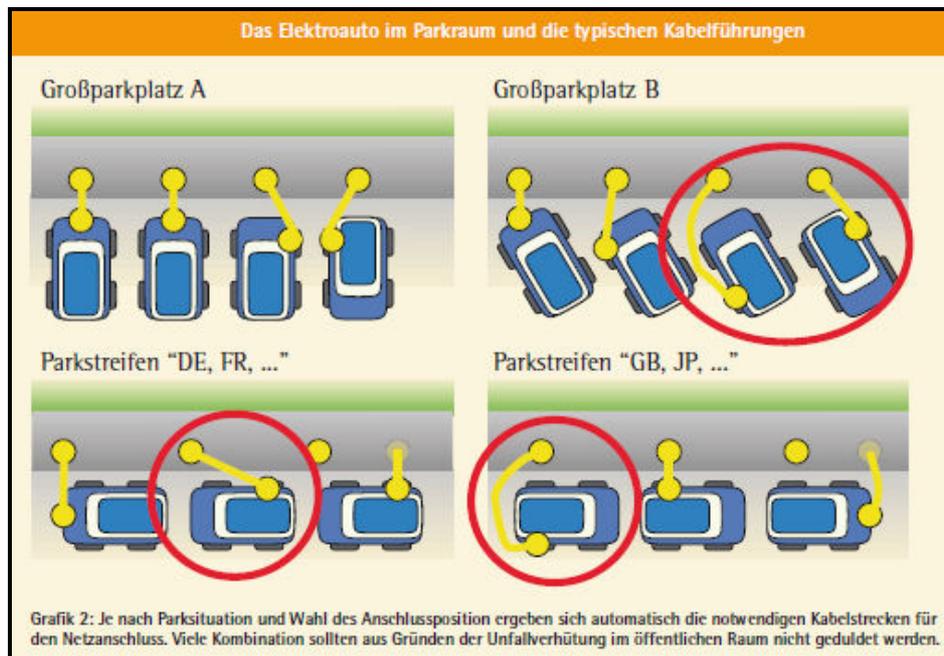


Abbildung 5-2: Typische Kabelführungen bei Elektroautos [siehe Engel (2009b), S. 61]

Zudem sollte das Kabel fix mit dem Fahrzeug verbunden sein, um die Sicherheit zu erhöhen bzw. Missbrauch (z.B.: Abstecken) zu verhindern. Als Vorbild ist hier der Pininfarina BO („Blue Car“) zu nennen (siehe Abb. 5-3).

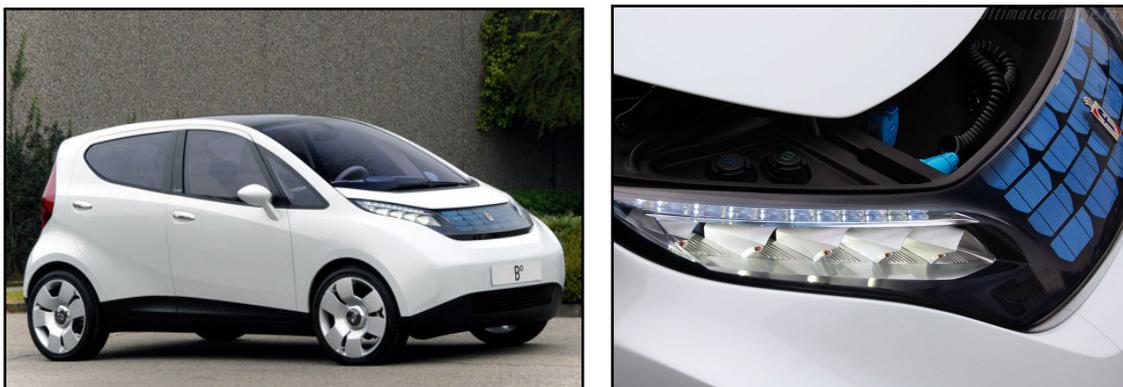


Abbildung 5-3: Pininfarina „Blue Car“ [siehe Internetquelle 30 und 31]

↳ Normung & Standardisierung

Ein wichtiger Faktor für die Verbreitung von Elektromobilität ist eine flächendeckende Ladeinfrastruktur mit möglichst freiem Zugang zu allen errichteten Ladestationen. Dafür sind Normen für die Betriebssicherheit (siehe unten), sowie für Hard- und Softwarekomponenten (Steckerverbindung, IKT, etc.) der Stromsäulen festzulegen. Die entsprechenden Gremien in den Nationalstaaten, sowie auf EU-Ebene beschäftigen sich daher intensiv mit diesem Thema. Europäische Normungsinstitutionen¹²⁵ sollen bis Mitte 2011 entsprechende Vorschläge für die Normierung der Ladeschnittstelle ausarbeiten¹²⁶. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick der aktuellen Entwicklungen gegeben:

a) Steckerverbindung

Bereits heute gibt es viele verschiedene Steckertypen für die gewöhnliche Haushaltssteckdose, die sich von Land zu Land unterscheiden. Reisende müssen daher entsprechende Adapter mitführen und Transformatoren im (Lade-)Gerät gewährleisten, dass der Betrieb innerhalb einer gewissen Bandbreite von Spannung und Frequenz möglich ist. Es ist Aufgabe der Normungsgremien, diesen Zustand bei Elektromobilität – zumindest Regional – in Zukunft zu vermeiden.

Es gibt zahlreiche Vorschläge verschiedener Hersteller, die derzeit geprüft werden. In der bereits existierenden Norm IEC 61851 ist der „Rote“ CEE-Stecker¹²⁷ als Standard definiert, er weist jedoch aus ergonomischer Sicht erhebliche Nachteile für den täglichen Bedarf auf und ist nur für Wechselstrom standardisiert. Schnellladungen werden vorzugsweise mit Gleichstrom durchgeführt, daher hat die Firma *Marechal* ein eigenes System für Wechsel- und Gleichstrom entwickelt, das zudem auch noch Datenübertragung erlaubt. Ein weiterer Vorschlag stammt von der Firma *Mennekes*. Diesem Stecker werden die größten Erfolgchancen zugesprochen, da große Fahrzeughersteller und EVU's ihn bereits in ihren Pilotprojekten einsetzen¹²⁸ und den Normentwurf daher aktiv unterstützen. Als größter Konkurrent gilt der sog. „Yazaki“-Stecker, der in Japan und den USA bereits standardisiert ist. Die Society of Automotive Engineers (SAE) hat in der überarbeiteten Fassung der SAE J1772-Norm diesen Stecker als Standard festgelegt, aber nur für die Fahrzeugseite und nicht für die stationäre Stromstelle. Schließlich ist auch noch der Entwurf des System Providers *Better Place* zu nennen, der 2008 dem IEC vorgelegt wurde¹²⁹. Tab. 5-1 gibt einen Überblick der technischen Spezifikationen aller genannten Konzepte:

¹²⁵ CEN, CENELEC und ETSI.

¹²⁶ vgl. E-Connected (2010), S. 31.

¹²⁷ Starkstromanschluss, bekannt z.B.: aus der Bauindustrie.

¹²⁸ vgl. Internetquelle 32.

¹²⁹ vgl. Engel (2009c), S. 83.



Stecker	Marechal (Avcon)	Yazaki (2009)	Better Place (2008)	Menekes (2009)	„CEE rot“
max. Ladeleistung (kW)	22 kW (AC) / 240 kW (DC)	16–19 kW	6,6 kW	43 kW	11 bzw. 22 kW
max. Spannung; Strom	230–400 V (AC); 32 A 600 V (DC); 400 A	bis 240 V (AC); 70 A	?	bis 400 V (AC); 63 A	400 V (AC); 16 A bzw. 32 A
Phasen	3 (AC) und 1 (DC u. HV-AC)	1 (AC)	1 (AC) ... bald auch 3?	3 (AC)	3 (AC)
Daten-Signalleitungen	3 + 2 (+ 1 „Plug-Present“)	2 (inkl. „Plug-Present“)	2 (inkl. „Plug-Present“)	2 (inkl. „Plug-Present“)	keine
Steckerabmessungen	110 mm x 75 mm	48 mm ø	?	56 mm ø	62 mm bzw. 70 mm ø
Standard	IEC 61851 (2001) u. 62196 bzw. SAE J1772 (2001)	evt. SAE J1772 (2009)	–	–	IEC 60309-2
Arretierung	mechanisch am Stecker	mechanisch am Stecker	mechanisch am Stecker	elektromech. in Buchse	via Klappe auf Buchsen
Anmerkungen	In USA auch als Avcon-Stecker mit nur einer AC-Phase aber dafür bis 48 A.	Der von USA und Japan vorgeschlagene „Standard“.	Der von Better Place vorgeschlagene „Standard“.	Der von „Europa“ vorgeschlagene „Standard“.	Die typische Baustellen- und Industriesteckerverbindung für Starkstrom.

Tabelle 5-1: Technische Spezifikationen verschiedener Steckertypen

[siehe Engel (2009c), S. 82f, eigene Bearbeitung]

b) Informations- und Kommunikationstechnologie

Intelligente Ladestrategien machen den Austausch vieler zusätzlicher Informationen und Daten erforderlich, die zwischen den Marktteilnehmern, bei der Identifikation der Fahrzeuge oder in der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation zu Verfügung stehen müssen¹³⁰. Daher sind einheitliche Standards bei Information und Kommunikation auf allen Ebenen des Netzes unerlässlich. Auf der untersten Ebene erfolgt zunächst eine Trennung von öffentlichen Ladestationen und dem privaten Anschluss. In privaten Haushalten ist derzeit eine Verbindung des hauseigenen Internetanschlusses via IP-Protokoll sehr wahrscheinlich. Im öffentlichen Raum ist dies nicht mehr so klar: Technologien wie WiFi, CAN-BUS oder PLC stehen hierbei in Konkurrenz zueinander. Die generellen Anforderungen finden sich in der aktuell im Normungsprozess befindlichen IEC-61851-1. Weiterführend wird im ISO/IEC/CD-15118-1 die Kommunikation zwischen Elektro-Kfz und Ladestelle¹³¹ näher spezifiziert¹³². Auf Ebene der Mittel- und Hochspannungsnetze kann die Norm IEC 61850 angewendet werden, die als Vorbild für die Arbeit an IEC 15118 angesehen wird. Für Kontroll- und Leitstellen muss ebenfalls ein Standard-Interface angeboten werden, um die großen anfallenden Datenmengen effizient verarbeiten zu können. Einen vielversprechenden Ansatz stellt hier das *Common Information Model* (CIM) dar, welches in IEC 61970 und IEC 61968 definiert wird. Die Norm wurde bereits veröffentlicht, ist aber aktuell noch in Entwicklung.¹³³

¹³⁰ vgl. E-Connected (2009).¹³¹ Mit Ladestelle ist in diesem Kontext eine konduktive Ladestation gemeint.¹³² vgl. Styczynski u.a. (2010), S. 75; Ringelstein u.a. (2010), S. 88.¹³³ vgl. Styczynski u.a. (2010), S. 75.

↳ Sicherheit

Allgemein müssen folgende Sicherheitsanforderungen im Betrieb erfüllt werden:¹³⁴

- ◆ Spannungsfreiheit solange kein Auto angeschlossen ist
- ◆ Niedrige Kontaktwiderstände bei maximal notwendiger Ansteckkraft
- ◆ Sicherheit gegen unabsichtliche Trennung

Gemäß IEC 61851 „Ladebetriebsart 1“ ist das Laden zuhause ein- und dreiphasig erlaubt. Für einen ordentlichen Betrieb sind daher ein Fehlerstromschutzschalter (FI-Schalter) und eine Überstromschutzeinrichtung auf der Netzseite erforderlich. Bei Installation einer 16A-Sicherung sind damit Ladeleistungen zwischen 3,7 kW (einphasig) und 11 kW (dreiphasig) möglich. Dies wird als Normalladung bezeichnet. Normale Schukostecker¹³⁵/-steckdosen erfüllen die Anforderungen für einen sicheren Betrieb allerdings nicht. Höhere Ladeleistungen im Niederspannungsbereich ermöglicht eine 32A Sicherung.¹³⁶

Schnellladungen erfordern aufgrund der hohen Leistung von bis zu 250 kW (400V DC) besondere Schutzmaßnahmen. Das Ladekabel muss einen Durchmesser von ca. 10-15cm aufweisen und braucht aufgrund des hohen Gewichts eine Tragevorrichtung. Der DC-Anschluss zum Fahrzeug muss sicher verriegelt sein, denn bei Trennung unter Last besteht Brandgefahr. Aus diesen Gründen wird hier die Bedienung durch ausgebildetes Personal empfohlen.¹³⁷

Für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist das Ladesäulenkonzept bei geringen Leistungen kaum kritisch zu sehen. Bei Schnellladestationen wäre eine nähere Untersuchung jedoch sinnvoll.

↳ Batterietechnologie

Grundsätzlich sind alle heutigen Batterieformen für Normalladungen geeignet. Art und Häufigkeit des Ladens entscheiden über deren Lebensdauer. Schnellladungen wirken sich hingegen negativ auf die Lebensdauer gewisser Batterietypen aus¹³⁸. Da in der Markteinführungsphase allerdings nicht mit einer größeren Verbreitung von Schnellladestationen zu rechnen ist, wird dieser Aspekt erst mittelfristig eine Rolle für die Fahrzeughersteller spielen.

¹³⁴ vgl. E-Connected (2009), S. 27.

¹³⁵ Schutzkontaktstecker

¹³⁶ vgl. E-Connected (2009), S. 24ff.

¹³⁷ vgl. ebenda.

¹³⁸ vgl. Köhler (2007), S. 34ff.

↳ Netzintegration

Elektrofahrzeugen fällt im Vehicle-to-Grid-Konzept die Aufgabe zu, das Stromnetz zu stabilisieren, indem die Batterien beim Ladevorgang nicht nur Strom entnehmen, sondern bei Bedarf auch wieder rückspeisen. Die Ladeinfrastruktur muss dafür auch bidirektionale Ströme verarbeiten können. Das heute verfügbare Netz ist dazu noch nicht in der Lage, es sind daher Anstrengungen auf drei Ebenen erforderlich, um dies zu erreichen:¹³⁹

- ◆ Technologieebene (Erzeugung, Verteilung, Verbrauch von Strom)
- ◆ Datenebene (Daten & Kommunikation)
- ◆ Prozessebene (problemfreies Einfügen der neuen Abläufe in das bestehende Netz)

Schnellladestationen werden gesondert betrachtet, da hierbei ein möglichst großer Durchsatz erzielt werden soll (siehe 5.1.1). Sie sind reine Verbraucher, die keine Lastverschiebung aufgrund der kurzen Verweildauer an der Ladestelle erlauben.

↳ Fahrzeugtechnik

Konduktive Ladesysteme sind für alle Batteriebetriebenen Fahrzeuge geeignet. Die Normalladung zu Hause oder am Arbeitsplatz wird hierbei für alle Fahrzeugtypen dominant sein¹⁴⁰. Um längere Strecken bewältigen zu können, bietet sich für reine BEV eine Schnellladestation an. PHEV und REEV werden das bestehende Tankstellennetz konventioneller Treibstoffe verwenden, FCEV würden dafür eine funktionierende Wasserstoffinfrastruktur benötigen.

5.1.3 Ökonomische & organisatorische Anforderungen

↳ Integration in bestehende Infrastruktur

Private Ladestationen werden nach Schätzungen am häufigsten dazu benutzt werden, ein Elektrofahrzeug mit Strom zu versorgen.¹⁴¹ Die Integration der Lademöglichkeit in die bestehende Infrastruktur ist problemlos möglich. Ab einer größeren Verbreitung von Elektromobilität (> 10%) sind jedoch mit erheblichen Lastspitzen zu gewissen Tageszeiten zu rechnen. Um diese abzufangen, müssen Verbraucher und Versorger miteinander kommunizieren können. Diese „intelligenten“ Ladestationen passen die Ladestrategie an das Angebot an und können somit auch Preisvorteile für den Kunden schaffen¹⁴². Im öffentlichen Bereich könnten hingegen erhebliche Investitionen für eine flächendeckende Infrastruktur nötig werden. Neben der Errichtung der Ladestationen sind auch die Netzkapazitäten an die

¹³⁹ Kuhnert u.a. (2010), S. 47.

¹⁴⁰ vgl. Naunin (1994); Matthies u.a. (2009), Brauner u.a. (2010).

¹⁴¹ vgl. ebenda.

¹⁴² vgl. Kruhl (2009).

Leistungsanforderungen anzupassen. Schnellladestationen werden an verkehrstechnisch wichtigen Standorten zu finden sein, wie z.B. Raststätten auf der Autobahn. Hierfür sind spezielle hochbelastbare Netzanbindungen auf Mittelspannungsebene notwendig. Aus Sicherheitsgründen sollten sich diese in ausreichendem Abstand von konventionellen Zapfsäulen befinden.

↳ Geschäftsmodelle

Das konduktive Ladekonzept ist durch die geringen technischen Markteintrittsbarrieren geeignet, eine Vielzahl unterschiedlicher Geschäftsmodelle hervor zu bringen. Die Anschaffungskosten sind vergleichsweise gering, vor allem auf privatem Grund. Eine entscheidende Rolle kommt hierbei der Standardisierung zu, um möglichst freien Zugang zu verschiedenen Anbietern zu gewährleisten.

Das Problem der Abrechnung ist hingegen noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die Transaktionskosten übersteigen den Stromumsatz bei weitem, daher macht ein Einzelnachweis wenig Sinn. In den Pilotprojekten zahlen Kunden meist eine monatliche Rate, die die Nutzung der gesamten Ladeinfrastruktur und des Fahrzeugs beinhaltet. Einen anderen Vorschlag hat Tomi Engel, Vorsitzender DGS Fachausschuss Solare Mobilität: Der Fahrstromzähler soll im Fahrzeug verbaut sein. Dieser summiert die mit dem Stromnetz ausgetauschten Energiemengen auf und gewährleistet damit eine Kompatibilität mit allen verfügbaren Systemen, auch überregional. Ist er „intelligent“ ausgeführt, kann der Fahrzeugbesitzer jederzeit kontrollieren wann er welche Strommengen bezogen hat. Die Überprüfung des Zählers erfolgt durch unabhängige Dritte, um Missbrauch zu verhindern. Verschiedene Geschäftsmodelle wären möglich: monatliche Pauschaltarife, zeitgenaue Auslesung, Prepaid, etc.¹⁴³.

↳ Kosten

Die Kosten für eine öffentliche Infrastruktur werden oftmals als sehr hoch angenommen. So schätzt etwa RWE den gesamten Aufwand für die Bundesrepublik Deutschland auf rund 3 Mrd. €. ¹⁴⁴ Beobachtungen aus den Pilotversuchen haben aber gezeigt, dass die mit Abstand meisten Ladevorgänge im privaten Umfeld stattfinden (siehe oben). Öffentlichen Ladestellen kommt daher vorwiegend die Aufgabe zu, den Kunden die Angst zu nehmen, mit dem Fahrzeug liegen zu bleiben und sie sind folglich nur in einem bestimmten Umfang notwendig. Anhand des Beispiels Schweiz soll nun eine grobe Kostenabschätzung erfolgen, da Topographie und Mobilitätsverhalten des Landes durchaus mit Österreich vergleichbar sind (siehe Tab. 5-2).

¹⁴³ vgl. Engel (2010b), S. 39ff.

¹⁴⁴ vgl. Wagner vom Berg u.a. (2010).

Typ	Kategorie	Stückkosten	Anzahl	Gesamtkosten		Finanzierung
Heimladestation	Steckdose	< 100€	600.000	60 Mio. €		Private Haushalte, staatl. Förderungen denkbar
	Abschließbare Steckdose	< 1.000€		600 Mio. €		
Ladestation im Unternehmen	Abschließbare Steckdose	< 1.000€	60.000	60 Mio. €		Unternehmen, staatl. Förderungen denkbar
	Stromstelle	< 2.000€		120 Mio. €		
Öffentliche Ladestation	Stromstelle	< 2.000€	30.000	60 Mio. €		Staat
	Stromautomat	2.000€ - 20.000€		60 Mio. € - 600 Mio. €		
Schnellladestation	Stromtankstelle	20.000€	300	6 Mio. €		Unternehmen
		- 50.000€		- 15 Mio. €		
Total			690.300	Min.	186 Mio. €	
				Max.	1335 Mio. €	

Tabelle 5-2: Kostenabschätzung für konduktive Ladesysteme am Beispiel Schweiz

[vgl. E-Connected (2010), S. 26; Engel (2010a), S. .38f.]

Darin sind jedoch nicht die Kosten für den Ausbau der Netzkapazitäten enthalten, die zumindest mittelfristig ebenfalls zu beachten sind. Geht man von der Annahme aus, dass „Stromstellen“ aufgrund geringerer Anschaffungskosten „Stromautomaten“¹⁴⁵ bei der Errichtung mehrheitlich vorgezogen werden, würden öffentliche Ladestellen mit etwa 150 - 200 Mio. € finanzierbar sein. Staatliche Förderungen für den Kauf von Stromstellen im privaten Bereich und für Unternehmen könnten vor allem kurzfristig sinnvoll sein, um Elektromobilität zu einer gewissen Verbreitung zu verhelfen.

↳ Ressourcenverbrauch

Neben dem finanziellen Aufwand, der mit dem Aufbau einer Infrastruktur verbunden ist, darf auch der Flächenbedarf nicht außer Acht gelassen werden. Vor allem Ladestationen in städtischen Wohngebieten („Curbside“/„Laternenparker“) müssen in ausreichender Zahl vorhanden sein (siehe Abb. 5-4), da für Fahrzeughalter dort oftmals keine Möglichkeit besteht, privat zu laden. Auch die lokalen Netzkapazitäten müssen daher entsprechenden ausgebaut werden.

¹⁴⁵ Unterscheidung siehe 5.1.1.

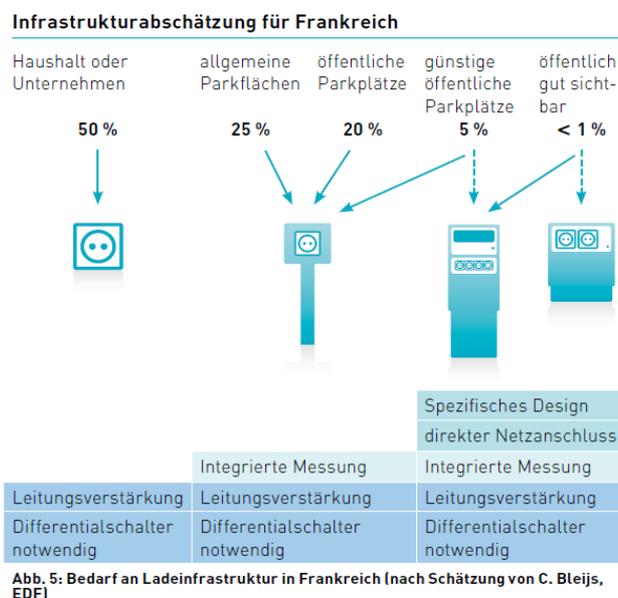


Abbildung 5-4: Abschätzung der benötigten Infrastruktur in Frankreich [siehe E-Connected, S.26]

↳ Nutzerprofile

Für private Haushalte und Unternehmen, die ihren Mitarbeitern Strom zu Verfügung stellen möchten, ist die Installation von Ladesäulen problemlos möglich. Die Verweildauer am Parkplatz ist erwartungsgemäß lange, da entweder während der Nacht (zu Hause) oder der Arbeitszeit (in der Firma) geladen wird. Hohe Ladeleistungen sind nicht notwendig, was sich positiv auf die Errichtungskosten auswirkt. Nutzerprofile, die in diese Kategorie fallen, sind: Berufspendler, private Erledigungen und Einkäufe, sowie Freizeitfahrten (z.B.: zum Sportplatz).

Gewerbliche Flotten stellen höhere Anforderungen an Lademöglichkeiten. Die Fahrzeugauslastung bzw. Verfügbarkeit steht dabei im Vordergrund. Lange Ladezeiten während dem Arbeitstag sind unerwünscht, lediglich außerhalb der Betriebszeiten wäre dies zulässig. Schnellladestationen sind ein möglicher Lösungsansatz, allerdings wird die Lebensdauer der Batterien stark beeinträchtigt, mit unmittelbaren negativen Auswirkungen auf die Total Cost of Ownership (TCO). Aus Sicht von Taxiunternehmen etwa, ist die konduktive Lösung ebenfalls als kundenunfreundlich einzustufen. Zwar sind längere Stehdauern üblich, allerdings müsste der Fahrer zuerst das Fahrzeug verlassen und die Kabelverbindung lösen, bevor er die Fahrt beginnen könnte. Zudem sollten Taxis jederzeit verfügbar sein, dies kann durch Normalladen nicht gewährleistet werden. Größere Batteriekapazitäten würden dem entgegenwirken, sind aber nur begrenzt erweiterbar.

5.1.4 Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte

Ladestellen sollten kurzfristig an wichtigen Verkehrsknotenpunkten verfügbar gemacht werden (z.B.: Park&Ride-Anlage, Bahnhöfe), oder an jenen Orten, bei denen längere Aufenthalte zu erwarten sind (Restaurant, Hotel, Rastplätze, Shopping Centers, etc.). Um den Fernverkehr optimal zu ergänzen, sind zudem erweiterte Mobilitätsangebote an den intermodalen Schnittstellen zu schaffen. Dies könnten beispielsweise Elektro-Mietwagen oder Car-Sharing-Angebote sein. Generell gilt jedenfalls, dass durch die Ladestellen keine Konkurrenz zum ÖPNV geschaffen werden darf.¹⁴⁶

In der Modellregion Wien (*Mobility On Demand*) ist dieser Aspekt zentraler Bestandteil des Konzepts. Der bereits große Anteil des ÖPNV im Modal Split (2009: 35%) soll weiter erhöht werden (Ziel 2020: 40%) und Elektromobilität diesen in Zukunft sinnvoll ergänzen. Dafür werden Ladestellen, sowie ein umfassendes E-Car-Sharing Angebot an sog. „Hot-Spots“ (siehe Abb. 5-5) geschaffen. Um zu verhindern, dass Elektrofahrzeuge den ÖPNV substituieren, sind keine weiteren öffentlichen Ladestellen vorgesehen. Lediglich im semi-öffentlichen Bereich (gebührenpflichtige Parkgaragen in den inneren Stadtbezirken) sollen Stromstellen zu Verfügung stehen. Innovative IKT-Lösungen sollen in Zukunft eine optimale Vernetzung verschiedener Verkehrsmittel mit maximalem Kundennutzen ermöglichen.¹⁴⁷

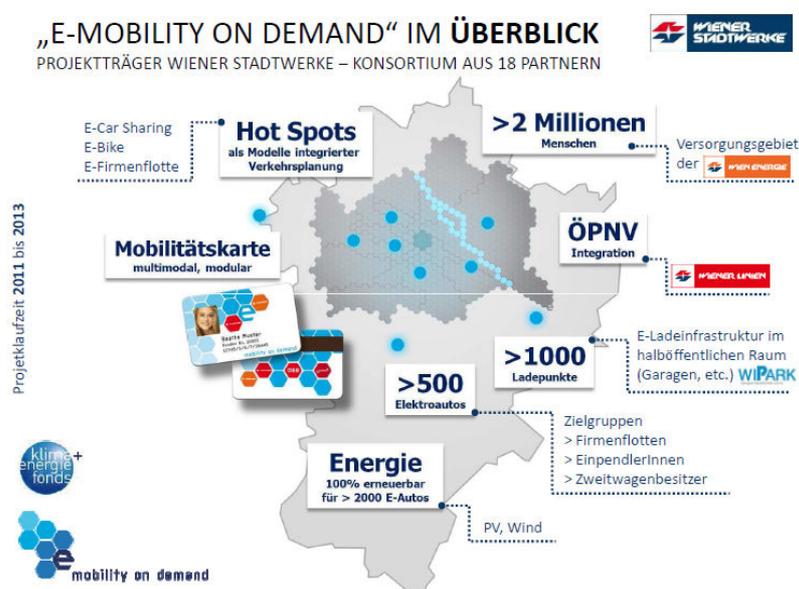


Abbildung 5-5: Modellregion Großraum Wien [siehe Gara (2011), S. 8]

¹⁴⁶ vgl. BM VIT (2010).

¹⁴⁷ vgl. Gara (2011), S. 4ff.

5.1.5 Stakeholder

Die vergleichsweise geringen Markteintrittsbarrieren¹⁴⁸ machen das Geschäft mit Ladesäulen für viele Interessensgruppen attraktiv. Gewinne sind nicht unmittelbar mit dem Stromabsatz zu erzielen, sondern durch innovative Geschäftsmodelle und intelligente Laststeuerung. Stakeholder könnten sein:

- ◆ Service Provider,
- ◆ Energieversorgungsunternehmen,
- ◆ Netzbetreiber,
- ◆ ...

Für andere Unternehmen stellt das Aufstellen bzw. der Betrieb von Ladesäulen eine interessante Erweiterung des Kerngeschäfts dar, oder dient der Differenzierung von Konkurrenten am Markt, z.B.:

- ◆ Eisenbahngesellschaften: Mobilitätsdienstleister
- ◆ Tankstelle: Schnellladestation
- ◆ Telematikunternehmen: Navigationsgerät/Kartenmaterial mit Ladestellen
- ◆ Einzelhandel: Ladestellen am Kundenparkplatz
- ◆ Hotel/Restaurant: Ladestellen am Kundenparkplatz
- ◆ Parkhausbetreiber: Lademöglichkeit am Stellplatz
- ◆ Autovermietung: Elektrofahrzeuge, Car-Sharing
- ◆ Telekommunikation: Telefonzelle zu Ladestelle umgebaut¹⁴⁹
- ◆ ...

Die Technik von Ladesäulen ist als serienreif einzustufen und entsprechende Normen sind bereits in Begutachtung. Das reduziert das Entwicklungsrisiko und eröffnet den betroffenen Branchen neue Absatzmöglichkeiten. Diese sind vor allem:

- ◆ Elektrik- / Elektronikindustrie
- ◆ Informations- und Kommunikationstechnologie

¹⁴⁸ Im Vergleich zu anderen Ladekonzepten: geringer baulicher und finanzieller Aufwand

¹⁴⁹ vgl. Internetquelle 33.

5.1.6 Nutzwertanalyse und Szenariobewertung

Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Szenarioabhängig
Ergonomie	15%	5	0,75	Nein
Normung & Standardisierung	15%	10	1,5	Nein
Sicherheit	15%	6	0,9	Nein
Batterietechnologie	5%	8	0,4	Ja
Netzintegration	5%	8	0,4	Ja
Fahrzeugtechnik	5%	8	0,4	Nein
Integration in bestehende Infrastruktur	10%	8	0,8	Ja
Geschäftsmodelle	5%	10	0,5	Ja
Kosten	15%	9	1,35	Ja
Ressourcenverbrauch	5%	5	0,25	Ja
Nutzerprofile	5%	7	0,35	Nein
	100%		7,6	

Tabelle 5-3: Nutzwertanalyse – konduktive Ladesysteme

Nutzwertanalyse¹⁵⁰

Wie aus Tabelle 5-3 ersichtlich, weisen kabelgebundene Lösungen aus ergonomischer Sicht (5 Punkte) Nachteile gegenüber anderen Ladesystemen auf. Die Bedienung des Ladekabels wird von den Kunden oft als unangenehm empfunden, vor allem bei widrigen Witterungsbedingungen (z.B.: Schnee, Regen). Dies ist auch für die elektrische Sicherheit (6 Punkte) relevant, da entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen, die Fehlfunktionen verhindern. Zudem besteht eine erhöhte Vandalismusgefahr, weil die Kabelverbindung jederzeit gewaltsam getrennt werden kann¹⁵¹. Für Schnellladestationen sind besondere Vorkehrungen zu treffen (z.B.: geschultes Bedienungspersonal), um lebensgefährlichen Verletzungen durch die hohen übertragenen Ströme vorzubeugen.

Trotzdem sind alle in den nächsten Jahren auf den Markt kommenden Fahrzeuge mit dieser Ladetechnik ausgestattet. Die Kosten (9 Punkte) sind vergleichsweise gering, erlauben dem Kunden dennoch höchste Flexibilität, da die bestehende Strominfrastruktur genutzt werden kann (8 Punkte). Zudem sind die Normungsprozesse (10 Punkte) bereits weit fortgeschritten, sodass auf den wichtigsten Märkten (EU, USA, Japan, China) mit jeweils einheitlichen Steckern zu rechnen sein wird. Geringe Markteintrittsbarrieren bei der

¹⁵⁰ Die jeweilige Bewertung der Kriterien wird in Klammern () angegeben.

¹⁵¹ vgl. Schraven u.a. (2010), S. 2f.

Infrastruktur eröffnen die Möglichkeit, innovative Services rund um Elektromobilität anzubieten und fördern mit geeigneten Geschäftsmodellen (10 Punkte) den Wettbewerb am Markt.

Über die notwendige Dichte einer flächendeckenden Infrastruktur herrscht derzeit Uneinigkeit. Die Modellprojekte haben gezeigt, dass meist zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen wird und eine hohe Anzahl öffentlicher Ladestationen daher nicht notwendig ist. Auf der anderen Seite ist die Reichweitenproblematik eine der größten Hürden für Elektrofahrzeuge. Eine öffentliche Infrastruktur könnte dieser entgegenwirken und die Verbreitung von Elektromobilität fördern. Derzeit eingesetzte Ladesäulen würden jedenfalls einen entsprechenden Flächenbedarf (5 Punkte) bedeuten und sich negativ auf das Stadt- bzw. Landschaftsbild auswirken. Andere Ladesysteme sind hier im Vorteil. Mittel- bis langfristig sollen Elektrofahrzeuge dabei helfen, das Stromnetz zu stabilisieren. Die bestehende Infrastruktur ist dafür derzeit nicht in der Lage und müsste daher mit gewissem Aufwand adaptiert werden (8 Punkte).

Insgesamt werden die meisten Kriterien von konduktiven Ladesystemen gut bis sehr gut erfüllt, weshalb sie den höchsten Gesamtnutzwert (7,6 Punkte) im Vergleich erreichen. Verbesserungspotenzial ist vor Allem bei der Sicherheit zu sehen, die den risikolosen Betrieb von Elektrofahrzeugen gewährleistet.

Szenarienbewertung

Konduktive Ladesysteme bauen in der Markteinführungsphase vor allem auf bestehender Infrastruktur auf. Für private Haushalte und Unternehmen sind die Errichtungskosten vergleichsweise gering. Dies bedeutet auch bei geringer Marktdurchdringung (Szenario A0) von Elektrofahrzeugen, dass eine funktionierende Ladeinfrastruktur möglich ist. Da die Reichweiten der angebotenen Fahrzeuge noch eher gering sein werden, ist kurz- bis mittelfristig für den Überlandverkehr nicht mit dem Einsatz dieser Fahrzeuge zu rechnen, womit etwa kein Bedarf für Schnellladestationen auf Autobahnen besteht. Eine öffentliche Infrastruktur wäre nur in geringem Ausmaß notwendig, das V2G-Konzept somit anfangs nicht bedeutsam. Sollten Elektro- und Hybridfahrzeuge einen signifikanten Marktanteil bis 2020 erreichen (Szenario A1), wäre durchaus Bedarf für eine öffentliche Infrastruktur gegeben. Im direkten Vergleich beträgt der Marktanteil mit Tankstelleninfrastruktur 13,3%, ohne hingegen nur mehr 7,2%. Trotzdem bleibt das Ladekonzept selbst weitgehend indifferent bezüglich der Marktentwicklung, da Anschlussmöglichkeiten bereits heute ausreichend zu Verfügung stehen.

5.2 Batteriewechselsysteme

5.2.1 Konzept

Begrenzte Kapazität und lange Ladezeiten führen dazu, dass Elektroautos in der Regel für längere Strecken heute noch ungeeignet sind. Das Konzept *Batteriewechselsystem* bietet einen interessanten Ansatz, dieses Problem zu lösen. Anstatt die Batterien aufzuladen, werden sie getauscht. Solche Wechselstationen übernehmen neben dem Aufladen auch Lagerung und Wartung der Batterien. Zudem verfügen sie über technische Hilfsmittel, um die schweren Batterien in möglichst kurzer Zeit tauschen zu können. Mit einem flächendeckenden Netz von Wechselstationen wären ähnliche Reichweiten wie mit Verbrennungsmotoren zu erreichen. Aus Gründen, die in Folge noch erläutert werden sollen, beschränkt sich der Einsatz dieser Technik bisher jedoch nur auf einzelne Projekte:

Better Place ist hier besonders hervorzuheben. Als Service Provider stellt das Unternehmen in Modellregionen weltweit¹⁵² ein Netz von Wechselstationen zu Verfügung, welches mithilfe eines speziell entwickelten Robotersystems leere Batterien vollautomatisch durch Geladene ersetzt. Ähnlich einer Waschstraße befindet sich das Fahrzeug während dem Vorgang auf einem Transportförderband. Bevor die Akkumulatoren entnommen werden, erfolgt eine Unterbodenwäsche, danach lösen Aktuatoren im Fahrzeug die Verankerung. Die leere Batterie wird auf einer Palette abgesenkt und in das Lager transportiert. Eine zweite Palette mit der frischen Batterie wird nun unter das Fahrzeug gebracht. Diese wird angehoben und ebenfalls wieder verankert. Damit ist der Batteriewechsel abgeschlossen. Der Vorgang dauert insgesamt nur einige Minuten – also schneller als übliche Tankvorgänge bei Benzin- und Dieselmotoren – und der Fahrer muss dabei das Fahrzeug nie verlassen. Die Batterien werden in der Wechselstation zudem bei idealen Umgebungsbedingungen geladen und auf Lager gehalten, was sich positiv auf deren Lebensdauer auswirkt. Um die Kompatibilität mit möglichst vielen erhältlichen Elektrofahrzeugen zu gewährleisten, versucht *Better Place* mit Autoherstellern zu kooperieren, die dieses System unterstützen. Bisher besteht eine strategische Allianz mit *Renault-Nissan* und ein „Memorandum of Understanding“ (Absichtserklärung) mit dem chinesischen Hersteller *Chery*¹⁵³. Das System stellt jedoch spezifische Anforderungen an Fahrzeugdesign und Fahrzeugaufbau, daher zeigen sich andere OEM's bisher zurückhaltend¹⁵⁴.

¹⁵² Israel, Dänemark, Japan, Australien und USA [vgl. Internetquelle 34].

¹⁵³ vgl. Internetquelle 35.

¹⁵⁴ vgl. E-Connected (2010).

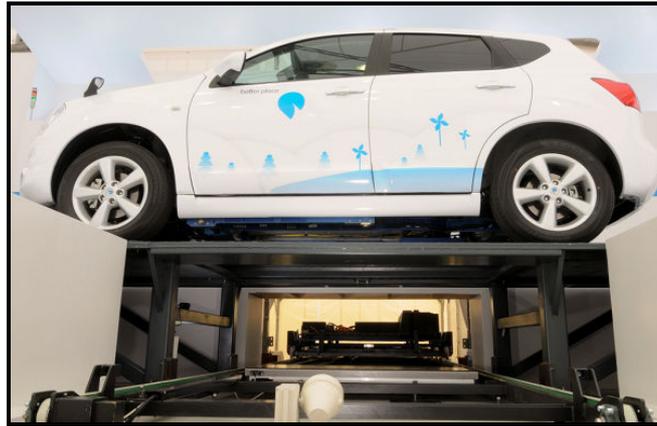


Abbildung 5-6: Batteriewechselstation [siehe Internetquelle 36]

Wirkliche Vorteile bieten Wechselbatterien für Einsatzzwecke, bei denen aus bestimmten Gründen keine Zeit nach zu laden bleibt. Dies kann beispielsweise für gewerbliche Flotten (Zustelldienste, Stadtreinigung, etc.) der Fall sein. Auch Im Rahmen der Olympischen Spiele 2008 in Peking wurde ein Pilotprojekt mit Omnibussen durchgeführt, deren Akkumulatoren in vollautomatischen Wechselstationen getauscht wurden.

Das Konzept, die Batterien zu tauschen, ist bereits länger bekannt. In den Achtziger Jahren gab es in Deutschland groß angelegte Versuche von Elektrobussen mit Wechseltechnik. Die Batterien wurden dabei in einem Anhänger mitgeführt. Nach rund zwei Stunden Betriebszeit musste die 6t schwere Batterie an einer speziellen vollautomatischen Wechselstation ausgetauscht werden. Das Konzept wurde allerdings wieder verworfen, da andere Techniken (Oberleitung, Kurzzwischenladung) größeren Erfolg versprachen.¹⁵⁵

Je nach Einsatzzweck sind Batteriewechselsysteme unterschiedlich zu bewerten: für Privatkunden dienen sie der (kurzfristigen) Verlängerung der Reichweite und tragen so dazu bei, die sog. „Range Anxiety“ (also die Angst, nicht genügend Strom zu haben, um ein gewisses Fahrziel zu erreichen) zu beseitigen. Sie sind daher komplementär zu (kabelgebundenen) Ladestationen im privaten Haushalt und am Arbeitsplatz zu sehen (z.B.: *Better Place*). Als direkte Konkurrenztechnologien sind Schnellladestationen für BEV, konventionelle Tankstellen für PHEV/REEV, sowie eine Wasserstoffinfrastruktur für FCEV anzusehen. Bei Flottenbetrieb hingegen dient die Batteriewechseltechnik als Hauptladeinfrastruktur und steht damit auch in unmittelbarem Wettbewerb zu allen anderen Ladekonzepten.

¹⁵⁵ vgl. Bader (1994), S. 196ff.

5.2.2 Technologische Anforderungen

↳ Ergonomie

Gegenüber kabelgebundenen Ladevorgängen weisen Batteriewechselstationen einen höheren Bedienungskomfort auf. Das Fahrzeug muss zu keinem Zeitpunkt verlassen werden, da der Wechsel vollautomatisch in geschützten Räumen stattfindet. Bei *Better Place* zeigt die on-board Software „AutOS“ auf einem zentralen Display im Fahrzeug Informationen zur nächstgelegenen Wechselstation an, wodurch gewährleistet wird, dass der Batteriesatz dort auch wirklich gewechselt werden kann.¹⁵⁶

↳ Normung & Standardisierung

Die nötige Standardisierung der Batterien ist das größte Hindernis für dieses Ladekonzept. Neben den physikalischen Abmessungen und der Haltevorrichtung sind auch die Batteriespannung, die Kommunikation zur Überwachung des Speichers und die Anbindung an ein fahrzeugseitiges Kühlsystem zu vereinheitlichen. Da jeder dieser Parameter unmittelbare Auswirkungen auf die technischen Eigenschaften und das Erscheinungsbild des Fahrzeugs hat, ist eine herstellerübergreifende Standardisierung aus heutiger Sicht als unrealistisch zu bewerten¹⁵⁷. Trotzdem könnte diese Technik in Nischen erfolgreich sein. *Better Place* bemüht das Bild sog. „Inseln“, die in sich geschlossene Areale bilden und damit nicht mit anderen Systemen zwingend kompatibel sein müssen¹⁵⁸. Auch für Flotten ist es durchaus üblich, sich auf gewisse Hersteller zu beschränken, um Skaleneffekte bei Beschaffung und Betrieb (Wartung) zu erzielen.

↳ Sicherheit

Die funktionale und elektrische Sicherheit für den Kunden bei Batteriewechselstationen sind als hoch einzustufen, da beim Wechselvorgang keinerlei Berührung mit Hochvoltbauteilen stattfindet. Zudem bilden Fahrzeug und Batterie jeweils geschlossene Systeme, welche aneinander angeschlossen werden. Dies hat zwar Nachteile für die Fahrzeuggestaltung, beschränkt jedoch auftretende Fehler auf das entsprechende System. Einen weiteren Sicherheitsaspekt stellt die Entkopplung von Lade- und Fahrbetrieb dar, denn elektrische Fehlfunktionen beim Laden bleiben damit auf die jeweilige Station beschränkt. Die Umgebungsbedingungen sind konstant und als ideal anzunehmen, was bei individuellen Ladevorgängen nicht zwingend der Fall sein muss.

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist durch die räumliche Trennung von Lade- und Tauschvorgang bei diesem Konzept als unkritisch anzusehen.

¹⁵⁶ vgl. Internetquelle 37.

¹⁵⁷ vgl. Engel (2009a), S. 79.

¹⁵⁸ vgl. Wagner vom Berg u.a. (2010), S. 979.

↳ Batterietechnologie

Viele Fahrzeughersteller stehen Tauschbatterien aus verschiedenen Gründen skeptisch gegenüber. Der Verband der Automobilindustrie (VDA) stellt diesbezüglich fest:

„Eine Antriebsbatterie stellt ein komplexes System aus mehreren Bestandteilen dar. Zu einem automobilen Batteriesystem gehört neben der Leistungselektronik und der Batteriesteuerungstechnik auch die Kühlung. Darüber hinaus muss das Batteriesystem in seiner Leistungsfähigkeit und seiner Kapazität an das Fahrzeug angepasst werden. Je nach Fahrzeugkonzept wird dieses komplexe System eine unterschiedliche Größe haben und an unterschiedlichen Plätzen im Fahrzeug verbaut sein. All dies schließt einen einfachen Wechsel unabhängig vom Fahrzeugkonzept und Typ aus. Darüber hinaus müssen für jedes Fahrzeug bei einem solchen Konzept mehrere Batteriesysteme vorgehalten werden. Dabei handelt es sich um Systeme, die einen großen Teil der Gesamtkosten eines Fahrzeugs ausmachen. Schließlich würde der logistische Aufwand für die Einführung und den Betrieb eines solchen Systems noch Kosten „on-top“ produzieren, die sicher vom Nutzer nicht mehr akzeptiert werden würden.“¹⁵⁹

Aus Sicht der Batterietechnik ist daher mit einer ausschließlichen Versorgung von Elektrofahrzeugen mit Wechselbatterien in der Masse vorerst nicht zu rechnen.

↳ Netzintegration

Wechselstationen verhalten sich im Stromnetz sehr unterschiedlich gegenüber konduktiven Ladestationen (Normalladung). Um sicherzustellen, dass genügend Batterien für die Kunden vorhanden sind, müssen viele Batterien auf Lager gehalten werden bzw. gleichzeitig mit Strom versorgt werden.¹⁶⁰

Ladesystem: Anzahl der Batterien = Anzahl der Fahrzeuge

Tauschsystem: Anzahl der Batterien = Anzahl der Fahrzeuge + x

mit x... Anzahl der Batterien in den Austauschstationen¹⁶¹

Dies stellt für die Nutzung von Autobatterien als Stromspeicher einen erheblichen Vorteil dar. Die Komplexität der erforderlichen Smart Grids wäre bedeutend geringer und könnte sich in der Anfangsphase auf die Wechselstationen beschränken¹⁶². Quinn (2010)¹⁶³ etwa zeigt, dass aggregierte Netzarchitekturen für *Vehicle-to-Grid* Vorteile bieten. Es wird vom Zusammenschluss einzelner Ladestationen zu größeren Clustern ausgegangen, aus

¹⁵⁹ VDA (2008), S. 15f.

¹⁶⁰ vgl. Wagner vom Berg u.a. (2010), S. 979.

¹⁶¹ Für eine Abschätzung von „x“, vgl. Yudai u.a. (2009), S.1ff.

¹⁶² vgl. Wagner vom Berg u.a. (2010), S.980.

¹⁶³ vgl. Quinn u.a. (2010), S. 1500ff.

technischer Sicht ist eine Wechselstation damit aber durchaus vergleichbar¹⁶⁴. Zudem erlauben größere Kapazitäten mehr Spielraum bei der Netzstabilisierung.

Um den benötigten Strom dezentral herzustellen, hat *Better Place* im Zuge der Pilotprojekte die Wechselstationen mit einer Photovoltaik-Anlage ausgestattet. Damit wird die Station neben einem Verbraucher auch zu einem Stromlieferanten mit entsprechenden Anforderungen an die Netzinfrastruktur.¹⁶⁵

↳ Fahrzeugtechnik

Für reine BEV sind der größte Nachteil dieses Ladekonzepts die notwendige Standardisierung der Batterien und damit die eingeschränkten technischen Gestaltungsmöglichkeiten. Folglich werden nicht alle Elektrofahrzeuge mit dem Ladesystem kompatibel sein, wodurch der Nutzerkreis begrenzt wird.

Bei PHEV, REEV und FCEV ist der Bedarf für die kurzfristige Reichweitenverlängerung durch Strom nicht gegeben, da sie für diesen Zweck über Verbrennungsmotoren bzw. Brennstoffzellen verfügen.

5.2.3 Ökonomische und organisatorische Anforderungen

↳ Integration in bestehende Infrastruktur

Eine flächendeckende Infrastruktur von Batteriewechselstationen soll es ermöglichen, Langstrecken auch mit begrenzter Batteriekapazität – und damit begrenzter Reichweite – zu bewältigen. Bei einer Kooperation mit Tankstellenbetreibern ließen sich vorhandene Infrastrukturen, z.B.: an Autobahnen, nutzen und die Investitionskosten reduzieren. Heutige Tankstellennetze weisen eine Dichte auf, die rein technisch von den Fahrzeugen nicht benötigt würde. Es sind daher keine Probleme bei den Intervallen zwischen den möglichen Wechselstationen zu erwarten.

Für Österreich wären laut Amit Yudan, Europakoordinator von *Better Place* ca. 70-80 Stationen dieser Art nötig, eine mögliche Infrastruktur könnte folgendermaßen aussehen (siehe Abb. 5-7):

¹⁶⁴ Der Standort der Batterien ist gleich, die Anforderungen an die Zuleitungen aber verschieden

¹⁶⁵ vgl. Internetquelle 38

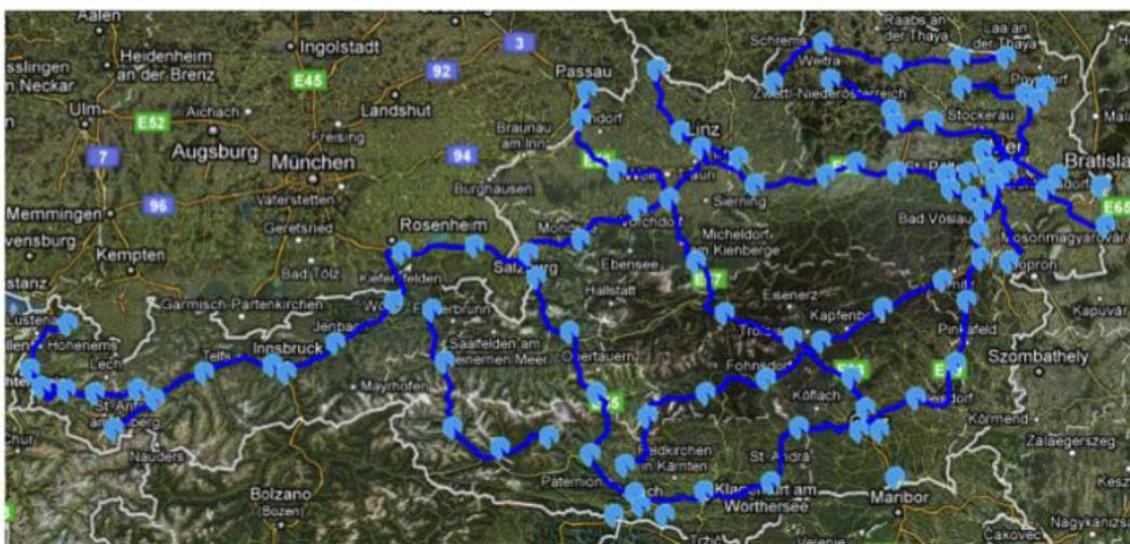


Abbildung 5-7: Batteriewechselstationen für Österreich [siehe Yudan (2011), S. 28]

Neben der Errichtung der Wechselstation selbst, muss jedoch auch die Netzkapazität für dieses System ausgelegt sein. Hierzu eine kurze Überschlagsrechnung (siehe Tab. 5-4):

Batteriekapazität	Ladeleistung	Ladedauer	Lagerstand ¹⁶⁶	Anschlussleistung
22 kWh ¹⁶⁷	5 kW	4h 24min	90	450 kW
	10 kW	2h 12min	45	450 kW
	20 kW	1h 06min	20	400 kW

Tabelle 5-4: Elektrischer Leistungsbedarf einer Batteriewechselstation

Die benötigte Dauerleistung beträgt daher mindestens 400 kW. Bei automatischen Wechselstationen kommt noch der Verbrauch für Robotersystem, Beleuchtung, Förderband, etc. hinzu. Dies ist bei der Dimensionierung der Zuleitungen jedenfalls zu berücksichtigen.

↳ Geschäftsmodelle

Neben dem Infrastrukturmodell mit Batterietausch hat das Projekt *Better Place* auch ein neuartiges Geschäftsmodell entwickelt. Während das Fahrzeug Eigentum des Kunden ist, gehören die Batterien dem Service Provider oder dem Fahrzeughersteller. Der Kunde tauscht bei einem Batteriewechsel daher nur eine Leihbatterie gegen eine andere. Die Anschaffungskosten werden dadurch stark reduziert. Für die Benützung der Ladeinfrastruktur zahlt man einen monatlichen Tarif, der je nach individueller Fahrleistung gestaffelt ist¹⁶⁸.

¹⁶⁶ vgl. Yudai u.a. (2009), S. 332f. (vgl. Abb. A-1 im Anhang)

¹⁶⁷ z.B.: Renault *Fluence Z.E.* [vgl. Internetquelle 39]

¹⁶⁸ vgl. Internetquelle 40.

Das Austauschsystem bietet noch weitere Möglichkeiten für den Betreiber. So könnte z.B.: über eine Ausstattung der Austauschvorrichtung mit RFID-Chips die Kundenbindung mithilfe intelligenter CRM-Systeme erhöht werden, welche zusätzliche Cross- und Upselling-Potenziale bieten. Aus den gewonnenen Daten könnten maßgeschneiderte Kundenangebote generiert werden. Es sind in diesem Zusammenhang jedoch die jeweils gültigen Datenschutzrichtlinien zu beachten.¹⁶⁹

↪ Kosten

Da Batteriewechselstationen bisher eigentlich auf Versuchsprojekte beschränkt blieben, ist eine seriöse Abschätzung der Kosten schwierig. *Better Place* gibt den Preis pro Station vorerst mit etwa \$500.000 (= 354.465€¹⁷⁰) an. Dies entspricht laut Firmengründer Shai Agassi etwa der Hälfte einer konventionellen Tankstelle¹⁷¹. In Israel hat die *Baran Group* mit *Better Place* Anfang 2011 einen Vertrag zu der Entwicklung und Produktion von 51 Stationen geschlossen, deren Wert ca. 40,2 Mio. € beträgt (Stückpreis folglich ca. €790.000) und die auch in anderen Modellregionen eingesetzt werden sollen¹⁷². In den weiteren Berechnungen werden diese beiden genannten Zahlen als Richtpreise angenommen.

Die Betriebs- und Wartungskosten sind bisher nicht bekannt, sollten jedoch aufgrund der anspruchsvollen Wechseltechnik auch berücksichtigt werden. Ein weiterer Kostenaspekt bei Wechselstationen sind die Batterien selbst. In Yudai u.a. (2009)¹⁷³ findet sich eine grobe Abschätzung, wie viele Batterien für definierte Ladezeiten auf Lager gehalten werden müssen, um den Kundenbedarf zu decken.

Aus diesen Daten lässt sich eine einfache Näherung für den finanziellen Aufwand eines flächendeckenden Netzes an Wechselstationen in Österreich angeben (siehe Tab. 5-5).

Für eine umfassende Ladeinfrastruktur sind zusätzlich noch die benötigten Ladestationen der privaten Haushalte und am Arbeitsplatz in die Gesamtkosten mit einzubeziehen. Bei gewerblichen Flotten könnten die Infrastrukturkosten durch eine optimierte Parameterwahl bei den Lagerkosten reduziert werden. Es werden jedoch immer mehr Batterien als Fahrzeuge für dieses Konzept benötigt.

¹⁶⁹ vgl. Wagner vom Berg u.a. (2010), S. 980.

¹⁷⁰ 1\$ = 0,70896€ (Stand 24.03.2011).

¹⁷¹ vgl. Internetquelle 41.

¹⁷² vgl. Internetquelle 42.

¹⁷³ vgl. Yudai u.a. (2009), S. 339.

Investitionskosten			
IK _{einzel,1}	355.000 €		
IK _{einzel,2}	790.000 €		
Batterie(Lager)kosten			
Batteriekapazität	22 kWh		
Ladeleistung	5 kW	10 kW	20 kW
Ladedauer	4h 24min	2h 12min	1h 06min
Lagerstand	90	45	20
Stückpreis ¹⁷⁴	11.000 €		
BK _{gesamt,j}	990.000 €	495.000 €	220.000 €
Anzahl der Stationen in Österreich			
	70 – 80		
Gesamtkosten (= (IK_{einzel,i} + BK_{gesamt,j}) * 75)			
mit IK _{einzel,1}	100,9 Mio. €	63,8 Mio. €	43,1 Mio. €
mit IK _{einzel,2}	133,5 Mio. €	96,4 Mio. €	75,8 Mio. €

Tabelle 5-5: Kostenabschätzung für Batteriewechselstationen in Österreich

↳ Ressourcenverbrauch

Die Verweildauer an der Wechselstation ist erheblich kürzer, als bei Ladestationen. Das erlaubt die Versorgung einer höheren Anzahl an Fahrzeugen bei geringem Flächenverbrauch¹⁷⁵. Es wären also relativ wenige öffentliche Ladestationen für die Versorgung notwendig, da die meisten Ladevorgänge ohnehin zu Hause oder am Arbeitsplatz getätigt werden.

↳ Nutzerprofile

Weil die Reichweite für einen Großteil der täglichen Fahrten ausreicht, werden Batteriewechselstationen eine untergeordnete Rolle für den Privatgebrauch spielen. Beobachtungen von *Better Place* bestätigen diese Annahme: nur etwa 20% der Ladevorgänge werden an der Wechselstation durchgeführt, die übrigen 80% an den Ladestationen. Das System erfüllt daher vorrangig zwei Aufgaben: erstens, den Kunden die Angst vor leeren Batterien zu nehmen und zweitens, als Ersatz für eine Heimpladestation (z.B.: in Wohngebieten ohne privaten Anschluss) zu dienen¹⁷⁶. Es werden folglich alle Nutzerprofile (privat, dienstlich, Freizeit, Pendler) davon Gebrauch machen, allerdings nur bis zu einem gewissen Ausmaß und je nach individuellen Bedarf.

¹⁷⁴ 500€ / kWh angenommen (vgl. Kap. 3.2.2).

¹⁷⁵ vgl. E-Connected (2010), S. 28.

¹⁷⁶ vgl. Yudan (2011), S. 6.

Für gewerbliche Flotten (Taxis, Zustelldienste,...) ist dieses Ladekonzept ein interessanter Ansatz. Besonders bei hoher Fahrzeugauslastung ist ein schneller Wechsel der Traktionsbatterie wünschenswert. Durch gleichbleibende Fahrmuster (z.B.: Tour eines Paketdienstes) können Ladeleistung bzw. Ladedauer angepasst und eine bestmögliche Ausnutzung der Anlage gewährleistet werden. Die Nachteile geringer Kompatibilität sind für Flotten von geringerer Bedeutung, da mit Festlegung auf wenige Fahrzeughersteller Skaleneffekte bei Betriebs- und Instandhaltungskosten zu erwarten sind.

5.2.4 Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte

Better Place ist bisher das einzige Unternehmen, welches Batteriewechselsysteme in seinen Modellregionen einsetzt. Allerdings liegt der Schwerpunkt dieser Projekte nicht auf alternativen Mobilitätskonzepten, sondern auf Elektromobilität als Ersatz konventioneller Fahrzeuge für private und gewerbliche Kunden (Taxis). Diese beiden Prinzipien sollen hier kurz erläutert werden¹⁷⁷:

Privatkunden – Bei diesen Modellregionen wird eine flächendeckende Infrastruktur, bestehend aus Ladestationen zu Hause, am Arbeitsplatz, sowie im (semi-) öffentlichen Raum (Parkgaragen, „Laternenparker“) und Batteriewechselstationen errichtet. Das größte Projekt läuft in Israel, welches aufgrund seiner Topographie¹⁷⁸ besonders gut für Elektromobilität geeignet ist und wegen der politischen Situation in der Region eine geringere Abhängigkeit von Erdöl anstrebt. Zielgruppe sind Privatkunden, sowie Unternehmen, die Firmenfahrzeuge elektrisch betreiben wollen. Der Kunde zahlt eine monatliche Gebühr, die uneingeschränkten Zugang zur Infrastruktur gewährt (Geschäftsmodell siehe unten). Die TCO sollen damit unter denen eines vergleichbaren konventionellen Fahrzeugs liegen. Weitere Projekte dieser Art gibt es in Australien, Dänemark und auf der Pazifikinsel Hawaii.

Gewerbliche Flotten – Projekte in Japan und Kalifornien (San Francisco Bay Area) dienen der Erprobung und Verbesserung der Technik für Batteriewechselstationen. Die Versuchsfahrzeuge sind Taxis, die ihre Akkus ausschließlich an den Wechselstationen austauschen. Besonders in Japan spielen Taxis eine große Rolle für die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Alleine in Tokio gibt es insgesamt ca. 60.000 davon. Das entspricht einem Anteil von 2% am gesamten Kfz-Bestand. Diese Versuchsprojekte sind allerdings recht klein und es sollen daraus hauptsächlich Erkenntnisse für den zukünftigen Betrieb gewonnen werden.

¹⁷⁷ vgl. Internetquelle 34.

¹⁷⁸ Entfernung zwischen den urbanen Zentren 150km; 90% der Fahrzeughalter fahren weniger als 70km/Tag.

5.2.5 Stakeholder

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten erfolgen Errichtung und Betrieb von Batteriewechselstation durch einen Service Provider, wie etwa *Better Place*. Es bestehen hohe technologische und wirtschaftliche Markteintrittsbarrieren, daher ist von einer entsprechenden Marktkonzentration (wenn nicht sogar Monopolisierung) auszugehen. Dies erleichtert zwar die Standardisierung der Schnittstelle, könnte jedoch innovationshemmend wirken. *Better Place* agiert hierbei als zentraler Ansprechpartner beteiligter Stakeholder, der die Infrastruktur bereitstellt und sich um Service und Wartung kümmert (siehe Abb. 5-8):

- ◆ Service Provider

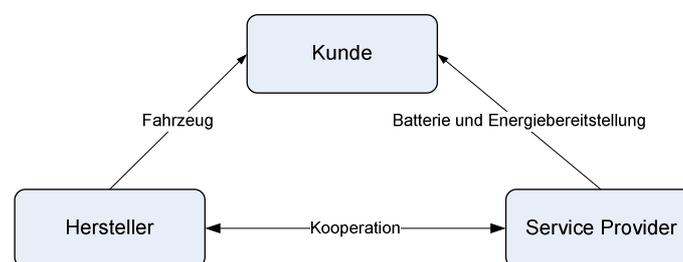


Abbildung 5-8: Stakeholder bei Better Place Geschäftsmodell

[vgl. Wallentowitz u.a. (2010), S. 165, eigene Bearbeitung]

Für andere Unternehmen wären Batteriewechselstationen eine Möglichkeit, ihren Kunden einen Mehrwert zu bieten und sich Wettbewerbsvorteile am Markt zu sichern. Beispiele dafür sind:

- ◆ Auto Vermietung: Flexibilitätserhöhung für den Kunden durch BWS
- ◆ Tankstelle: Zusätzliche Einnahmequelle
- ◆ Car-Sharing: Auch Kunden ohne Lademöglichkeit können Angebot nutzen
- ◆ Taxiunternehmen: Umweltfreundliche Mobilität, TCO evtl. geringer

Automatische Batteriewechselsysteme sind technisch komplex. Dadurch wären grundsätzlich gute Möglichkeiten für innovative Lösungen gegeben. Allerdings sind die hohe Marktkonzentration auf Betreiberseite, sowie eher geringe Stückzahlen (bedingt durch die hohen Kosten) als Hindernis für den Wettbewerb zu betrachten. Mögliche technische Stakeholder wären dennoch:

- ◆ Automobilindustrie, Batterietechnologie, Robotik, Elektrotechnik / Elektronik und Logistik (Ausgleichstransporte zwischen den Stationen)

5.2.6 Nutzwertanalyse und Szenariobewertung

Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Szenarioabhängig
Ergonomie	15%	10	1,5	Nein
Normung & Standardisierung	15%	2	0,3	Nein
Sicherheit	15%	10	1,5	Nein
Batterietechnologie	5%	3	0,15	Ja
Netzintegration	5%	9	0,45	Ja
Fahrzeugtechnik	5%	2	0,1	Nein
Integration in bestehende Infrastruktur	10%	9	0,9	Ja
Geschäftsmodelle	5%	7	0,35	Ja
Kosten	15%	5	0,75	Ja
Ressourcenverbrauch	5%	5	0,25	Ja
Nutzerprofile	5%	6	0,3	Nein
	100%		6,55	

Tabelle 5-6: Nutzwertanalyse - Batteriewechselstation

Nutzwertanalyse¹⁷⁹

Ein interessantes Konzept, der begrenzten Ladekapazität und den langen Ladezeiten von Batterien zu begegnen, stellen Batteriewechselsysteme dar. Die Bedienung von Kabeln und Stecker entfällt bei dieser Technik, der Wechsel erfolgt vollautomatisch und ist daher sehr ergonomisch (10 Punkte). Da der Kunde das Fahrzeug nicht verlassen muss, ist der Tankvorgang auch als absolut sicher (10 Punkte) zu betrachten. Probleme hinsichtlich der EMV sind nicht zu erwarten, weil eine räumliche Trennung von Laden und Wechseln der Akkumulatoren erfolgt. Wechselstationen sind aufgrund des Lagervorrats an Batterien mit aggregierten Netzinfrastrukturen vergleichbar und ermöglichen dadurch größere Pufferspeicher für die zukünftige Netzintegration (9 Punkte).

Für Fahrzeughersteller erscheinen BWS allerdings nicht sinnvoll, da sie die Gestaltungsfreiheit bei der Fahrzeugkonstruktion (2 Punkte) stark einschränken. Normierte Batterien (3 Punkte) im Fahrzeugboden nehmen starken Einfluss auf das „Packaging“ und die fahrdynamischen Eigenschaften. *Better Place* verspricht zwar, mehrere Batterietypen zu unterstützen¹⁸⁰, allerdings erhöhen sich dadurch die logistische Komplexität des Systems und damit auch die Kosten (5 Punkte) erheblich. Auch eine Normierung der

¹⁷⁹ Die jeweilige Bewertung der Kriterien wird in Klammern () angegeben.

¹⁸⁰ vgl. Yudan (2011), S.12.

Batterieabmessungen ist nicht in Sicht (2 Punkte), nur bei den Zellenparametern hat man sich bisher auf einheitliche Standards geeinigt¹⁸¹.

Daraus ergibt sich ein Gesamtnutzwert von 6,55 Punkten. Die Vorteile (Ergonomie, Sicherheit,...) können dabei die fehlende – jedoch zwingend notwendige – Standardisierung der Batterien für eine massentaugliche Anwendung nicht ausreichend kompensieren. Für Flotten, die einen sehr homogenen Fuhrpark aufweisen (z.B.: Taxis) stimmt diese Aussage nicht. Sie wären daher eine mögliche Zielgruppe für das Konzept.

Auf dem Massenmarkt ist *Better Place* vorerst der einzige Anbieter. Ob die Vorteile des Konzepts die Kunden überzeugen und sie die fehlende Standardisierung akzeptieren werden, ist allerdings offen.

Szenarienbewertung

Reine Batteriewechselstationen bedürfen hohen Investitionskosten und müssen in ausreichender Zahl vorhanden sein, um die flächendeckende Versorgung der Kunden gewährleisten zu können. Bei geringer Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen erscheint eine erfolgreiche Umsetzung dieses Konzepts daher nicht so leicht möglich. Das bislang einzige Unternehmen, welches dieses Konzept verfolgt, *Better Place*, bemüht daher das Bild von Insellösungen, die in sich geschlossen sind und daher nur lokal auf eine gewisse Menge an Fahrzeugen angewiesen sind.

Für Szenario A1 könnten Batteriewechselsysteme einen gewissen Marktanteil erreichen, da mit einem diversifizierten Marktangebot zu rechnen ist. Mit BWS existiert heute bereits eine technisch machbare Lösung, auch größere Distanzen problemlos zu bewältigen. Dies könnte ein entscheidender strategischer Vorteil im Wettbewerb sein. Betrachtet man den Unterschied zwischen dem Marktanteil ohne (A3) und mit (A1) einem funktionierenden Elektrotankstellennetz sind daraus Schlüsse auf das konkrete Absatzpotenzial möglich.

Nischenanwendungen (z.B.: Flottenverkehr) könnten dazu beitragen, den Aufbau einer gewissen Infrastruktur zu fördern. Für die alleinige Versorgung von Elektrofahrzeugen sind BWS nicht geeignet, da die logistische Komplexität zu hoch wäre. Sie sind eher als Ergänzung für konduktive Ladestellen zu Hause oder am Arbeitsplatz zu verstehen und stehen daher in direkter Konkurrenz zur Schnellladetechnik.

¹⁸¹ vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2010), S. 30.

5.3 Induktives Laden

5.3.1 Konzept

Induktive Ladesysteme übertragen den Strom kontaktlos. Energie kann grundsätzlich auch optisch, kapazitiv, mechanisch oder durch elektromagnetische Wellen drahtlos übertragen werden, jedoch sind die für ein Elektrofahrzeug benötigten Ladeleistungen nur durch induktive Systeme realistisch darzustellen.¹⁸²

Das Prinzip der Induktivität wird auch bei Transformatoren angewendet, von denen sich dieses Ladesystem technisch ableiten lässt. Die Energieübertragung erfolgt über zwei Spulen, die über ein Magnetfeld miteinander gekoppelt sind¹⁸³. Die Primärspule erzeugt durch Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung und den damit verbundenen Stromfluss ein magnetisches Wechselfeld, welches wiederum in der Sekundärspule eine Wechselspannung und damit einen Wechselstrom induziert. Die zum Einsatz kommenden Übertragungsfrequenzen beginnen bei etwa 20-25 kHz und werden nach oben durch den Funkfrequenzbereich, sowie die zu Verfügung stehende Leistungselektronik begrenzt.¹⁸⁴

Die Güte der magnetischen Kopplung ist abhängig von der Anordnung und Geometrie der beiden Spulen. Je geringer das Verhältnis Luftspalt zu Spulendurchmesser ist, desto besser die Kopplung. Als ideal sind zwei deckungsgleiche Spulen mit geringem Luftspalt anzusehen. Dies konnte beispielsweise bei elektrischen Zahnbürsten durch Formschluss bei Stationär- und Mobilteil realisiert werden.¹⁸⁵ Als Folge der losen Kopplung über den Luftspalt, entstehen sog. Streuinduktivitäten, durch deren großen induktiven Widerstand die Blindleistung des Systems erheblich ansteigt und sich daher nur eine geringe Spannung in der Sekundärspule einstellt. Um dem entgegenzuwirken, werden sekundärseitig Kondensatoren parallel oder in Reihe geschaltet, die einen Schwingkreis bilden. Ist dieser in Resonanz zur Betriebsfrequenz, wird die Wirkung der Induktivitäten aufgehoben¹⁸⁶. Für den schematischen Aufbau siehe Abb. 5-9:

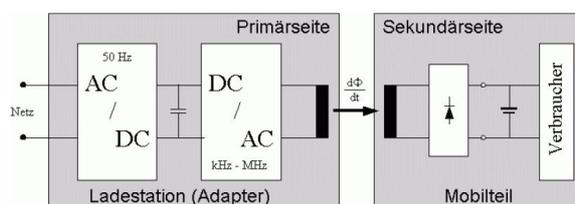


Abbildung 5-9: Blockschaltbild eines induktiven Ladegerätes [siehe Wiesspeiner (2005), S. 2]

¹⁸² vgl. Wiesspeiner (2005), S. 1.

¹⁸³ Bei Transformatoren liegen Primär- und Sekundärspule auf einem gemeinsamen Ferritkern.

¹⁸⁴ vgl. Schedler (2009), S. 6ff.

¹⁸⁵ vgl. Wiesspeiner (2005), S. 2.

¹⁸⁶ vgl. Schedler (2009), S. 12f.

Induktive Ladesysteme kommen heute bereits in vielen Bereichen zur Anwendung: in der mobilen Fördertechnik¹⁸⁷ und anderen Bereichen des Maschinenbaus, in der Unterhaltungselektronik, der Medizintechnik (z.B.: Herzschrittmacher), sowie bei elektrischen Zahnbürsten.¹⁸⁸

Für Elektromobilität ist wegen der zu übertragenden Leistung auf die Dimensionierung des Gesamtsystems zu achten, die sich an den Abmessungen eines Fahrzeugs orientiert. Die Deckfläche von Primär- und Sekundäreinheit liegt im Bereich von etwa 60x60 cm² mit Luftspalten in der Größe von 10-20 cm. Das Zusatzgewicht auf Fahrzeugseite beträgt ca. 15 kg. Die angegebenen Werte sind für Anschlussleistungen bis ca. 3,7 kW¹⁸⁹ gültig. Durch den Einsatz mehrerer Spulen wären Leistungen bis 11,1 kW realisierbar, diese stellen aber sehr hohe Anforderungen an die Leistungselektronik und erfordern sorgfältige Maßnahmen für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Der Wirkungsgrad der Stromübertragung hängt stark von der Qualität und Kopplung der Spulen ab, sowie von der verwendeten Frequenz. Allgemein ist der Gesamtwirkungsgrad induktiver Systeme geringer als der kabelgebundener Lösungen und beträgt ca. 80%. Für den Einsatz von Induktion zur Ladung von Elektrofahrzeugen gibt es zwei verschiedene Konzepte¹⁹⁰:

Stationär – Das Fahrzeug wird während dem Ladevorgang abgestellt und bewegt sich nicht. Die Primärspule kann entweder in oder auf der Straße verlegt werden, zusätzlich gibt es Konzepte, den Abstand zwischen den Spulen durch eine mechanische Konstruktion zu verringern. Der Wirkungsgrad des Systems verbessert sich dadurch nur bedingt¹⁹¹, allerdings steigt der Wartungsaufwand erheblich.

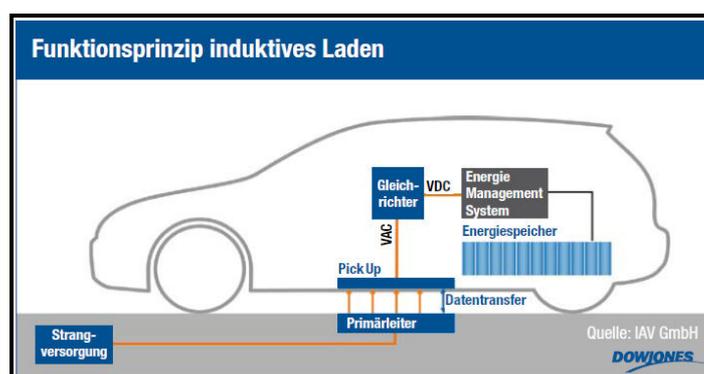


Abbildung 5-10: Funktionsprinzip einer stationären induktiven Ladestation [siehe Ulucay (2010), S. 1]

¹⁸⁷ Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

¹⁸⁸ vgl. Wiesspeiner (2005); Schedler (2009).

¹⁸⁹ Entspricht der Anschlussleistung einer Haushaltsteckdose mit 230V/16A

¹⁹⁰ vgl. Schraven u.a. (2010), S. 6ff.

¹⁹¹ Die Kopplung ändert sich bis zur Hälfte des Durchmessers der kleineren Spule kaum.

Dynamisch – Das Fahrzeug wird durch Linienleiter in oder auf der Straße während der Fahrt geladen. Dieses Konzept dient der Reichweitenverlängerung und soll parallel zu stationären Ladestationen auf den Hauptverkehrsverbindungen (z.B.: Autobahnen) eingesetzt werden. Mit dem flächendeckenden Einsatz dieser Technik für den Individualverkehr ist kurz- und mittelfristig aus technischen und wirtschaftlichen Gründen (siehe unten) jedoch nicht zu rechnen und wird daher in den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt.

♦ Technisch

- ♦ Geringe übertragbare Leistungen
- ♦ Erforderliche Anschlussleitung bei gleichzeitiger Ladung mehrerer Fahrzeuge
- ♦ Elektrische Sicherheit, EMV
- ♦ Wirkungsgradverluste durch ungenaue Positionierung und Luftspaltänderungen aufgrund von Fahrbahnebenheiten

♦ Wirtschaftlich

- ♦ Material und Verlegung der Linienleiter
- ♦ komplexe Abrechnungssysteme
- ♦ Anschluss der Fahrbahnen ans Stromnetz,
- ♦ Regelmäßige Anordnungen zur Blindleistungskompensation
- ♦ Elektrifizierung der Hauptverkehrsverbindungen für ausreichende Versorgung notwendig



Abbildung 5-11: Funktionsprinzip für dynamisches induktives Laden [siehe Internetquelle 43]

Bereits in den neunziger Jahren sammelten Fahrzeughersteller die ersten größeren Erfahrungen mit dieser Ladetechnik in Kalifornien. Eine induktive Lösung war der Standard für dortige Elektrofahrzeuge, jedoch in abgewandelter Form. Die Kopplung zwischen Ladestation und Fahrzeug erfolgte nicht über eine Steckerverbindung, sondern über ein sog.

„Paddle“ mit Induktionsspule, welches an einem Kabel hing. Vorteile gegenüber konduktiven Steckern war vor allem die Betriebssicherheit bei allen Witterungsbedingungen (Regen, Schnee, Staub,...). Die Ladeleistung betrug zwischen 1,5-25 kW bei einer Übertragungsfrequenz von 40-350 kHz. und einem Wirkungsgrad von ca. 90%.¹⁹²

5.3.2 Technologische Anforderungen

↳ Ergonomie

Eines der wichtigsten Argumente für induktive Systeme ist der erheblich gesteigerte Komfort beim Ladevorgang gegenüber konduktiven Lösungen (siehe Tab. 5-7):

Konduktiv ¹⁹³	Induktiv
Manueller Vorgang (Ankunft/Abfahrt, Fahrzeug & Ladestation)	Automatischer Vorgang
Ladestationen teilweise nicht überdacht – Durchführung bei jedem Wetter	
Verbindungsmaterial im Fahrzeug. Mitgeführt	Verbindungsmaterial entfällt
Verbindungsmaterial liegt teilweise auf dem Boden – Nässe, Schmutz, Eis,...	
Vandalismusgefahr	Vandalismussicher durch Integration der Primärspule in den Straßenbelag

Tabelle 5-7: Ergonomischer Vergleich induktiver und konduktiver Ladesysteme

Eine Untersuchung von Nissan zeigt, dass potentielle Kunden von Elektrofahrzeugen die Ladevorgänge als unpraktisch und langwierig empfinden und daher scheuen¹⁹⁴. Dies wurde auch im Rahmen von Pilotprojekten (BMW/E.ON) beobachtet¹⁹⁵. Induktive Ladestationen erhöhen folglich die Kundenakzeptanz von Elektromobilität.

↳ Normung & Standardisierung

Die Normen für induktive Systeme sind noch nicht so weit fortgeschritten, wie die konduktiven. Über technische Parameter der Übertragungstechnik haben beteiligte Unternehmen (Fahrzeughersteller, Zulieferer, etc.) und Institute im Jahr 2010 im Rahmen eines Normungskreises der DKE bereits diskutiert und erste Details festgeschrieben¹⁹⁶. Der daraus abgeleitete Normungsvorschlag 69/178/NP: *Electric Vehicle Inductive Charging*

¹⁹² vgl. Chan u.a. (1997), S. 10f.

¹⁹³ vgl. Reker (2010), S.94.

¹⁹⁴ vgl. Fette (2011), S. 22.

¹⁹⁵ o.V.: Drahtlos und Mobil, in: TÜV Süd Journal 4/2010, S. 25.

¹⁹⁶ vgl. Fette (2011), S. 22.

Systems beschränkt sich vorerst auf die stationäre Anwendung. Er schließt die Möglichkeit der Rückspeisung ins Stromnetz explizit ein und ist Diskussionsgrundlage für die spätere Norm IEC 61980-1 (ab 2013)¹⁹⁷. Bis die verschiedenen Systeme vollständig miteinander kompatibel sein werden, ist nach Expertenmeinung allerdings „noch viel zu tun“¹⁹⁸.

Die Festlegung auf eine international gültige Norm wird weitere Zeit in Anspruch nehmen. Derzeit existieren Projekte für Induktionsladung auch noch in den USA, Japan und Neuseeland, mit jeweils eigenen Systemen.

↳ Sicherheit

Bei der kontaktlosen Übertragung von Strom sind sicherheitsrelevante Aspekte des Systems zu berücksichtigen. Eine Gefährdung des Menschen durch Stromschlag muss deshalb ausgeschlossen werden können. Die stationären Komponenten sind geerdet, die mobilen erfordern eine Schutztrennung, sowie Schutz gegen elektrostatische Entladung. Gefährliche Berührungsspannungen werden durch einen Potenzialausgleich (über den Fahrzeugrahmen) der einzelnen elektrischen Betriebsmittel im Mobilteil verhindert, elektrostatische Entladungen durch geeignete Maßnahmen zur Ableitung (leitfähige Bürsten, Laufrollen oder Bodenbeläge) ausgeschlossen. Eine (temporäre) elektrische Verbindung zur Erde ist bei ruhendem Mobilteil möglich.¹⁹⁹

Generell gilt, dass die elektrische Sicherheit gegenüber konduktiven Systemen höher ist, da keine leitenden Materialien direkt miteinander in Kontakt kommen (keine Funkenbildung). Allerdings können externe Metallteile während der Ladung durch das Magnetfeld stark erhitzt werden, sodass Brandgefahr besteht. Dies kann durch entsprechende Dimensionierung des Gesamtsystems ausgeschlossen werden.²⁰⁰

Einen wichtigen Aspekt für den flächendeckenden Einsatz dieser Technik stellt die EMV des Systems dar. Die Grenzwerte für magnetische Felder sind im öffentlichen Bereich wesentlich geringer, als in der Industrieanwendung (siehe Abb. 5-12), jedoch über die Ausgestaltungsmerkmale der Ladestation beherrschbar. Neben der Verwendung von Ferriten zur Feldlinienführung können andere metallische Bauteile (z.B.: Fahrzeugunterboden) die Umgebung gezielt gegen das magnetische Feld abschirmen²⁰¹. Ungerichtete elektromagnetische Strahlung, wie etwa bei Mobiltelefonen, wird es bei induktiven Ladesystemen nicht geben.²⁰²

¹⁹⁷ vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2010), S. 34.

¹⁹⁸ Reker, Ulrich (zit. nach: Fette (2011), S. 23).

¹⁹⁹ vgl. Schedler (2009), S. 64f.

²⁰⁰ vgl. Reker (2010), S. 99.

²⁰¹ vgl. Reker (2010), S. 98f.

²⁰² vgl. Fette (2011), S. 24.

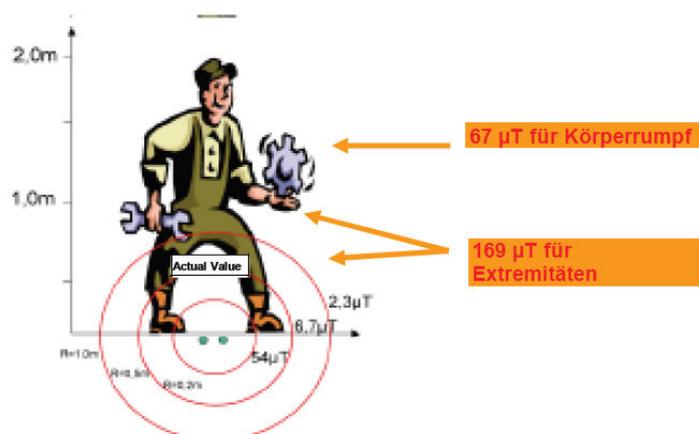


Abbildung 5-12: EMV-Grenzwerte im Industriebereich [siehe Reker (2010), S. 98]

Messungen haben gezeigt, dass entsprechend der gültigen Normen und Richtlinien in der Industrie keine gesundheitliche Gefährdung für den Menschen, auch bei dauerhafter Belastung, ausgeht. Schutzmaßnahmen müssen allerdings für Personen mit „aktiven“ Körperhilfen (z.B.: Herzschrittmacher) getroffen werden: diese sollten einen gewissen Mindestabstand einhalten, daher ist für eine entsprechende Beschilderung der Ladestation zu sorgen.²⁰³

↳ Batterietechnologie

Für induktive Ladesysteme kommen alle bekannten Batterieformen in Frage, allerdings sind prinzipbedingt Modifikationen des Gesamtsystems notwendig (Batterie, Wechselrichter und Spule), die zu erhöhten Kosten gegenüber kabelgebundenen Ladesystemen führen²⁰⁴. Aufgrund der ergonomischen Vorteile werden Ladevorgänge bei induktiven Ladesystemen häufiger durchgeführt. Dadurch können einerseits schädliche Tiefentladungen der Akkumulatoren verhindert und die Lebensdauer verlängert werden, andererseits sind damit auch geringere Batteriekapazitäten nötig (da öfter geladen wird) mit entsprechenden Gewichts- und Kostenvorteilen auf Fahrzeugsseite.

↳ Netzintegration

Induktive Ladesysteme sind grundsätzlich dazu fähig, die Netzintegration erneuerbarer Energien zu unterstützen, jedoch mit gewissen Einschränkungen. Durch den verbesserten Komfort ist damit zu rechnen, dass öfter geladen wird und damit die Batteriekapazitäten öfter verfügbar sein werden. Das V2G-Konzept erfordert allerdings auch die Rückspeisung der Energie in das Netz, die zwar technisch möglich, jedoch mit höheren energetischen Verlusten als das Aufladen selbst verbunden ist. Eine Anwendung dieser Technik erscheint daher erst sinnvoll, wenn die Übertragung insgesamt einen besseren Wirkungsgrad

²⁰³ vgl. Schedler (2009), S. 64.

²⁰⁴ vgl. Mathias, Michael (zit. nach: Ulucay (2010), S. 2).

aufweist. Eine gezielte Steuerung der Netzlast (z.B.: Laden bei Angebotsüberschuss) kann aufgrund geringer Anschlussleistung und langer Standzeiten an der Ladestation aber auch mit dem Induktivkonzept realisiert werden²⁰⁵. Die Bedeutung für die Netzintegration in der Markteinführungsphase ist aufgrund der wenigen Ladestationen dennoch als gering einzuschätzen.

↳ Fahrzeugtechnik

Für die Integration der Ladetechnik in das Fahrzeug gibt es bisher drei verschiedene Ansätze:

Induktiver Stecker – Das von der Fa. *Hughes Power Control* entwickelte induktive „Paddle“ war bei den Elektrofahrzeugen in Kalifornien zwischen 1990 und 2000 der Standard. Die Spule ist dabei in einen etwa handgroßen Stecker (siehe Abb. 5-13), aus Kunststoff integriert, der in eine passende Anschlussbuchse auf Fahrzeugseite eingebracht wird, um den Strom zu übertragen. Vorteile des Systems waren vor allem die Witterungsbeständigkeit und das fahrzeugseitig geringe Gewicht der Einheit. Der ergonomische Vorteil des kabellosen Ladens entfällt jedoch.²⁰⁶



Abbildung 5-13: Induktives „Paddle“ (*Hughes Power Control*) [siehe Internetquelle 44]

Induktive Matte (Platte) – Das von der Fa. *SEW Eurodrive* vorgestellte Konzept besteht aus Übertragungsmatten, die auf der Primärseite in den Straßenbelag integriert sind und auf der Sekundärseite in den Fahrzeugboden eingelassen werden. Der Ladevorgang startet automatisch, sobald das Fahrzeug parkt und sich autorisiert. Die Elektronik im Boden erkennt die Position des Elektrofahrzeugs und tauscht die notwendigen Informationen ebenfalls kontaktlos, z.B.: über WLAN, aus. Die Firmen *VAHLE*²⁰⁷ und *Conductix Wampfler* haben dieses Konzept ebenfalls im Angebot.²⁰⁸

²⁰⁵ vgl. Schraven u.a. (2010), S. 7

²⁰⁶ vgl. Chan u.a. (1997), S. 10f.

²⁰⁷ In Kooperation mit *Audi* und *Volkswagen (VW)*

²⁰⁸ vgl. Fette (2011), S. 22f.



Abbildung 5-14: Induktive Matte (SEW Eurodrive) [siehe Internetquelle 45]

Spule im Nummernschild - VAHLE hat in Kooperation mit der Fa. Kostal einen Prototyp entwickelt, bei dem die Sekundärspule hinter dem vorderen Nummernschild des Fahrzeugs integriert ist. Um zu laden, wird frontal an die Ladestation gefahren (ein Puffer erlaubt eine leichte Berührung ähnlich wie bei Schienenfahrzeugen). Danach beginnt die Stromübertragung. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass Fahrzeughersteller ein kleines Bauteil an einem Platz einbauen können, wo leicht umgerüstet werden kann.²⁰⁹



Abbildung 5-15: Primärspule hinter dem Nummernschild (VAHLE/Kostal) [siehe Internetquelle 47]

5.3.3 Ökonomische und organisatorische Anforderungen

↳ Integration in bestehende Infrastruktur

Weder in privaten Haushalten, noch im öffentlichen Bereich gibt es derzeit Hochfrequenz-Hochenergie-Spulen, Steckdosen sind hingegen weit verbreitet und leicht zugänglich, auch wenn sie nicht alle Anforderungen an effizientes Laden erfüllen (vgl. Kap. 5.1). Induktive Ladestationen müssen erst mit entsprechendem Aufwand errichtet werden. Zusätzlich zur Primäreinheit im Straßenbelag muss auch ein System für die Kommunikation mit dem Fahrzeug bzw. für die Abrechnung installiert, sowie das Stromnetz entsprechend ausgebaut

²⁰⁹ vgl. Internetquelle 46.

werden²¹⁰ Das System ist praktisch wartungsfrei und gut geschützt gegen Vandalismus, was vor allem im öffentlichen Bereich wichtig ist. Aufgrund der begrenzten Ladeleistungen sind induktive Systeme nicht für Schnellladekonzepte geeignet. Die dynamische Ladung hat aus heutiger Sicht noch den Status einer Vision, sodass deren Einsatz mittelfristig nicht zu erwarten ist.²¹¹

In Hinblick auf die Lebenszykluskosten könnten induktive Systeme günstiger sein, da Innovationen vor allem im Bereich der magnetischen Kopplung zu erwarten sind, also vorrangig der Sekundäreinheit (Fahrzeug). Die Primärspule (Infrastruktur) kann dabei unverändert bleiben, womit eine längere Betriebsdauer angenommen werden kann.

↳ Geschäftsmodelle

Da sich induktive Ladesysteme noch in der Entwicklungsphase befinden, gibt es derzeit keine expliziten Geschäftsmodelle für diese Technik. Jedoch müssten zukünftige Modelle versuchen, die deutlichen Mehrkosten der Installation gegenüber konduktiven Systemen zu kompensieren, z.B. über Miet- oder Leasingmodelle, die die Investition adäquat diskontieren.

↳ Kosten

Neben der technischen Realisierbarkeit, sind vor allem die Systemkosten induktiver Ladung von Interesse. Laut Herstellerangaben liegen die Anschaffungskosten für ein stationäres Übertragungssystem mit 3,7 kW Anschlussleistung in einer Spanne von 3.500 – 18.000€. Durch Skaleneffekte und Lernkurven kann von einer Halbierung der Kosten bis 2030 ausgegangen werden. Je nach Art der Zugänglichkeit, Anschlussleistung und Abrechnungsmodus können verschiedene Ladeszenarien unterschieden werden (siehe Abb. 5-16):

Ladeinfrastruktur	Abrechnung	Anschlussleistung (max.)	Strommehrkosten (in c€/kWh)	
			Konduktiv	Induktiv
Privat	Nein	3,7 kW	1,0	20,0 – 38,0
	Ja	11 kW oder 22 kW	5,3 – 6,4	
Halb-öffentlich	Nein	11 kW oder 22 kW	3,3 – 5,1	16,0 – 31,0
	Ja	11 kW oder 22 kW	4,4 – 7,3	18,0 – 33,0
Öffentlich	Ja	11 kW oder 22 kW	4,2 – 10,8	19,0 – 34,0
		43 kW	6,1 – 13,2	

Angelehnt an Kley et al. (2010)

Abbildung 5-16: Strommehrkostenvergleich induktiver und konduktiver Ladesysteme

[siehe Schraven u.a. (2010), S. 14]

²¹⁰ vgl. Schraven u.a. (2010), S.1ff.

²¹¹ vgl. Hoberg u.a. 2010, S. 66.

Die betrachteten Strommehrkosten umfassen neben der Anschaffung auch den Betrieb der Ladestation, sowie die Mehrkosten aufgrund des geringeren Übertragungswirkungsgrades. Im direkten Vergleich mit dem Laden per Kabel erweist sich die kontaktlose Stromübertragung in allen Szenarien als teurer. Eine größere Anzahl an Fahrzeugen (d.h. höhere Auslastung) pro Ladestation verteilt die zusätzlich anfallenden Kosten besser und verringert die Differenz. Da die meisten Ladevorgänge jedoch im privaten Bereich zu erwarten sind, kann aufgrund der Kosten von einer begrenzten Anwendung induktiver Systeme in Nischen ausgegangen werden, in denen der Kunde bereit ist für den Mehrwert dieser Lösung entsprechend zu bezahlen (z.B.: Taxiunternehmen).²¹²

↳ Ressourcenverbrauch

Positiv ist dieses Ladekonzept bezüglich dem Flächenverbrauch der benötigten Infrastruktur zu bewerten. Da die Induktionsspulen (Primäreinheit) in den vorhandenen Straßenbelag integriert werden sollen, entsteht kein zusätzlicher Raumbedarf. Auch von ästhetischen Gesichtspunkten sind induktive Systeme Ladesäulen vorzuziehen, die sich bei entsprechend großer Zahl negativ auf das Stadtbild auswirken würden.²¹³

Der Grad der Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeugs wird durch den Verbrauch bzw. die CO₂-Emissionen bestimmt. Die *Well-to-Wheel* Analyse (vgl. Kap. 2.2) betrachtet hierbei den Energieeinsatz der gesamten Wertschöpfungskette und damit auch den Wirkungsgrad der Ladeinfrastruktur. Aktuell erreichen induktive Systeme einen Wirkungsgrad von etwa 80% und sind weniger Effizient als konduktive Lösungen²¹⁴.

↳ Nutzerprofile

Eine weit verbreitete Anwendung induktiver Ladestationen für private Nutzer ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen. Bei Kundenzielgruppen, die wenig preissensibel sind und Alleinstellungsmerkmale bei einem Produkt suchen (z.B.: Luxussegment) ist der Einsatz drahtloser Stromübertragung aber durchaus denkbar.

Für dienstliche und geschäftliche Fahrten, insbesondere gewerbliche Flotten, sowie den innerbetrieblichen Werksverkehr sind induktive Systeme gut geeignet, da die Mehrkosten durch die hohe Auslastung der Betriebsmittel begrenzt bleiben und einen erhöhten Mehrwert betreffend Benutzerfreundlichkeit bieten. Diese Nutzergruppe zeichnet sich durch ein sehr homogenes tägliches Fahrprofil aus – meist dieselben Strecken mit regelmäßigen kurzen Stopps, die zur Ladung des Fahrzeugs genutzt werden können. Wird das Fahrzeug tagsüber nicht vollständig geladen, kann zusätzlich eine Ladung über Nacht erfolgen.²¹⁵

²¹² vgl. Schraven u.a. (2010), S. 10ff.

²¹³ vgl. Ulucay (2010), S. 2.

²¹⁴ Wirkungsgrad ca. 95%

²¹⁵ vgl. Schraven u.a (2010), S.14f.

5.3.4 Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte

Ähnlich dem Konzept der Batteriewechselsysteme, können die entstehenden Mehrkosten für die Anschaffung durch eine höhere Auslastung der Anlage, zumindest teilweise, kompensiert werden. Induktion ist daher für gewerbliche Flotten (Kunden-/Lieferdienst, Taxis, etc.) aber insbesondere auch für den ÖPNV interessant. Die Elektrifizierung dieser Nutzergruppen ist ein wichtiger Bestandteil für ein nachhaltiges Verkehrssystem, vor allem im urbanen Bereich. Ergonomische Aspekte des Ladesystems sind für diese Kundengruppe wichtig, da es zu häufigen Ladevorgängen im Betrieb kommt, Kabel und Stecker werden diesen Anforderungen nur bedingt gerecht. In verschiedenen Modellprojekten wird daher der praxistaugliche Einsatz von Induktion getestet²¹⁶:

Turin/Genua – Die Fa. *Conductix Wampfler* hat jeweils zwei Elektrobusse im öffentlichen Nahverkehr im Einsatz, die mit der induktiven Methode geladen werden. Die Teststrecke beträgt etwa 8km, täglich von 7 bis 20 Uhr. Da Länge und Beschaffenheit der Route immer gleich bleiben, sind die Batterien kleiner dimensioniert. An den Wendepunkten befinden sich die Ladestationen, bei denen ausreichend Strom für die nächste Tour nachgeladen werden kann.

Aachen – Ab September 2011 beginnt ein Flottenversuch mit Elektrotaxis, die am Bahnhof und einem weiteren Standort induktiv aufladen können. Zu einem späteren Zeitpunkt könnten sog. Ladespuren an den Taxiständen verlegt werden, sodass die Standzeiten auch ohne präzises Einparken für das Laden des Fahrzeugs genutzt werden kann.

Starnberg – *TÜV Süd* und *E.ON* testen eine induktive Ladestation um gemeinsam Standards für den sicheren Betrieb zu erarbeiten, Fragen der EMV zu klären, sowie induktive Ladesysteme serienreif zu machen. Die Wahl des Versuchsfahrzeugs (Transporter mit offener Ladefläche) ist Hinweis auf eines der möglichen zukünftigen Einsatzgebiete.

Korea – In Seoul hat das *Korea Institute of Science and Technology* (KAIST) den Testbetrieb eines Elektrofahrzeugs (OLEV - *On-line Electric Vehicle*) in einem Freizeitpark nahe der Hauptstadt aufgenommen, welches durch Induktionsspulen unter der Fahrbahnoberfläche dynamisch geladen wird und die bisherigen Dieselfahrzeuge ersetzt. Auf der insgesamt 2,2km langen Rundstrecke gibt es vier Ladeabschnitte, die zusammen 372,5m ausmachen. Der erzielte Wirkungsgrad bei der Stromübertragung liegt dabei bei ca. 74%²¹⁷. Die Ergebnisse dieses Projekts dienen unter anderem als Grundlage für die spätere Elektrifizierung des ÖPNV in Seoul.

²¹⁶ vgl. Ulucay (2010); Fette (2011); Internetquelle 48, 49.

²¹⁷ Die koreanische Gesetzgebung schreibt einen Luftspalt > 12cm vor. Im Versuchsprojekt beträgt dieser 13 cm.

5.3.5 Stakeholder

Im Gegensatz zu anderen Ladekonzepten ist die kontaktlose Stromübertragung noch nicht als serienreif anzusehen. Sowohl Automobilhersteller als auch Infrastrukturbetreiber zeigen zwar großes Interesse, haben aber keine besondere Priorität für diese Technik. Da die Kosten gegenüber den üblichen Ladesäulen höher sind, muss ähnlich wie bei Batteriewechselsystemen eine Art Provider die Infrastruktur zu Verfügung stellen:

- ◆ Service Provider (Netzbetreiber)

Für gewisse Nutzergruppen ist der ergonomische Mehrwert induktiver Ladesysteme als sehr hoch einzuschätzen, sodass mit einer größeren Verbreitung in diesen Nischen gerechnet werden kann

- ◆ Taxiunternehmen Fahrer muss vor Fahrtantritt nicht aussteigen
- ◆ Werksverkehr geringe Distanzen, lange Standzeiten, gleichbleibende Wege
- ◆ Automobilhersteller Produktdifferenzierung im Premiumsegment
- ◆ ÖPNV konstante Wegstrecke, regelmäßige Lademöglichkeit
- ◆ Shuttle-Dienste definierte Route, Lademöglichkeit bei Start und Ziel

Auf Herstellerseite ist wegen des spezifischen Know-Hows eine hohe Marktkonzentration festzustellen. Die gesundheitlichen Risiken durch elektromagnetische Strahlung erfordern zudem eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung mit nationalen oder regionalen Zertifizierungsbehörden für den sicheren Betrieb der Produkte.

- ◆ Hersteller

- ◆ VAHLE
- ◆ Conductix Wampfler
- ◆ SEW Eurodrive
- ◆ IAV GmbH (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr)

- ◆ Normung, Sicherheit

- ◆ VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.)
- ◆ DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik)
- ◆ TÜV (Technischer Überwachungsverein)
- ◆ Etc.

5.3.6 Nutzwertanalyse und Szenariobewertung

Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Szenarioabhängig
Ergonomie	15%	10	1,5	Nein
Normung & Standardisierung	15%	6	0,9	Nein
Sicherheit	15%	7	1,05	Nein
Batterietechnologie	5%	9	0,45	Ja
Netzintegration	5%	2	0,1	Ja
Fahrzeugtechnik	5%	6	0,3	Nein
Integration in bestehende Infrastruktur	10%	7	0,7	Ja
Geschäftsmodelle	5%	1	0,05	Ja
Kosten	15%	7	1,05	Ja
Ressourcenverbrauch	5%	9	0,45	Ja
Nutzerprofile	5%	5	0,25	Nein
	100%		6,8	

Tabelle 5-8: Nutzwertanalyse – Induktive Ladesysteme

Nutzwertanalyse²¹⁸

Der entscheidende Vorteil kontaktloser Stromübertragung ist, dass der Ladevorgang ergonomisch (10 Punkte) ohne Nutzereingriff stattfinden kann und daher auch bei kurzen Stopps geladen wird. Die übertragbaren Leistungen sind allerdings begrenzt. Dieses Konzept eignet sich somit nicht für Schnellladen bzw. kurzfristige Reichweitenverlängerung, z.B.: auf Autobahnen. Das ideale Anwendungsgebiet ist im öffentlichen Bereich, da das System platzsparend in den Straßenbelag integrierbar und vor Vandalismus geschützt ist. Durch die geringen Abmessungen und Gewicht der Sekundäreinheit ist der Einfluss auf die Fahrzeugtechnik (6 Punkte) minimal. Grundsätzlich eignen sich alle Batterietypen (9 Punkte) für diese Ladeform. Der Normungsprozess (6 Punkte) ist bereits fortgeschritten, eine weltweite Standardisierung jedoch derzeit noch nicht in Sicht. Die Hersteller zeigen zudem keine besondere Priorität für induktives Laden und stattdessen daher ihre Fahrzeuge vorerst nicht mit dieser Technologie aus.

²¹⁸ Die jeweilige Bewertung der Kriterien wird in Klammern () angegeben.

Bedenken bestehen vor allem hinsichtlich der Wirkung des starken elektromagnetischen Feldes (Sicherheit 7 Punkte). Allerdings zeigen die bisherigen Industrieanwendungen, dass diese potenzielle Gefahrenquelle durch geeignete Auslegung des Systems gut beherrscht wird.²¹⁹

Gegenüber dem Laden mit Stromkabeln ist der Übertragungswirkungsgrad geringer. Dies führt zu erhöhten CO₂-Emissionen in der Well-to-Wheel Analyse. Soll der Strom aus der Batterie auch noch in das Netz zurückgespeist werden, verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad noch weiter. Für die Netzintegration (2 Punkte) sind aktuelle Systeme daher nur bedingt geeignet. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die Mehrkosten (7 Punkte) des Systems, die letztlich der Kunde tragen muss.

Der Reifegrad der Technologie spiegelt sich auch im Gesamtnutzwert wider (6,8 Punkte). Obwohl die Technik bei einigen Kriterien sehr gut abschneidet, ist sie insgesamt noch nicht als praxistauglich zu bezeichnen. Vor allem das fehlende Fahrzeugangebot steht einer breiteren Nutzung dieses Konzepts noch im Weg. Die Anwendung wird daher in Nischen (z.B.: Taxis) stattfinden, in denen Kunden der kabellosen Ladung einen beträchtlichen Mehrwert zuordnen.

Szenarienbewertung

Für das Basisszenario A0 werden sich induktive Ladesysteme vorerst nur in bestimmten Nischen etablieren können. Die öffentliche Ladeinfrastruktur ist kaum ausgebaut und in privaten Haushalten wird die konventionelle Steckdose eine dominante Rolle spielen.

Für das Szenario A1 bzw. A3 gilt, dass der Marktanteil von Elektrofahrzeugen erheblich größer ist. Hersteller werden daher verstärkt nach Möglichkeiten suchen, sich im Wettbewerb zu differenzieren. Hier bieten sich induktive Systeme durch die bessere Ergonomie an. Für den Ausbau der öffentlichen Infrastruktur bietet drahtlose Stromübertragung den Schutz vor Vandalismus und steht in direkter Konkurrenz zu kabelgebundenen Ladesäulen für „Normalladen“. Aufgrund von Lerneffekten, ist zudem mit einer Verringerung der Kosten zu rechnen. Von den betrachteten Ladekonzepten mit Strom ist Induktionsladen jedoch noch am weitesten vom massentauglichen Einsatz entfernt, eine breitere Anwendung wird daher wahrscheinlich erst mittel- bis langfristig erfolgen.

²¹⁹ vgl. Schedler (2009), S. 63f.

5.4 Wasserstoff

Die begrenzte Reichweite batteriebetriebener Elektrofahrzeuge gilt als größtes Hindernis für die massentaugliche Elektromobilität. Auch wenn Verbesserungen der Energiedichte in den nächsten Jahren erwartet werden, kann das Fahrzeug die Kundenerwartungen nur teilweise erfüllen. Oben genannte Ladekonzepte versuchen auf unterschiedlichen Wegen, diesen Nachteil zu kompensieren, allerdings könnten auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Da der Antrieb ebenfalls auf elektrischem Strom basiert, werden FCEV zu den Elektrofahrzeugen gezählt, obwohl nicht Strom, sondern Wasserstoff – oder geeignete Vorprodukte, wie etwa Methanol, Ethanol oder Erdgas – als Treibstoff dienen. Das Konzept Wasserstoff soll daher auch im Rahmen dieser Arbeit unter Aspekten der benötigten Infrastruktur näher beleuchtet und bewertet, sowie mit den anderen Ladekonzepten für Elektrofahrzeuge verglichen werden.

5.4.1 Konzept

Brennstoffzellenfahrzeuge beziehen Wasserstoff an speziell dafür konstruierten Tankstellensystemen, die sich von den heutigen in Form und Bedienung nur wenig unterscheiden. Nach Befüllung des Tanks, ist eine größere Reichweite problemlos möglich. Da bei diesem Konzept der Energieträger nicht Strom ist, soll zusätzlich zu Speicherung und Transport auch die Erzeugung kurz beschrieben werden.

Erzeugung

Reiner Wasserstoff (H_2) kommt nicht natürlich vor und muss unter Einsatz von Primärenergie aus Verbindungen gewonnen werden. Dazu ist eine Reihe von Technologien bekannt und im Einsatz, die sich je nach Art der Energieträger und der genutzten Wasserstoffverbindungen unterscheiden. Bereits heute werden mehr als 600 Mrd. Nm^3 Wasserstoff pro Jahr erzeugt²²⁰ und verbraucht, wobei etwa 40% aus Industrieprozessen stammen, bei denen H_2 als Nebenprodukt anfällt, und 60% eigens erzeugt werden, der Großteil mittels „Reformierung“ fossiler Kohlenwasserstoffe – z.B.: Erdgas. Hierbei sind ebenfalls verschiedene Verfahren zu unterscheiden, am wirtschaftlichsten ist die sog. Dampfreformierung, die Wirkungsgrade²²¹ von bis zu 80% erreicht. Ein anderes häufig angewendetes Verfahren ist die Vergasung fossiler Energieträger, vor allem Kohle. Ersetzt man die fossilen Brennstoffe durch Biogas/Biomasse, entstehen bei der Erzeugung zwar Emissionen, jedoch CO_2 -Neutral und damit umweltfreundlich. Für die emissionsfreie Erzeugung von Wasserstoff ist die Elektrolyse (elektrochemische Spaltung von Wasser mit

²²⁰ Entspricht ca. 140 Mio. t Öl-Äquivalent, also 1/10 des weltweiten Kraftstoffverbrauchs [vgl. Schulz u.a. (2005), S. 85]

²²¹ *Well-to-Tank* Wirkungsgrad

Strom) das wichtigste Verfahren, sofern der benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen (Sonne, Wind, Wasser) erzeugt wird²²². Es existieren auch noch eine Reihe anderer Verfahren, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll.²²³

Speicherung & Transport

Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff stellen Speicherung und Transport in ausreichenden Energiedichten technische und wirtschaftliche Herausforderungen dar, wobei üblicherweise folgende Verfahren zur Anwendung kommen:²²⁴

Verdichteter gasförmiger H₂ - Für die Druckgasspeicherung wird Wasserstoff meist auf 200-350 bar verdichtet, auch Systeme mit Drücken von 700 bar, und darüber, sind in Erprobung. Diese Bauform bildet ein geschlossenes System, daher kann auch über längere Zeit praktisch verlustfrei gespeichert werden, unter der Voraussetzung, dass die eingesetzten Materialien die Diffusion verhindern. Es ist daher auf eine geeignete Werkstoffwahl, entsprechende Bauteildimensionierung, sowie Sicherheit der Komponenten zu achten. Das Speichergewicht der Tanks liegt bei etwa 20-40kg pro kg gespeicherten Wasserstoff, was einer gravimetrischen Speicherdichte von 5% - 2,5% entspricht. Der Energieaufwand für die Verdichtung von 1 auf 1000 bar beansprucht ca. 15% des Heizwerts. Typische Tankformen sind angesichts der günstigen Spannungsverteilung Zylinder oder Kugeln. Der Transport und die Verteilung von gasförmigem Wasserstoff können entweder in großen Druckgefäßen per LKW, Bahn, Schiff oder Pipelines erfolgen. In Deutschland gibt es aktuell zwei Pipelinenetze für die industrielle Anwendung, die mit einem Druck von etwa 20 bar betrieben werden. Durch die ähnlichen Eigenschaften der beiden Gase, könnten auch bestehende Erdgasnetze für den Transport von Wasserstoff adaptiert und verwendet werden. Ein wichtiger Aspekt für die Infrastruktur ist die Fülldauer. Ein Tankvorgang (z.B.: 3kg H₂) dauert nur einige Minuten, dafür sind allerdings hohe Druckgefälle notwendig (etwa 900 bar für 700 bar Speicherdruck). Auch eine zu starke Erhitzung des Gases in Folge des Befüllens ist durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Als Nachteil dieses Konzepts ist die gegenüber der flüssigen Speicherung geringe Energiedichte. Diese Technik wird bereits in vielen Versuchsfahrzeugen erfolgreich eingesetzt, z.B.: *Mercedes F-Cell* und *Honda FCX Clarity*.

Tiefkalt flüssiger H₂ – Um eine höhere Energiedichte zu erreichen kann Wasserstoff in flüssiger Phase (ca. -253°C) in sog. „Kryotanks“ gespeichert werden (siehe Abb. 5-17):

²²² Auch *Solare Wasserstoffwirtschaft* genannt. [vgl. Geitmann (2003), S. 123]

²²³ vgl. Eichseder u.a. (2010), S. 59f.

²²⁴ vgl. Eichseder u.a. (2010), S. 95ff.

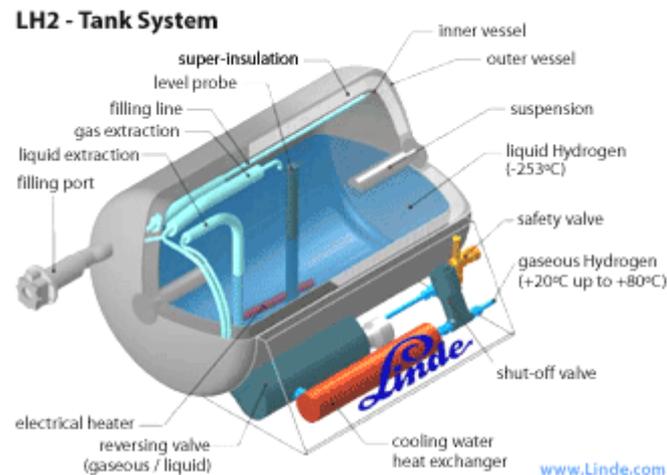


Abbildung 5-17: LH₂-Tanksystem („Kryotank“) [siehe Internetquelle 50]

Durch unvermeidbaren Wärmeeintrag kommt es zu Verdampfungsverlusten von etwa 0,3% bis 3% pro Tag. Für die Entnahme wird absichtlich Wärme in den Speicher eingebracht, wodurch der Druck im Behälter steigt und über das Druckgefälle der Wasserstoff entweicht. Heutige Fahrzeugtanks erreichen gravimetrische Energiedichten von 0,06 kg H₂/kg bzw. 0,04 kg H₂/kg. Auch hier kommen aufgrund des günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses kugel- bzw. zylinderförmige Tanks zum Einsatz. Der Energieaufwand für die Verflüssigung beträgt etwa 30% des Heizwertes. Die Infrastruktur ist technisch aufwändig, da Transferleitungen, Ventile, Betankungskupplungen, etc. ebenfalls vakuumisoliert auszuführen sind. Die tiefen Temperaturen erfordern geeignete Werkstoffe (austenitischer Edelstahl), die nicht zu Versprödung neigen. Weiters ist sicherzustellen, dass sich kein Sauerstoff im System befindet. (Explosionsgefahr). Der Transport erfolgt heute hauptsächlich in 12m-Containern auf LKW oder Zügen. Schiffe für den Transport flüssigen Wasserstoffs wurden geplant, bisher aber noch nicht realisiert. Gründe für dieses Konzept sind vor allem die höhere Speicherdichte, allerdings ist der technische Aufwand erheblich und eine verlustfreie Speicherung nicht möglich. Die Technik wurde im Rahmen eines Tankprojekts von *MAGNA Steyr* für den *BMW Hydrogen 7* bereits auf ihre Praxistauglichkeit getestet.

H₂ in Verbindungen - Viele Stoffe sind in der Lage physikalische oder chemische Verbindungen mit Wasserstoff einzugehen, wobei dies in allen Aggregatzuständen erfolgen kann. Ob eine Verbindung sich als Wasserstoffspeicher eignet, kann anhand folgender Kriterien abgeschätzt werden:

- ◆ Wasserstoffmenge, die pro Gewichts- und Volumeneinheit gespeichert wird.
- ◆ Bedingungen für die Be- und Entladung des Speichers (Temperatur, Druck, Kinetik)
- ◆ Anzahl der möglichen Beladungszyklen (Lebensdauer)

Trotz hoher theoretischer Speicherdichten, befinden sich die meisten gebundenen Speicherformen im Versuchsstadium. Die derzeit verfügbaren Feststoffspeicher haben ein Gewicht von ca. 30-40kg pro kg gespeichertem Wasserstoff bzw. eine gravimetrische Speicherdichte von 3 Masseprozent Wasserstoff, erweisen sich aber aufwändig bei Be- und Entladung. Dieses Konzept hat allerdings großes Potenzial und ist Gegenstand intensiver Forschung, wichtigste Vertreter dieser Technik sind die metallischen Hydride.

5.4.2 Technologische Anforderungen

↳ Ergonomie

Wie bei Speicherung und Transport muss auch beim Betankungsvorgang zwischen flüssigen und gasförmigen Wasserstoff unterschieden werden. Für ersteren ist der Temperaturunterschied zur Umgebung maßgebend, bei letzterem muss der benötigte Druckunterschied zwischen Reservoir und Tank beachtet werden.²²⁵

Gasförmig – Der Umgang mit komprimierten Gasen ist bereits heute üblich und sogar bei Kfz im Gebrauch (Erdgas). Der Betankungsvorgang ist dem von Benzin und Diesel sehr ähnlich und dauert ebenfalls nur wenige Minuten. Es ist daher mit hoher Kundenakzeptanz bei der Infrastruktur zu rechnen. Ein typischer GH_2 -Tankstutzen ist in Abb. 5-18 zu sehen:



Abbildung 5-18: Tankstutzen für gasförmigen Wasserstoff [siehe Internetquelle 51]

Flüssig – liegt der Wasserstoff in flüssiger Form vor, ist eine aufwändigere Konstruktion notwendig. Um falsche Bedienung bzw. Verletzungen (z.B.: Kälteverbrennung) zu vermeiden, werden diese Systeme mit Robotersystemen ausgestattet, die autonom agieren. Der Fahrer muss beim Tanken das Fahrzeug daher nicht verlassen. Aus ergonomischer Sicht ist dieses System als Verbesserung gegenüber den heutigen Tankstellen zu sehen. Auch der praxistaugliche Einsatz dieser Technik wird an einigen Tankstellen bereits erprobt, z.B. im *HyCentA* (Graz) (siehe Abb. 5-19):

²²⁵ vgl. Geitmann (2003), S. 99f.



Abbildung 5-19: HyCentA (Graz) [siehe Internetquelle 52]

↳ Normung & Standardisierung

Wasserstoff ist in der industriellen Anwendung bereits seit geraumer Zeit Stand der Technik. Auch in der Fahrzeugindustrie beschäftigt man sich seit einigen Jahrzehnten mit diesem Thema, daher existiert ein umfangreicher Normenkatalog, auch für automobiler Anwendungen. Innerhalb der ISO ist das Internationale Technische Komitee (TC) für die Wasserstofftechnologie zuständig. Tab. 5-9 gibt einen Überblick der bisher veröffentlichten Dokumente:

Norm	Titel
ISO 13984:1999	Liquid hydrogen – Land vehicle fuelling system interface
ISO 13985:2006	Liquid hydrogen – Land vehicle fuel tanks
ISO 14687:1999 ISO 14687:1999/Cor 1:2001 ISO 14687:1999/Cor 2:2008	Hydrogen fuel – Product specification
ISO/TS 14687-2:2008	Hydrogen fuel – Product specification – Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles
ISO/NP 146873	Hydrogen fuel – Product specification – Part 3: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for stationary appliances
ISO/PAS 15594:2004	Airport hydrogen fuelling facility operations
ISO/TS 15869	Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land vehicle fuel tanks
ISO/TR 15916:2004	Basic considerations for the safety of hydrogen systems
ISO 16110-1:2007	Hydrogen generators using fuel processing technologies – Part 1: Safety
ISO/FDIS 16110-2	Hydrogen generators using fuel processing technologies – Part 2: Test methods for performance
ISO/TS 16111:2008	Transportable Gas Storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
ISO 17268:2006	Compressed hydrogen surface vehicle refuelling connection devices
ISO/TS 20100:2008	Gaseous hydrogen – Fuelling stations
ISO 22734-1:2008	Hydrogen generators using water electrolysis process – Part 1: Industrial and commercial applications
ISO/DIS 22734-2	Hydrogen generators using water electrolysis process – Part 2: Residential applications
ISO/FDIS 26142	Hydrogen detection apparatus – Stationary applications

Tabelle 5-9: Liste der veröffentlichten Normen des ISO/TC 197 [siehe Eichlseder u.a. (2010), S. 294]

↳ Sicherheit

Aufgrund seiner geringen Molekülgröße weist Wasserstoff einen großen Diffusionskoeffizienten und ist deshalb ein sehr leicht flüchtiges Gas. Er kann auch durch engste Spalte aus dem Speicher entweichen, sich mit der Umgebungsluft durchmischen und dabei ein zündfähiges Gemisch erzeugen. Für diesen Fall ist die untere Zündgrenze von Bedeutung und sollte nicht überschritten werden, da sonst Brenngefahr besteht. Es müssen jedoch auch Maßnahmen getroffen werden, die das Eindringen von Sauerstoff in den Tank verhindern. Da es sich bei diesem normalerweise um ein (Über-)Drucksysteme handelt, wird dies aus physikalischen Gründen verhindert. Trotzdem muss sicher gestellt werden, dass innerhalb eines Kraftstoffsystems kein Sauerstoff vorhanden ist, weil in einem von drei Seiten eingedämmten System Explosionsgefahr besteht und die Schadenswirkung dabei erheblich größer ist. Sollte es trotzdem zu Brand kommen, sind die speziellen Eigenschaften von H₂-Luft-Gemischen zu berücksichtigen.²²⁶

- ♦ Flammen sind bei Tag kaum sichtbar, da sie im ultravioletten Bereich strahlen
- ♦ Verbrennungsgeschwindigkeit ist relativ hoch (schnelle Ausbreitung, kurze Brenndauer)
- ♦ Infolge der geringen Stoffdichte steigt das Gas schnell auf (siehe Abb. 5-20)
- ♦ Hitzeabstrahlung ist relativ gering (keine glühenden Kohlenstoffpartikel)
- ♦ Keine Rauch- oder Qualmbildung
- ♦ Brand nicht löschen, sondern Kraftstoffzufuhr unterbrechen

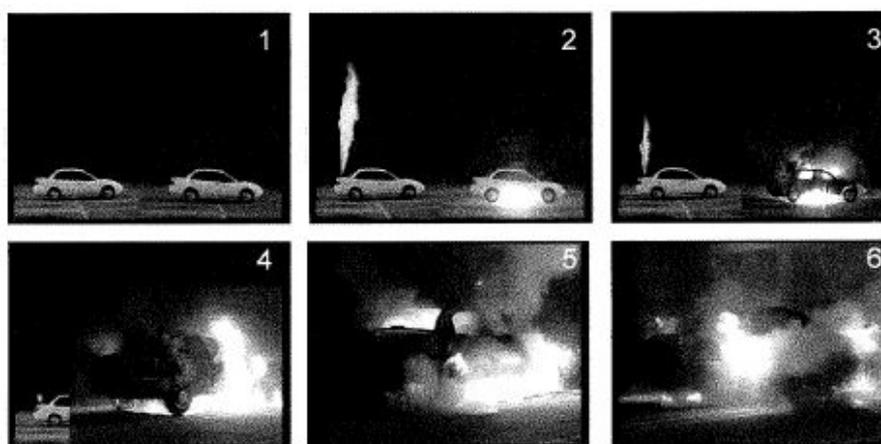


Abbildung 5-20: Brandtestreihe mit Tanks für Wasserstoff (links) und Benzin (rechts)

[siehe Eichlseder u.a. (2010), S. 286]

²²⁶ vgl. Geitmann (2003), S. 115.

Für den Menschen ist gasförmiger Wasserstoff nicht toxisch, es besteht daher keine Gefahr beim Einatmen. Lediglich ein zu hoher Anteil H_2 führt zu Verdrängung von Sauerstoff und damit zu Atemnot bzw. Erstickung. Liegt der Kraftstoff in der flüssigen Phase vor, besteht bei zu langer Berührung ($>1s$) die Gefahr von Kälteverbrennung²²⁷. Dies ist auch der Fall, wenn tiefkaltes Gas auf die Haut strömt.²²⁸

↳ Batterietechnologie

Die meisten der bisher vorgestellten Brennstoffzellenfahrzeuge bedienen sich einer seriellen Hybridstruktur. Dies ist erforderlich, da die maximalen elektrischen Leistungen der installierten Brennstoffzellen-Stacks noch nicht ausreichen, um das Spektrum der geforderten Fahrleistungen abzudecken. Auch der vom Kunden geforderten Dynamik eines Fahrzeugantriebs, mit unmittelbarer Leistungsabgabe bei schnellen Lastwechseln, genügen reine Brennstoffzellen meist noch nicht. Daher dienen kleine Traktionsbatterien oder sog. „Super Caps“ (siehe Kap. 3.2) als Pufferspeicher für die erzeugte Energie und eine dynamischere Leistungsabgabe²²⁹. Weitere Funktionen umfassen:²³⁰

- ◆ Versorgung der elektrischen Verbraucher im Fahrzeug
- ◆ Rekuperationsspeicher bei Bremsvorgängen
- ◆ Pufferspeicher für Brennstoffzelle bei geringer Last
- ◆ Leistungsunterstützung der Brennstoffzelle bei hoher Last
- ◆ Hauptenergieversorger bei geringen Lasten

Grundsätzlich sind alle bei Elektrofahrzeugen eingesetzten Batterietechnologien dafür geeignet, allerdings sind die Anforderungen einem Micro- oder Mild-Hybrid, der für eine große Zahl an Lade- und Entladezyklen im Betrieb ausgelegt wird, am ähnlichsten. Batteriekapazitäten in der Größenordnung von PHEV mit Verbrennungsmotor sind bei FCEV nicht sinnvoll, da die gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff höher ist und ein H_2 -Tankensystem in jedem Fall im Fahrzeug installiert ist.

↳ Netzintegration

Brennstoffzellenfahrzeuge eignen sich aufgrund der geringen Batteriekapazitäten nicht für die Netzintegration im Sinne des V2G-Konzepts. Allerdings würde eine etablierte Wasserstoffwirtschaft insgesamt zur besseren Integration erneuerbarer Energieträger in das

²²⁷ Durch den sog. „Leidenfrost.Effekt“ wird bei kurzer Berührung ein Dampfpolster zwischen Haut und der kalten Substanz erzeugt, die unmittelbare Wärme der Haut bewirkt die Verdampfung von LH_2 an der Kontaktstelle und verhindert damit den direkten Kontakt. [vgl. Geitmann (2003), S. 118]

²²⁸ vgl. Geitmann (2003); Schulé (2006).

²²⁹ vgl. Schubert (2007), S. 122.

²³⁰ vgl. Jeong u.a (2002), S. 60.

Stromnetz beitragen. Als Pufferspeicher dient dabei Wasserstoff, der von stationären Brennstoffzellen bei Bedarf wieder in elektrischen Strom umgewandelt und in das Netz zurückgespeist werden kann.²³¹

↳ Fahrzeugtechnik

Die bisher präsentierten Brennstoffzellenfahrzeuge, sowohl Fahrzeugkonzepte, als auch Prototypen sowie Entwicklungs- und Erprobungsfahrzeuge, lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen, je nach Systemauslegung, Energiezufuhr, Art des eingesetzten Kraftstoffs und dessen Speicherung. Die wichtigsten Bauformen sind:²³²

FCEV mit On-Board Reformer – Als Kraftstoff dient Methanol oder Benzin, welcher im Fahrzeug zu Wasserstoff reformiert wird. Ein kleiner Energiespeicher dient der Leistungsanpassung. (z.B.: *Mercedes-Benz NECAR*)

FCEV mit GH_2 – Die Speicherung von H_2 erfolgt bei hohem Druck. Nach einer entsprechenden Druckreduktion in den Zuleitungen wird er der Brennstoffzelle zugeführt. Hybridstrukturen sind üblich, es gibt aber auch reine FCEV (z.B.: *GM HydroGen3*)

FCEV mit LH_2 – Wasserstoff wird bei -253°C in flüssiger Phase in speziellen Kryo-Tanks gespeichert.

5.4.3 Ökonomische und organisatorische Anforderungen

↳ Integration in bestehende Infrastruktur

Der Umgang mit Wasserstoff ist bereits seit über 100 Jahren bekannt. Im 19. Jahrhundert wurden in vielen Städten Rohrleitungssysteme installiert, um das sog. „Stadtgas“ - je zur Hälfte H_2 und CO – für die Straßenbeleuchtung und Haushalte zu verteilen. Später wurde es dann durch Erdgas ersetzt²³³. Grundsätzlich sind die Systeme, Rohrleitungen und stationäre bzw. mobile Druckspeicher daher nicht nur bekannt und technisch erprobt, sondern auch seit vielen Jahrzehnten sicher im Einsatz, vor allem in stark industrialisierten Gebieten. So existiert bereits seit 1938 ein 240km langes Pipelinenetz im Ruhrgebiet, ein weiteres Wasserstoffverteilungsnetz verbindet diverse Chemieunternehmen in der Region Leuna/Bitterfeld. Auch in den USA (720km) und Frankreich/Belgien (400km) hat man bereits langjährige Erfahrungen mit dieser Technologie gesammelt. Der Leitungsdruck beträgt in etwa 3-100 bar. Die Umfunktionierung bestehender Erdgasnetze für den Wasserstofftransport wäre damit durchaus möglich.²³⁴

²³¹ vgl. Geitmann (2003), S. 66.

²³² vgl. Schubert (2007), S. 121ff; Wolf u.a. (2005), S. 68f.

²³³ vgl. Geitmann (2003), S. 19.

²³⁴ vgl. Biedermann u.a. (2001), S. 138f; Geitmann (2003), S. 96.

In der Markteinführungsphase würde sich diese erprobte Infrastruktur gut für die Versorgung von konventionellen Tankstellen eignen. Eine andere Möglichkeit stellt der Transport in Druckbehältern (200 bar) per LKW oder Bahn dar. Derartige LKW-Trailer können auch als Tankstellenspeicher dienen, die in regelmäßigen Abständen durch den Lieferanten ausgetauscht werden (z.B.: H₂-Tankstelle in Hamburg) und damit einen Inselbetrieb erlauben. Allerdings eignet sich GH₂ wegen der geringen Dichte für einen flächendeckenden Einsatz nicht so gut. Um den gleichen Energieinhalt wie ein gewöhnlicher Tanklastzug (36.000l Benzin), zu liefern, wären 10 GH₂-Lastzüge notwendig.



Abbildung 5-21: GH₂-Tanklastwagen [siehe Internetquelle 53]

Eine weitere Möglichkeit besteht im Transport von LH₂, da die Energiedichte viel höher als bei GH₂ ist²³⁵. Allerdings werden besondere Anforderungen an das Material und die Speichertechnik gestellt und die Speicherung kann nicht verlustfrei erfolgen. Die Technik selbst ist aber bereits heute täglich im Einsatz und daher gut beherrschbar.²³⁶



Abbildung 5-22: LH₂-Tanklastwagen [siehe Internetquelle 54]

Neben Speicherung und Transport ist auch noch die Erzeugungsinfrastruktur zu berücksichtigen. Der Großteil der Weltjahresproduktion stammt aus fossilen Quellen. Für eine emissionsfreie Wasserstoffinfrastruktur sind daher erhebliche Investitionen in Elektrolyseanlagen, die mit Strom aus erneuerbaren Energien (Off- und On-Shore) betrieben werden, notwendig. Nicht zuletzt deshalb wird Wasserstoff erst langfristig eine Rolle spielen können.

²³⁵ Transportkapazität eines LH₂-LKW (3.300kg H₂) 9-mal höher als die eines GH₂-LKW (530kg H₂).

²³⁶ vgl. Geitmann (2003), S. 94ff.

↳ Geschäftsmodelle

Konkrete Geschäftsmodelle für Wasserstoff und Brennstoffzellen existieren derzeit noch kaum, da die Einführung von Serienfahrzeugen nicht unmittelbar bevorsteht. Es werden jedoch Szenarien bzw. Roadmaps diskutiert, wie eine erfolgreiche Markteinführung von FCEV aussehen könnte. Nach Schulz u.a.²³⁷ sind vier Phasen für den Übergang in eine Wasserstoffinfrastruktur zu durchlaufen:

Erste Feldversuche - Konzentration auf einige wenige, anstatt vieler Pilotprojekte, um realistische Benutzerszenarien zu erproben, mit verschiedensten Fahrzeugtypen (PKW, Bus, LKW) unter Alltagsbedingungen (> 100 Fahrzeuge pro Tankstelle).

Flottenbetrieb in Ballungsräumen - FCEV sind für Privatkunden erst bei einer entsprechenden Versorgung mit Wasserstoff attraktiv. Flottenfahrzeuge hingegen kehren oftmals an einen zentralen Standort zurück bzw. durchlaufen eine fixe Strecke (z.B.: ÖPNV). Sie sind daher als Entwicklungsträger für eine breitere Anwendung von Wasserstoff zu betrachten. In dieser Phase werden nur wenige (2-3) Tankstellen errichtet, die einen möglichst hohen Nutzungsgrad aufweisen. In Hamburg und Berlin existieren solche Projekte bereits.

Übergang zum wirtschaftlichen Tankstellenbetrieb – Mit dem Ausbau von Fahrzeugflotten wird auch die Infrastruktur erweitert. Regional (z.B.: Ruhrgebiet, Region-Île-de-France) versorgt eine kleine Anzahl an Tankstellen (8-10) eine große Anzahl an Flottenfahrzeugen (> 1000). Damit gehen Pilotprojekte in einen wirtschaftlichen Betrieb über, auch für innovative Privatkunden herrscht nun eine bestimmte Versorgungssicherheit.

Errichtung von H₂-Korridoren – In dieser Phase muss der wirtschaftliche Betrieb einer Infrastruktur gewährleistet sein. Der größte Teil der Autofahrten findet in Ballungsräumen und auf den Hauptverkehrsachsen (Autobahnen), die sie miteinander verbinden, statt. Der Betrieb von Tankstellen sollte auf eine größere Anzahl von Ballungsräumen erweitert, sowie auf deren Verbindungsstrecken („Korridore“) aufgenommen werden (siehe Abb. 5-23). Dies ist mit großem finanziellem Aufwand verbunden, spätestens dann sind FCEV auch für den Massenmarkt tauglich. Hersteller müssen den Infrastrukturausbau mit ersten Serien am Markt begleiten, um Investoren die nötige Planungssicherheit zu geben. Nach ca. 5 Jahren ist eine signifikante Marktdurchdringung von FCEV zu erkennen, welchen Marktanteil sie erreichen werden, entscheidet letztlich der Kunde.

²³⁷ Schulz u.a. (2005), S. 79ff.

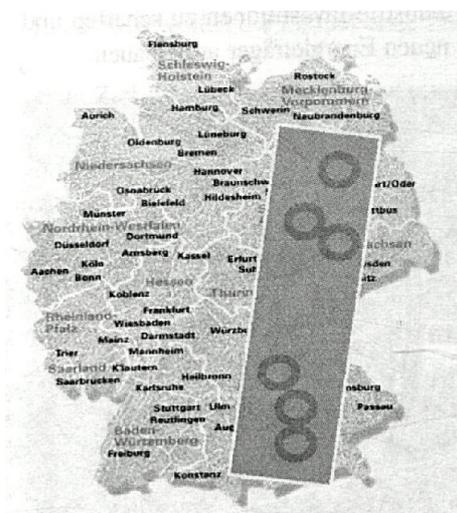


Abbildung 5-23: Wasserstoffkorridore für Deutschland und Europa [siehe Schulz u.a. (2005), S. 83]

Alternativ könnten sowohl fossile Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Erdgas) und biogene Flüssigkraftstoffe wie Methanol, DME, oder Ethanol als Übergangslösung für eine emissionsfreie Wasserstoffwirtschaft dienen. Die Anpassungen der verfügbaren Infrastruktur wären vergleichsweise gering, der Betrieb von FCEV damit aber trotzdem möglich. Fahrzeughersteller würden damit die benötigten Skaleneffekte erzielen, um mittelfristig die Produktionskosten auf ein vom Kunden akzeptables Niveau zu senken. Die CO₂-Emissionen wären vorerst weiterhin vorhanden, fallen mit zunehmendem Anteil von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien aber immer geringer aus.²³⁸

↪ Kosten

Zusätzlich zu den Kosten für die Errichtung einer Infrastruktur sind bei Wasserstoff auch die Herstellkosten in die Analyse²³⁹ mit einzubeziehen. Die Bestimmung des Wasserstoffpreises ist schwierig, da je nach Herstellverfahren die Kosten stark variieren (siehe Tab. 5-10).

Herstellung	Kosten in Cent / kWh
Erdgas Dampfreformierung	4
Wasserkraft, Elektrolyse	9
Biomasse Vergasung	10
Wind, Elektrolyse	23
Photovoltaik, Elektrolyse	75

Tabelle 5-10: Wasserstoffkosten [siehe Lehmann (2001), in: Geitmann (2003), S. 32]

²³⁸ vgl. Biedermann u.a. (2001), S. 141.

²³⁹ Bei BEV sind die geringen Stromkosten im Betrieb der entscheidende Vorteil gegenüber VKM-Fahrzeugen.

Der durchschnittliche Wert liegt bei etwa 0,5 Euro pro Liter, was ca. 2€ für einen Liter Benzin entsprechen würde²⁴⁰. Mit einer Senkung der Kosten ist bei größeren Mengen zwar zu rechnen, allerdings ist Wasserstoff von den Preisen der Primärenergieträger bzw. Strom abhängig und unterliegt somit selbst Kostenfaktoren²⁴¹.

Der *National Research Council Report 2008* schätzt die Kosten einer Wasserstofftankstelle, die durch Erdgasreformierung betrieben wird, ab einer Stückzahl von 500, auf etwa \$2.2 Millionen. Diese wäre in der Lage, etwa 2300 Fahrzeuge zu versorgen. Die Initialkosten liegen bei ca. \$4.4 Mio. pro Stück. Die durchschnittlichen Infrastrukturkosten beliefen sich also auf \$955 bzw. \$1700 pro Fahrzeug²⁴². Laut *TOTAL* könnte eine H₂-Tankstelle bei einem Wasserstoffpreis von vier bis fünf Euro pro Kilogramm (entspricht einem Benzinpreis von ca. 1,4 €/l²⁴³) ab etwa 500 von ihr versorgten Fahrzeugen wirtschaftlich betrieben werden.²⁴⁴

↳ Ressourcenverbrauch

Für die Herstellung von Wasserstoff gibt es eine Vielzahl verschiedener Verfahren (vgl. Kap. 5.4.1), die jedoch alle einen sehr hohen Energieeinsatz verlangen. Heute kommen dafür hauptsächlich fossile Quellen – wie Erdgas – zum Einsatz, eine emissionsfreie Erzeugung ist nur durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom gewährleistet. Neben reinem Wasserstoff sind auch biogene Kraftstoffe (z.B.: Methanol), für Brennstoffzellenanwendungen geeignet – der Reformier befindet sich dabei im Fahrzeug.

Weiters müssen die möglichen Auswirkungen auf Klima und Umwelt (lokal und global) durch den vermehrten Wasserdampfausstoß in Folge einer weitem Verbreitung von FCEV berücksichtigt werden. Wasserdampf ist zwar das am häufigsten in der Atmosphäre vorkommende klimarelevante Gas, aber wesentlich weniger klima-aktiv als CO₂. Abschätzungen lassen vermuten, dass die fahrzeugbedingten H₂O-Emissionen jedoch keine Auswirkungen auf die Klimaerwärmung haben werden.²⁴⁵

Auch der Flächenverbrauch einer Infrastruktur muss entsprechend berücksichtigt werden. Da eine adäquate Wasserstoffwirtschaft derzeit noch nicht existiert, sind neben den Tankstellen, auch Erzeugungs- und Distributionsinfrastruktur zu errichten.

↳ Nutzerprofile

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten im Vergleich zu bekannten Otto- und Dieselfahrzeugen kaum Nachteile. Die Reichweite ist zwar etwas geringer (400-500km), allerdings nicht in so

²⁴⁰ Es wird mit dem sog. Benzinäquivalent gerechnet, wobei 1l Benzin etwa der vierfachen Menge H₂ entspricht.

²⁴¹ vgl. Geitmann (2003), S. 32f.

²⁴² vgl. Thomas (2009), S. S.6014.

²⁴³ 1kg H₂ ≈ 2,75 kg Benzin ; kg/l (Benzin) ≈ 1,2

²⁴⁴ vgl. Schulz u.a. (2005), S. 82.

²⁴⁵ vgl. Geitmann (2003), S. 19.

kritischem Maße wie bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. FCEV kommen daher grundsätzlich für alle Nutzergruppen in Frage, denn aus heutiger Sicht bedeutet der Umstieg aus Wasserstoff bei einer entsprechenden Infrastruktur keine Mobilitätseinschränkungen. Aufgrund der höheren Kosten für ein Fahrzeug wird der Flottenbetrieb die primäre Anwendung bei Markteinführung sein.

5.4.4 Mobilitätskonzepte & Pilotprojekte

Nach Schubert²⁴⁶ ist die Kundenakzeptanz von FCEV neben einer guten Markteinführungsstrategie, auch von der Funktionalität des Produktes abhängig, die sich von heutigen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor möglichst wenig unterscheiden soll, vor allem hinsichtlich der erzielbare Reichweite, sowie Dynamik der Fortbewegung. Aus verkehrspolitischer Sicht ist dies durchaus kritisch zu bewerten. Neben den Emissionen, stellt der Flächenverbrauch von Kraftfahrzeugen ein ebenso großes Problem dar. Parkplatzmangel, sowie Staus sind die Folge einer zu großen Menge an Fahrzeugen im Verkehrssystem. Die Idee neuer Mobilitätskonzepte ist es, eine effiziente Wahl des Transportmittels zu ermöglichen, die auch aus ganzheitlicher Sicht sinnvoll ist. Da FCEV zumindest lokal emissionsfrei betrieben werden können, und der Nutzer, im Gegensatz zu reinen Elektrofahrzeugen, nicht befürchten muss, plötzlich ohne Kraftstoff liegen zu bleiben, besteht bei diesem Konzept eine erhöhte Gefahr mit dem ÖPNV zu konkurrieren bzw. diesen zu substituieren. Allerdings könnten FCEV langfristig den Verbrennungsmotor dort ersetzen, wo Elektrofahrzeuge aufgrund der beschränkten Batteriekapazität nicht zum Einsatz kommen (z.B.: Überlandverkehr) und der Betrieb öffentlicher Verkehrsmittel nicht wirtschaftlich ist.

5.4.5 Stakeholder

Im Gegensatz zu strombasierter Elektromobilität ist bei einer Wasserstoffinfrastruktur nicht mit vielen neuen Marktakteuren zu rechnen. So gehören einem entsprechenden Zusammenschluss in Deutschland namens „Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie“ (VES) neben den Begründern der Initiative *Daimler*²⁴⁷ und *BMW*, Unternehmen wie *BP*, *Shell*, *Total*, *RWE*, *VW*, *Opel* und *MAN* an, welche – außer *RWE* – bereits Glieder in der heutigen Versorgungswertschöpfungskette sind. Auch andere große EVU's, wie z.B. *Vattenfall*²⁴⁸ zeigen großes Interesse an Wasserstoff, da sie einerseits die wichtigsten Abnehmer von reformierbaren Rohstoffen wie Erdgas sind, und andererseits nach Möglichkeiten für eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energien suchen. Fahrzeughersteller sind die treibende Kraft hinter der Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte mit Brennstoffzellen, da sie sich damit

²⁴⁶ Schubert (2007), S.121.

²⁴⁷ Anm. d. Verf.: zum Zeitpunkt der Gründung noch *DaimlerChrysler*.

²⁴⁸ vgl. Internetquelle 55.

(wie auch bei Verbrennungskraftmaschinen) von ihren Mitbewerbern am Markt differenzieren können und spezifisches Know-How im Unternehmen erschaffen.

- ♦ Mineralölkonzerne
- ♦ Fahrzeughersteller
- ♦ Energieversorgungsunternehmen

5.4.6 Nutzwertanalyse und Szenariobewertung

Kriterium	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Szenarioabhängig
Ergonomie	15%	8	1,2	Nein
Normung & Standardisierung	15%	7	1,05	Nein
Sicherheit	15%	5	0,75	Nein
Batterietechnologie	5%	10	0,5	Ja
Netzintegration	5%	(10 ²⁴⁹)	0,5	Ja
Fahrzeugtechnik	5%	8	0,4	Nein
Integration in bestehende Infrastruktur	10%	1	0,1	Ja
Geschäftsmodelle	5%	1	0,05	Ja
Kosten	15%	3	0,45	Ja
Ressourcenverbrauch	5%	5	0,25	Ja
Nutzerprofile	5%	10	0,5	Nein
	100%		5,75	

Tabelle 5-11: Nutzwertanalyse - Wasserstoff

Nutzwertanalyse²⁵⁰

Die Stärke von Brennstoffzellen- gegenüber Elektrofahrzeugen ist, dass sie keine Umstellung des Nutzerverhaltens benötigen. Die Reichweite ist zwar kürzer als bei konventionellen Antrieben, die Kundenbedürfnisse können dennoch erfüllt werden²⁵¹. Der Betankungsvorgang mittels Tankstutzen folgt gewohnten Mustern und ist deshalb als ergonomisch einzustufen (8 Punkte). FCEV benötigen nur kleine Traktionsbatterien, die einer verbesserten Fahrdynamik dienen, langfristig sollen diese nicht mehr im Fahrzeug verbaut werden (10 Punkte). Im Gegensatz zu batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen eignen

²⁴⁹ Wird Wasserstoff in großen Mengen produziert, kann dieser als Pufferspeicher für die volatile Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien herangezogen. Das Fahrzeug selbst ist nicht Teil des Prozesses.

²⁵⁰ Die jeweilige Bewertung der Kriterien wird in Klammern () angegeben.

²⁵¹ vgl. .Aral (2009), S. 21.

sich FCEV nicht für die Netzintegration im Sinne des V2G-Konzepts. Allerdings kann Wasserstoff selbst als Pufferspeicher verwendet werden (10 Punkte). Daher unterstützt die Wasserstoffwirtschaft den Ausbau erneuerbarer Energieträger und hilft, deren Volatilität auszugleichen. Fahrzeughersteller investieren bereits seit Jahrzehnten in die Entwicklung serienreifer Modelle (Fahrzeugtechnik 8 Punkte) und betrachten FCEV langfristig als Ersatz für den konventionellen Antrieb. Der Normungsprozess (7 Punkte) ist daher in diesem Bereich schon weit fortgeschritten, auch weil Wasserstoff in Industrieprozessen seit langer Zeit eingesetzt wird.

Ähnlich wie bei Elektrofahrzeugen ist die fehlende Infrastruktur (1 Punkt) der Hauptgrund dafür, dass bisher keine FCEV am Markt verfügbar sind²⁵². Im Unterschied zu reinen BEV kann jedoch nicht einmal auf ein bestehendes Verteilernetz zurückgegriffen werden, sondern muss fast vollständig neu errichtet werden inklusive dem Ausbau der Wasserstoffproduktion. Obwohl schon mehrfach die Einführung dieser Fahrzeuge angekündigt worden ist, scheint diese Hürde auch aus heutiger Sicht noch immer zu groß²⁵³. Diese Planungsunsicherheit bedingt auch, dass keine wirklichen Geschäftsmodelle (1 Punkt) für FCEV erarbeitet worden sind, um die hohen Herstellkosten (3 Punkte) zu kompensieren.

Aus heutiger Sicht ist der Gesamtnutzwert (5,75 Punkte) von Wasserstoff daher, auch im Vergleich mit anderen Ladekonzepten, eher gering.

Szenarienbewertung

Wie der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft gestaltet werden soll, ist aus heutiger Sicht noch unklar. Betrachtet man die Aktivitäten der verschiedenen Fahrzeughersteller, ergeben sich fünf „Hauptentwicklungspfade“ (siehe Abb. 5-24): Während ein Teil der Hersteller auf eine geeignete Infrastruktur wartet und über einen nicht näher spezifizierten Zeitraum Wasserstoff als Treibstoff etablieren will, setzen andere Unternehmen auf die Entwicklung der Brennstoffzelle und deren Betrieb mit alternativen Kraftstoffen (z.B.: Ethanol, etc.). Dadurch können die Kosten der FCEV auf ein konkurrenzfähiges Niveau gebracht werden und langfristig konventionelle Antriebe ersetzen. Die letzte Möglichkeit der parallelen Entwicklung von Antriebstechnologie und Infrastruktur stellt zwar das Ideal dar, die Erfahrungen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, dass in der Realität vor allem auf Infrastrukturseite zu wenig getan wurde. Eine Änderung des motorisierten Individualverkehrs ist durch ein Wechselspiel zwischen diesen Faktoren gekennzeichnet, das entsprechend gestaltet und koordiniert werden muss.²⁵⁴

²⁵² z.B.: *Honda FCX Clarity* wird nur in Kleinserie an bestimmte Kunden ausgeliefert.

²⁵³ vgl. Rammner u.a. (2005), S. 1ff.

²⁵⁴ vgl. Weider u.a. (2005), S. 24ff.

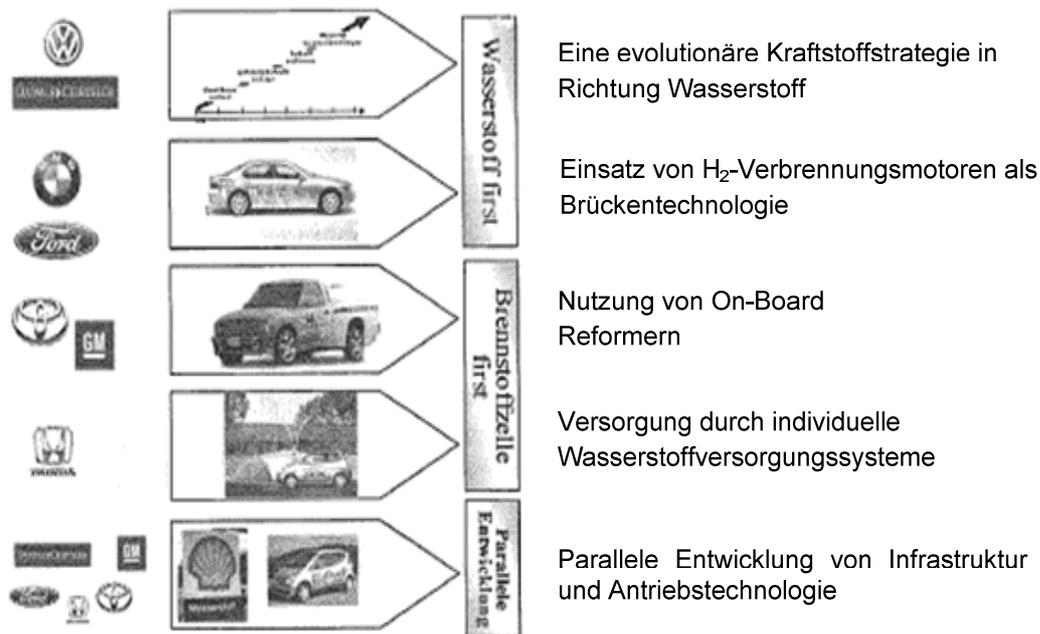


Abbildung 5-24: Fünf Hauptentwicklungspfade zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“

[vgl. Weider u.a. (2005), S. 26]

Der derzeitige Trend für Hybrid- und Elektrofahrzeuge könnte den Übergang in die Wasserstoffwirtschaft weiter hinauszögern, langfristig jedoch dazu beitragen, die passenden Rahmenbedingungen für FCEV zu schaffen. Die Deutsche Bundesregierung formuliert es im *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* folgendermaßen:

„Die Elektrifizierung der Antriebe ist die wesentliche Stellschraube für einen zukunftsfähigen Verkehr. Die Batterie- und Brennstoffzellentechnologie sind aus Sicht der Bundesregierung dabei sich ergänzende, komplementäre Pfade, die es gilt, beide weiter zu entwickeln. Neben dem bereits erfolgreich gestarteten Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) werden mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität nunmehr die Batterietechnologie und die Technologien für rein elektrische Antriebe verstärkt verfolgt.“²⁵⁵

²⁵⁵ vgl. Bundesregierung (2008), S. 6.

6 Konzeptvergleich

Mit dem Ziel, unterschiedliche Interessensgruppen im Umfeld von Elektromobilität und interessierten Lesern näher zu informieren, hat die vorliegende Arbeit Grundlagen, Rahmenbedingungen und aktuelle Entwicklungen zur Elektromobilität mit Schwerpunkt auf die dafür notwendige Ladeinfrastruktur zusammengetragen.

Im Mittelpunkt der Analyse stand die adäquate Stromversorgung mehrspuriger Kraftfahrzeuge mit voll- oder teilelektrischem Antrieb. Dafür werden verschiedene Konzepte diskutiert. Im Rahmen der Analyse wurden spezifische Stärken und Schwächen identifiziert, sowie Schlüsse auf die praktische Relevanz gezogen. Wasserstoff für FCEV wurde als Sonderfall ebenfalls berücksichtigt, da diese Fahrzeuge der Elektromobilität in der Literatur zugerechnet werden²⁵⁶ und eine potenzielle Alternative zu reinen Elektrofahrzeugen (als ZEV) darstellen.

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, und im direkten Vergleich zueinander betrachtet. Es sollen mögliche Handlungsfelder aufgezeigt werden, sowie ein kritischer Ausblick auf die zukünftige Entwicklung von Elektromobilität gegeben werden.

6.1 Stand der Technik

Kriterium	Gewichtung	Bewertung				Nutzwert			
		KON	IND	BWS	H ₂	KON	IND	BWS	H ₂
Ergonomie	15%	5	10	10	8	0,75	1,5	1,5	1,2
Normung & Standardisierung	15%	10	6	2	7	1,5	0,9	0,3	1,05
Sicherheit	15%	6	7	10	5	0,9	1,05	1,5	0,75
Batterietechnologie	5%	8	9	3	10	0,4	0,45	0,15	0,5
Netzintegration	5%	8	2	9	10	0,4	0,1	0,45	0,5
Fahrzeugtechnik	5%	8	6	2	8	0,4	0,3	0,1	0,4
	60%					4,35	4,3	4,0	4,4

Tabelle 6-1: Nutzwert – Konzeptvergleich (technisch)

Aus ergonomischer Sicht bieten induktive Ladesysteme und Batteriewechselstationen die beste Lösung, da der Ladevorgang vollautomatisch abläuft. Der Komfort von Kabel und Stecker wird von den Kunden hingegen als gering eingeschätzt²⁵⁷, kann aber durch

²⁵⁶ vgl. Gerl (2002), S. 89ff.

²⁵⁷ Siehe 5.3.2

möglichst kurze Kabellängen und intelligente Anordnung der Anschlussstelle am Fahrzeug erhöht werden. Der Tankvorgang bei Wasserstoff ist mehr oder weniger gleich wie bei Benzin, Diesel oder Erdgas und stellt daher weder eine Verbesserung, noch eine Verschlechterung des heutigen Tanksystems dar.

Sehr wichtig für eine weite Verbreitung eines Konzepts ist der Fortschritt bei Normung und Standardisierung, welcher bei induktiver Ladung am weitesten fortgeschritten ist. Die zukünftige europäische Norm IEC 61851 legt wesentliche Parameter der Schnittstelle fest, ob sie sich auch global durchsetzen wird, ist allerdings noch offen. Auch bei Wasserstoff existiert bereits eine Vielzahl an Normen, die angewendet werden können. Für Wechselstationen ist diese Anforderung zugleich das kritische Hindernis. Aus Herstellersicht greift eine solche zu tief in das Fahrzeugdesign ein und ist daher nicht wünschenswert. Renault/Nissan hat sich – wohl aus wirtschaftlichen Gründen – als einziger Automobilkonzern bisher für dieses System entschieden. Allerdings könnte eine große Verbreitung des Konzepts zum Umdenken bei anderen Herstellern führen. Im Bereich der induktiven Kopplung kann teilweise auf Industrienormen zurückgegriffen werden, für die automobiler Anwendung besteht allerdings noch Handlungsbedarf.

Für den Einsatz von neuen Technologien ist ein für den Mensch und Umwelt absolut sicherer Betrieb zu gewährleisten. Aus Sicht der elektrischen Sicherheit erfüllen wiederum induktive und Batteriewechselsysteme diese Anforderung gut bzw. sehr gut, da Fahrzeughalter mit keinem metallischen Leiter in Berührung kommen können. Für induktive Ladung ist allerdings noch Forschungsbedarf hinsichtlich der EMV gegeben, um geeignete Grenzwerte zu definieren. Bei Schnellladestationen (induktiv), die mit sehr hohen Leistungen (> 100 kW) arbeiten, ist dies ebenso zu berücksichtigen. Abhängig von der Speicherform ergeben sich bei Wasserstoff verschiedene Gefahrenpotenziale, sind aber aufgrund der bisherigen Erfahrungen als gut beherrschbar einzustufen.

Fahrzeug und Infrastruktur sind bei Automobilen aufs engste miteinander verbunden, die in gegenseitiger Wechselbeziehung zueinander stehen. Die verfügbaren Fahrzeugmodelle müssen an möglichst vielen Ladestationen geladen werden können. Der Infrastruktur kommt daher die Aufgabe zu, flexibel hinsichtlich der unterstützten Batterietypen zu sein (besonders im Massenmarkt). Bis auf Wechselstationen, die prinzipbedingt Einschränkungen bei Position und Abmessung der Akkumulatoren verlangen, erfüllen alle Konzepte diese Anforderung. Bei Wasserstoff wird sich zeigen, ob FCEV, batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ergänzen oder substituieren werden. Jedenfalls ist es aus technischer Sicht nicht sinnvoll größere Batteriekapazitäten im Auto vorzusehen, da Wasserstofftanks mehr Energie bei weniger Gewicht speichern

Jedes der genannten Ladekonzepte hat auch auf Seite der Fahrzeugtechnik unterschiedliche Ausprägungen. So existieren verschiedene Steckertypen und geforderte

Ladeleistungen bei induktiven Systemen. Für induktive Ladung werden, ebenso wie bei Wasserstoff, ebenfalls verschiedene Konzepte diskutiert. BWS hingegen schränken die Kompatibilität der Fahrzeuge von vornherein ein. Ein flächendeckendes Netz an Ladestellen muss sich daher möglichst flexibel hinsichtlich der Eignung für verschiedene Systeme sein, wodurch der Kundennutzen noch weiter erhöht wird²⁵⁸.

Langfristig spielt auch die Fähigkeit der Ladestelle, das Stromnetz zu stabilisieren eine wichtige Rolle bei der Wahl der Ladetechnik. BWS eignen sich bei entsprechender Dimensionierung der Zuleitungen besonders gut für das V2G-Konzept, kabelgebundene Lösungen ebenso. Da die Übertragungsverluste bei induktiver Kopplung höher sind, kommt eine Rückspeisung ins Netz aus heutiger Sicht nicht in Frage und wird prinzipbedingt induktiven Anschlüssen immer unterlegen bleiben. Wasserstoff eignet sich grundsätzlich ebenfalls als Pufferspeicher für volatile Stromquellen, für eine genauere Betrachtung muss jedoch auf einschlägige Literatur verwiesen werden, da dies den Rahmen der Arbeit übersteigt.

Betrachtet man den Teilnutzwert der technischen Kriterien, ist zu erkennen, dass Wasserstoff die höchste Punktezahl (4,4) erzielt. Diese Beobachtung deckt sich mit der Ansicht der Automobilindustrie, die bereits seit der Ölkrise an der Brennstoffzellentechnologie forscht und als erste Alternative für den Verbrennungsmotor betrachtet. Von den stromelektrischen Ladekonzepten weist, knapp dahinter, die induktive Ladung die höchste Punktezahl (4,35) auf. Obwohl sie ergonomische Schwächen aufweist, ist wegen der fortgeschrittenen Standardisierung und der Fähigkeit, Ströme mit hohem Wirkungsgrad ins Netz rückzuspeisen, dieses Konzept aus heutiger Sicht die erste Wahl.

6.2 Wirtschaftlichkeit

Kriterium	Gewichtung	Bewertung				Nutzwert			
		KON	IND	BWS	H ₂	KON	IND	BWS	H ₂
Integration in best. Infrastruktur	10%	8	7	9	1	0,8	0,7	0,9	0,1
Geschäftsmodelle	5%	10	1	7	1	0,5	0,05	0,35	0,05
Kosten	15%	9	7	5	3	1,35	1,05	0,75	0,45
Ressourcenverbrauch	5%	5	9	5	5	0,25	0,45	0,25	0,25
Nutzerprofile	5%	7	5	6	10	0,35	0,25	0,3	0,5
	40%					3,25	2,5	2,55	1,35

Tabelle 6-2: Nutzwert – Konzeptvergleich (wirtschaftlich)

²⁵⁸ Bsp.: Bei *Better Place* kann sowohl an der Ladesäule wie auch in der Wechselstation geladen werden.

Neben einer funktionierenden und vom Kunden akzeptierten Technik, muss eine Ladestation auch die wirtschaftlichen Kriterien erfüllen, damit Investitionen in Elektromobilität getätigt werden. Mit dem reinen Stromabsatz ist aus heutiger Sicht kein Gewinn zu erwirtschaften²⁵⁹, da die aufgenommene Leistung zu gering und die Verweildauer zu lange ist, um die hohen Investitionskosten zu decken. Die Geschäftsmodelle müssen daher zusätzliche Einnahmequellen erschließen, die in Kombination mit dem Ladevorgang angeboten werden. Eine stärkere Auslastung der Anlage (z.B.: Car Sharing) senkt etwa die Kosten je Fahrzeug.

Konduktive Ladesysteme bieten aufgrund des vergleichsweise geringen Preises je Station die beste Möglichkeit, für innovative Unternehmen mit ihren Lösungen in den Markt einzutreten. *Better Place* ist derzeit das einzige Unternehmen, das BWS anbietet und verfolgt ein „Pay-per-Mile“ Geschäftsmodell, das sich an dem Vorbild des Mobilfunks orientiert. Es wurde gezeigt, dass die Strommehrkosten induktiver Systeme auch bei Halbierung der Kosten je Station noch immer deutlich höher sind, als für kabelgebundene Ladestationen. Zudem fehlen derzeit konkrete Geschäftsmodelle. Die Frage, ob Kunden bereit sind, für den ergonomischen Mehrwert diese Kosten zu tragen, ist derzeit noch offen. Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ist mit viel Aufwand verbunden, da neben der Distributions- auch die Produktionsinfrastruktur ausgebaut werden muss. Konkrete Geschäftsmodelle für den Markt sind hier ebenfalls noch kaum vorhanden.

Bei der Errichtung eines flächendeckenden Netzes an Ladestationen ist ferner zu prüfen, inwiefern bestehende Infrastrukturen dafür herangezogen werden können bzw. in welchem Maß sie an die neuen Anforderungen angepasst werden müssen. Für private Haushalte liegt die Verwendung der hauseigenen Steckdosen nahe. Diese müssen für den ordentlichen Betrieb zwar adäquat abgesichert, sowie um eine intelligente Laststeuerung ergänzt werden, erfüllen ansonsten jedoch die grundlegenden Anforderungen an eine Ladestelle. Im (semi-) öffentlichen Bereich hingegen konkurrieren die untersuchten Konzepte miteinander. Hierbei weisen konduktive Systeme insbesondere hinsichtlich Ästhetik (Stadtbild) und Ergonomie Nachteile auf. Trotzdem werden in den Modellregionen fast ausschließlich solche Ladesäulen aufgestellt. Induktive Systeme haben neben der leichteren Bedienbarkeit den Vorteil, vandalismussicher zu sein. Die Stärke von Batteriewechselstationen besteht hingegen darin, eine große Anzahl an Fahrzeugen bei sehr geringem Flächenverbrauch versorgen zu können. Sie könnten ergänzend zu bestehenden²⁶⁰ bzw. als Ersatz geschlossener oder nicht rentabler Benzin-/Diesel-Tankstellen errichtet werden und beanspruchen damit kaum zusätzliche Flächen. Lediglich die elektrischen Zuleitungen müssten entsprechend dimensioniert werden, da weitaus höhere Leistungen von BWS gefordert werden.

²⁵⁹ vgl. Dringenberg u.a. (2009), S. 2.

²⁶⁰ Anm.: auf dem gleichen Gelände, aber räumlich getrennt.

Potenzielle Anwendungen für die untersuchten Ladekonzepte lassen sich aus den Nutzerprofilen ableiten. Aus Kundensicht eignen sich Brennstoffzellenfahrzeuge am besten, die Mobilitätsanforderungen zu erfüllen. Sie erfordern keine Umstellung bei der Nutzung, da sowohl Reichweite, als auch Betankungssystem mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. Allerdings fehlt im Gegensatz zu Elektrofahrzeugen die entsprechende Infrastruktur zu Gänze, womit FCEV erst langfristig eine Option darstellen werden. Auch konduktive Systeme sprechen viele Nutzergruppen an, speziell jene, die kleine Strecken zurücklegen, oder eine lange Verweildauer an der Ladestelle aufweisen (z.B.: Pendler). Für gewerbliche Flotten bieten sich BWS oder induktive Ladung an, je nach Einsatzzweck, für den Massenverkehr sind diese Konzepte aus heutiger Sicht jedoch nur bedingt geeignet

Bei dem Teilnutzwert der wirtschaftlichen Kriterien sind kabelgebundene Ladesysteme aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen der Infrastruktur klar überlegen sind. Durch das Unternehmen *Better Place*, das BWS einsetzt, kann dieses Konzept bei der wirtschaftlichen Betrachtung punkten (Geschäftsmodell). Mit großem Abstand liegt die Wasserstoffinfrastruktur auf dem letzten Platz. Der Aufwand für die Errichtung einer Wasserstoffwirtschaft sind auch heute noch zu hoch. Langfristig könnte sie jedoch das Angebot sinnvoll ergänzen.

6.3 Ergebnis und Ausblick

In einer ganzheitlichen Betrachtung weisen somit konduktive Ladesysteme den höchsten Nutzwert für Ladeinfrastruktur auf, da sie die Anforderungen an eine Ladeinfrastruktur insgesamt am besten erfüllen.

Gesamtnutzwert			
<i>Konduktiv</i>	<i>Induktiv</i>	<i>Batteriewechsel</i>	<i>Wasserstoff</i>
7,6	6,8	6,55	5,75

Tabelle 6-3: Nutzwert – Konzeptvergleich (gesamt)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der aktuelle Stand der Technik dokumentiert, sowie wirtschaftliche Überlegungen in die Analyse miteinbezogen. Dieser Ansatz integriert die vielen Dimensionen, die sich durch die verschiedenen beteiligten Interessensgruppen ergeben und ermöglicht eine Bewertung nach objektiven Kriterien. Die Ergebnisse zeigen die Vor- und Nachteile der jeweiligen Ladekonzepte klar auf und stellen diese in den Kontext potentieller Anwendungen. Für gewisse Anwendungen ist es sinnvoll, die jeweiligen Ladekonzepte unter den spezifischen Anforderungen der Nische nochmals zu betrachten. Das in dieser Arbeit entwickelte Framework kann dabei als Entscheidungshilfe dienen.

Eine Abschätzung der Entwicklungen in der Elektromobilität ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren aus heutiger Sicht schwer. Vieles spricht dafür, dass Elektrofahrzeuge Teil der automobilen Zukunft sein werden. Die Verknappung der globalen Ölreserven, strengere Emissionsgrenzwerte und das geänderte Umweltbewusstsein der Kunden sind dabei die wichtigsten Treiber. Zu den Voraussetzungen einer entsprechenden Marktdurchdringung gehören neben einem funktionierendem System Elektrofahrzeug – insbesondere hinsichtlich leistungsstarker, günstiger und langlebiger Akkumulatoren – eine unterstützende Service-, sowie eine flächendeckende Ladeinfrastruktur.²⁶¹

Weitere Potenziale liegen in begleitenden, innovativen Geschäftsmodellen, die dazu geeignet sind, dem Kunden überzeugende Vorteile zu schaffen, die über den ökologischen Mehrwert hinausgehen und den Wechsel auf Elektrofahrzeuge unterstützen bzw. beschleunigen. Dazu gehören auch „neue Mobilitätskonzepte“, wie z.B.: Car-Sharing oder intermodale Mobilitätsangebote.

Aufgrund der Betrachtungen in dieser Arbeit ist davon auszugehen, dass die Wertschöpfungskette von Elektrofahrzeugen sich von der heutigen grundlegend unterscheiden wird und somit eine wissenschaftliche Betrachtung des Themas als weiterführend erscheint.

²⁶¹ vgl. Skarabela (2009), S. 77.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

Bücher und Papers

BADER, C.: Verwendungschancen für elektrische Straßenfahrzeuge heute und morgen. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Elektrische Straßenfahrzeuge - Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Renningen : Expert-Verlag, 1994, S. 182-205

BIEDERMANN, Peter ; BIRNBAUM, Karl Ulf ; GRUBE, Thomas ; HÖHLEIN, Bernd ; MENZER, Reinhard ; WALBECK, Manfred ; STOLTEN, Detlef ; HAKE, Jürgen-Friedrich: *Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen*. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2001.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender- und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität*. Wien: 2010.

BRAUNER, Günther ; LEITINGER, Christoph ; SCHUSTER, Andreas: *Wesentliche Ergebnisse der E-Mobilitäts-Modellregion VLOTTE*. Wien: 2010.

BUNDESREGIERUNG, Die: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*. Berlin: 2008.

CHAN, C.C. ; CHAU, K.T.: An overview of Power Electronics in Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44 (1997) Nr. 1, S. 3-13

DINGER, Andreas ; RIPLEY, Martin ; MOSQUET, Xavier ; RABL, Maximilian ; RIZOULIS, Dimitrios ; RUSSO, Massimo ; STICHER, Georg: *Batteries for Electric Cars - Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*. [München u.a.]: 2010.

DRINGENBERG, Horst-Hendrik ; GAENZLE, Steffen ; HANDSCHUH, Martin ; KRUBASIK, Stephan: *Energiewirtschaft macht mobil*. Düsseldorf: 2009.

E-CONNECTED: *Abschlussbericht*. Wien: 2009.

E-CONNECTED: *Abschlussbericht*. Wien: 2010.

EICHLSEDER, Helmut ; KLELL, Manfred: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 1 der Serie: Auf welchem Weg kommt der Strom in die vielen Elektromobile. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2009, S. 75-79, (zit. 2009a)

- ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 2 der Serie: An welcher Stelle des Fahrzeugs soll der Anschluss an das Stromnetz erfolgen. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2009, S. 60-63, (zit. 2009b)
- ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 3 der Serie: Mit welcher Verbindung wird das Elektroauto an das Stromnetz angeschlossen. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2009, S. 80-83, (zit. 2009c)
- ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 4 der Serie: Grundlagen und Konzepte von Strom(tank)stellen. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2010, S. 36-39, (zit. 2010a)
- ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 5 der Serie: Der Fahrstromzähler im Elektrofahrzeug. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2010, S. 39-43, (zit. 2010b)
- ENGEL, Tomi: Netzintegration von Elektrofahrzeugen - Teil 6 der Serie: Infrastrukturtypen und Kommunikationsrollen. In: Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) (Hrsg.): *Sonnenenergie*. Nürnberg : 2010, S. 34-37, (zit. 2010c)
- FETTE, Harald: Strom ins Auto beamen. In: *Mobility 2.0* 1 (2011) S. 22-24
- FOLZ, Alexander: Erneuerbare Energien und Elektromobilität – Forschungsförderung des BMU. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 31-36
- FOURNIER, Guy ; HAUGRUND, Stefan ; TERPORTEN, Michael: Vehicle-to-Grid - What is the benefit for Sustainable Mobility? In: *Interdisciplinary Management Research* 5 (2009) S. 695-707
- FROST & SULLIVAN: *Global Electric Vehicles Market Forecast Database*. 2011.
- GEITMANN, Sven: *Wasserstoff und Brennstoffzellen*. 1. Aufl. Konstanz:. Christiani, Technisches Institut für Aus- und Weiterbildung, 2003.
- GEITMANN, Sven: *Erneuerbare Energien*. 3.Aufl. Oberkrämer: Hydrogeit-Verlag, 2010.
- GERINGER, Bernhard: *Verbrennungskraftmaschinen Grundzüge*. TU Wien, Vorlesungsskriptum, 2006
- GERL, Bernhard: *Innovative Automobilantriebe*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002

- GRUDEN, Dusan: Das Auto im Spannungsfeld zwischen Mobilitätswünschen und Umweltaforderungen. In: LENZ, H.P., Österreichischer Verband für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK) (Hrsg.): *Die Evolutionäre Entwicklung des Automobils*. Freienbach : Eurotax, 1994, S. 1-16
- HERRY, Max ; SEDLACEK, Norbert ; STEINACHER IRENE,: *Verkehr in Zahlen - Österreich, Ausgabe 2007*. Wien: 2007.
- HOBERG, Patrick ; LEIMEISTER, Stefanie ; JEHLE, Holger ; KRCMAR, Helmut: *Elektromobilität 2010*. Fortiss GmbH, An-Institut der Technischen Universität München, 2010
- HOFFMEISTER, Wolfgang: *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse*. Stuttgart [u.a]: Kohlhammer, 2000.
- HOFMANN, Peter: *Hybridfahrzeuge*. Wien [u.a.]: Springer, 2010.
- IPCC: *Climate Change 2007 - Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- JEONG, Kwi Seong ; BYEONG, Soo Oh: Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle. In: *Journal of Power Sources* 105 (2002) S. 58-65
- KALBERLAH, Adolf ; DRIEHORST, Frank-Aldo: Elektrofahrzeuge aus Sicht des Herstellers und des Marktes. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Elektrische Straßenfahrzeuge - Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Renningen : Expert-Verlag, 1994, S. 150-169
- KIEHNE, Heinz-Albert: Erwartungen an die Batterie von elektrischen Straßenfahrzeugen in verschiedenen Einsatzgebieten. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Elektrische Straßenfahrzeuge - Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Renningen : Expert-Verlag, 1994, S. 43-57
- KOCH, Walter A. S. ; CZOGALLA, Christian ; EHRET, Martin: *Grundlagen der Wirtschaftspolitik*. 3. Aufl. Stuttgart: Lucius und Lucius, 2008.
- KÖHLER, Uwe: Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen*. Renningen : Expert-Verlag, 2007, S. 34-48
- KUHNERT, Felix ; ARNOLD, Hansjörg ; KURTZ, Ralf ; BAUER, Wilhelm: *Elektromobilität - Herausforderungen für Industrie und Öffentliche Hand*. Frankfurt am Main: 2010.
- LEDJEFF, Konstantin: *Brennstoffzellen*. 1. Aufl. Heidelberg: Müller, 1995.
- LITZLBAUER, Markus: *Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher mit MATLAB*. TU Wien, Diplomarbeit, 2009
- MATTHIES, Gregor ; STRICKER, Klaus ; TRAENCKNER, Jan: *Zum E-Auto gibt es keine Alternative*. München: 2009.

- MIKULIC, L. ; KNÖRZER, G. ; ANTONY P.: Das Elektro- und Hybridfahrzeug-eine Lösung für die Zukunft? In: LENZ, H.P., Österreichischer Verband für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK) (Hrsg.): *Die Evolutionäre Entwicklung des Automobils*. Freienbach : Eurotax, 1994, S. 18-42
- MÜLLER, Bernd: Abschied vom eigenen Tank. In: *Spektrum der Wissenschaft* 10 (2010) S. 91-92
- NANSAI, Keisuke ; TOHNO, Susumu ; KONO, Motoki ; KASAHARA, Mikio ; MORIGUCHI, Yuichi: Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles. In: *Applied Energy* (2001) Nr. 70, S. 251-265
- NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Die Deutsche Normungs-Roadmap*. Berlin: 2010.
- NAUNIN, Dietrich: Wirtschaftliche, infrastrukturelle und verkehrspolitische Aspekte für den Einsatz elektrischer Straßenfahrzeuge. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Elektrische Straßenfahrzeuge - Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Renningen : Expert-Verlag, 1994, S. 1-22
- NAUNIN, Dietrich: Elektrofahrzeuge im Einsatz der letzten 15 Jahre. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen*. Renningen: Expert-Verlag, 2007, S. 6-19, (zit. 2007a)
- NAUNIN, Dietrich: Elektrofahrzeuge seit 100 Jahren. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen*. Renningen : Expert-Verlag, 2007, S. 1-5, (zit. 2007b)
- PANOS, Konstantin: *Praxisbuch Energiewirtschaft*. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- PFAFFENBICHLER, Paul Christian ; EMMERLING, Bettina ; JELINEK, Reinhard ; KRUTAK, Robin: *Pre-Feasibility-Studie zu "Markteinführung Elektromobilität in Österreich"*. Wien: 2009.
- QUINN, Casey ; ZIMMERLE, Daniel ; BRADLEY, Thomas H.: The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services. In: *Journal of Power Sources* 195 (2010) S. 1500-1509
- RAMMLER, Stephan ; WEIDER, Marc: Das Wasserstoffauto: Mythos, Markt und Mobilitätskultur. Eine Einleitung aus Sicht der sozialwissenschaftlichen Mobilitätsforschung. In: RAMMLER, Stephan ; WEIDER, Marc (Hrsg.): *Wasserstoffauto - Zwischen Markt und Mythos*. Münster : LIT-Verlag, 2005, S. 1-8
- REBERNIG, Georg: *Treibhausgasemissionen in Österreich 1990 bis 2006*. Wien: 2008.
- REKER, Ulrich: Kontaktlose Netzanbindung von Elektrofahrzeugen. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 94-101

- RINGELSTEIN, Jan ; PEZESHKI, Sina ; PRIOR, Johannes ; FUNKE, Stephan ; NESTLE, David: Intelligente Netzschnittstellen für Elektrofahrzeuge. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 79-93
- SCHEDLER, Dirk: *Kontaktlose Energieübertragung*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2009.
- SCHMID, Jürgen: Transformation der Energiesysteme und Elektromobilität. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 9-18
- SCHRAVEN, Sebastian ; KLEY, Fabian ; WIETSCHHEL, Martin: Induktives Laden von Elektromobilen - Eine techno-ökonomische Bewertung. In: *Fraunhofer ISI Working Paper Sustainability and Innovation* 8 (2010) S. 24
- SCHUBERT, Erhard: Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen*. Renningen : Expert-Verlag, 2007, S. 118-130
- SCHULÉ, Roland: *Brennstoffzellen im Kraftfahrzeug*. Würzburg: Vogel, 2006.
- SCHULZ, Philippe ; PRZYBYL, Siegbert ; SCHNELL, Patrick: Einstieg in den Umstieg. In: RAMMLER, Stephan ; WEIDER, Marc (Hrsg.): *Wasserstoffauto - Zwischen Markt und Mythos*. Münster : LIT-Verlag, 2005, S. 77-90
- SIMONS, Wolfgang: *Das Umweltauto*. Bremen: Kurze, 1998.
- SKARABELA, Nikolaus: *Stromtankstellen als Voraussetzung zur Schaffung flächendeckender elektrischer Mobilität*. FH Oberösterreich, Campus Wels, Diplomarbeit, 2009
- SMOLE, Erwin ; HAIDER, Bernhard: *Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf die Stromwirtschaft*. 2009.
- STYCZYŃSKI, Zbigniew ; STÖTZER, Martin ; NAUMANN, André: Integration of electric vehicles into the grid - Grid-to-Vehicle. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 62-78
- THOMAS, C.E.: Fuel cell and battery electric vehicles compared. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009) S. 6005-6020
- ULUCAY, Ali: Kabellos zu mehr Ladekomfort für Elektrofahrzeuge. In: *Dow Jones E-Mobility* 4 (2010) S. 1-2
- VCÖ: Automobilität - Die Grenzen als Chance. In: VCÖ (Hrsg.): *VCÖ Schriftenreihe - Mobilität mit Zukunft*. Wien : 2007,

- VCÖ: Klimaschutz im Verkehr. In: VCÖ (Hrsg.): *VCÖ Schriftenreihe - Mobilität mit Zukunft*. Wien : 2008,
- VCÖ: Potenziale von Elektromobilität. In: VCÖ (Hrsg.): *VCÖ Schriftenreihe - Mobilität mit Zukunft*. Wien : 2009,
- VDA, Verband der Automobilindustrie: *VDA-Position zur Elektromobilität*. Frankfurt, 2008
- WAGNER, Ulrich ; HEILEK, Christian: *Nutzung regenerativer Energien*. 10. Aufl. Herrsching: E und M, Energie-und -Management-Verlagsgesellschaft, 2009.
- WAGNER VOM BERG, Benjamin ; KÖSTER, Frank ; GÓMEZ, Jorge Marx: *Elektromobilität: Gegenwart oder Zukunft?*. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen, 2010.
- WALLENTOWITZ, Henning ; FREIALDENHOVEN, Arndt ; OLSCHESKI, Ingo: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- WEIDER, Marc ; MARZ, Lutz: Quantensprung oder Sackgasse? Zum Stand und zu Entwicklungsperspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Automobilindustrie. In: RAMMLER, Stephan ; WEIDER, Marc (Hrsg.): *Wasserstoffauto - Zwischen Markt und Mythos*. Münster : LIT-Verlag, 2005, S. 9-34
- WEIDLICH, Anke: Geschäftsmodelle Elektromobilität. In: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg.): *15.Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. Kassel : 2010, S. 135-142
- WIESSPEINER, Gerhard: *Drahtlos Akkus aufladen*. 2005.
- WOLF, Juliane ; SCHEUERER, Klaus: Das Ziel einer Wasserstoffwirtschaft rückt näher. In: RAMMLER, Stephan ; WEIDER, Marc (Hrsg.): *Wasserstoffauto - Zwischen Markt und Mythos*. Münster : LIT-Verlag, 2005, S. 55-76
- YUDAI, Honma ; KURITA, Osamu: *A Safety Stock Problem in Battery Switch Stations for Electric Vehicles*. Zhangjiajie, China: 2009.

Konferenzenunterlagen (Präsentationsfolien)

- ♦ *Modellregionen E-Mobilität: Internationale Projekte – Visionen – Chancen (Stattgefunden am 28.02.2011 in Wien)*

GARA, Stefan: *e-mobility on demand - Modellregion Großraum Wien*.

YUDAN, Amit: *Accelerating E-Mobility*.

- ♦ *"EL-MOTION 2011" – 2. österreichischer Fachkongress zum Thema Elektromotorisierungstechnologien für Personen- und Nutzfahrzeuge sowie Chancen für KMU in diesem Sektor (Stattgefunden am 13./14.04.2011 in Wien)*

LÖSER, Reinhard: *Batterietypen*.

- ♦ *Europäisches Forum Alpbach 2010*
(Stattgefunden von 19.08. bis 04.09.2010 in Alpbach)

NIGL, Karl: *Elektromobilität - Antrieb aus der Krise.*

- ♦ *Kraftwerk Batterie - Lösungen für Automobil und Energieversorgung*
(Stattgefunden am 20./21.01.2009 in Essen)

KRUHL, Jörg: *Management und Betreiberkonzepte von PHEV und EV im Stromnetz aus Sicht der Netzbetreiber.*

Internetquellen

INTERNETQUELLE 1:

<http://www.erdoel-vereinigung.ch/de/erdoelvereinigung/faq.aspx> (Gelesen am: 14.02.2011)

INTERNETQUELLE 2

http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf (Download am: 15.02.2011)

INTERNETQUELLE 3

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (Gelesen am: 14.02.2011)

INTERNETQUELLE 4

<http://duz.lebensministerium.at/duz/duz/category/1098> (Gelesen am: 14.02.2011)

INTERNETQUELLE 5

<http://www.makeroadssafe.org/Pages/home.aspx> (Gelesen am: 15.02.2011)

INTERNETQUELLE 6

<http://www.caam.org.cn/AutomotivesStatistics/20110121/1105051627.html>
(Gelesen am: 16.02.2011)

INTERNETQUELLE 7

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html (Gelesen am: 16.02.2011)

INTERNETQUELLE 8

<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/78671/modal-split-v6.html>
(Gelesen am: 17.02.2011)

INTERNETQUELLE 9

<http://img1.auto-motor-und-sport.de/VW-Golf-Blue-E-Motion-f498x333-F4F4F2-C-d74771b3-372383.jpg> (Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 10

<http://img2.auto-motor-und-sport.de/Renault-Fluence-Z-E--Seite-f498x333-F4F4F2-C-19662f9e-400840.jpg> (Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 11

http://www.thinkev.com/var/think/storage/images/gallery/think-city-yellow-quarter-front/18479-1-eng-GB/THINK-City-Yellow-Quarter-Front_imagelarge.jpg
(Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 12

http://www.bmwgroup.com/d/nav/index.html?../0_0_www_bmwgroup_com/home/home.html&source=overview (Gelesen am: 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 13

<http://www.solarelectricalvehicles.com/products.shtml> (Gelesen am: 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 14

<http://www.solarwebsite.nl/wp-content/uploads/2009/09/Aurora101.jpg>
(Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 15

http://www.egmcartech.com/wp-content/uploads/2009/12/toyota_prius_plug_in_hybrid_phv_main.jpg
(Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 16

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3c/Schema-Brennstoffzelle.svg/430px-Schema-Brennstoffzelle.svg.png> (Download am 04.02.2011)

INTERNETQUELLE 17

<http://www.emercedesbenz.com/Images/Sep05/27FuelCellFleetHitsOneMillionMileMark.jpg>
(Download am 22.01.2011)

INTERNETQUELLE 18

<http://www.greengear.de/wp-content/uploads/2010/06/Marktstart-Tabelle.jpg>
(Download am 17.12.2010)

INTERNETQUELLE 19

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:de:PDF>
(Download am 02.02.2011)

INTERNETQUELLE 20

http://www.toyota.at/cars/new_cars/prius/specs.aspx (Gelesen am: 02.02.2011)

INTERNETQUELLE 21

http://www.nzz.ch/nachrichten/hintergrund/wissenschaft/klimawandel/die_wissenschaftliche_sicht_der_dinge/neue_batterien_fuer_elektroautos_1.4770624.html
(Gelesen am: 02.02.2011)

INTERNETQUELLE 22

<http://www.citybikewien.at/> (Gelesen am: 07.02.2011)

INTERNETQUELLE 23

<http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/314774/infrastruktur/kooperationspartner/infrastrukturpartner/>
(Gelesen am: 07.02.2011)

INTERNETQUELLE 24

http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2010-10-ecartec/Epos_WS_DE.pdf
(Download am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 25

<http://www.schrack.at/produkte-shop/news/stromtankstellen-energie-aus-der-steckdose/>
(Gelesen am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 26

http://www.keba.com/fileadmin/user_upload/KeMove_Prospekt_DE_web.pdf
(Download am 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 27

<http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/450780/infrastruktur/produkte-services/rwe-ladesaeule/> (Gelesen am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 28

http://www.eon-energie.com/pages/eea_de/Innovation/Innovation/E-Mobilitaet/Ladestationen/index.htm (Gelesen am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 29

<http://www.elektrotankstellen.net/> (Gelesen am: 08.03.2011)

INTERNETQUELLE 30

<http://themoderngreen.com/wp-content/uploads/2008/10/pininfarina-bo.jpg>
(Download am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 31

http://www.ultimatecarpage.com/images/large/3868/Pininfarina-B0-Concept_5.jpg (Download am: 10.03.2011)

INTERNETQUELLE 32

[http://www.mennekes.de/web/screen?ID=mennekes%2Ffive-browse-fresh%2F\[lncontent%2C\[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP-720e0874%3A12138fce78f%3A-7ff1%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp.def-live%2Fde%2F\]\]](http://www.mennekes.de/web/screen?ID=mennekes%2Ffive-browse-fresh%2F[lncontent%2C[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP-720e0874%3A12138fce78f%3A-7ff1%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp.def-live%2Fde%2F]])
(Gelesen am: 11.03.2011)

INTERNETQUELLE 33

<http://www.e-connected.at/content/telefonzellen-zu-stromtankstellen>
(Gelesen am: 17.03.2011)

INTERNETQUELLE 34

<http://www.betterplace.com/global-progress> (Gelesen am: 18.03.2011)

INTERNETQUELLE 35

<http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations> (Gelesen am: 18.03.2011)

INTERNETQUELLE 36

http://www.stromtankstellen.eu/images/betterplace_batteriewechsel.png
(Download am: 20.03.2011)

INTERNETQUELLE 37

<http://www.betterplace.com/the-solution-driver-services> (Gelesen am: 22.03.2011)

INTERNETQUELLE 38

<http://www.betterplace.com/the-company-pressroom-pressreleases-detail/index/id/better-place-unveils-first-automated-battery-switch-for-japan-ev-study> (Gelesen am: 21.03.2011)

INTERNETQUELLE 39

<http://www.media.renault.at/?article=955> (Gelesen am: 22.03.2011)

INTERNETQUELLE 40

<http://www.betterplace.com/the-company-pressroom-pressreleases-detail/index/id/better-place-and-renault-launch-fluence-z-e-the-first-unlimited-mileage-electric-car-together-with-innovative-emobility-packages-in-europe-s-first-better-place-center>
(Gelesen am: 22.03.2011)

INTERNETQUELLE 41

<http://green.blogs.nytimes.com/2009/05/13/better-place-unveils-battery-swap-station/>
(Gelesen am: 24.03.2011)

INTERNETQUELLE 42

<http://www.solar-driver.dasreiseprojekt.de/hauptbericht.php?id=6032&ok=15&uk=80&uuk=0&uuuk=0&typ=>
(Gelesen am: 24.03.2011)

INTERNETQUELLE 43

<http://glocalist.com/typo3temp/pics/b05acedd1d.jpg> (Download am: 02.04.2011)

INTERNETQUELLE 44

<http://www.blogcdn.com/www.autobloggreen.com/media/2009/04/toyota-rav4-ev-paddle-plug.jpg> (Download am: 05.04.2011)

INTERNETQUELLE 45

http://www.hybridelektroauto.com/wp-content/gallery/ecartec-award-2010/sew_eurodrive.jpg
(Download am: 02.06.2011)

INTERNETQUELLE 46

<http://www.autobild.de/artikel/schreibers-stromkasten-teil-86-1206801.html>
(Gelesen am: 03.04.2011)

INTERNETQUELLE 47

http://i.auto-bild.de/ir_img/75613561_efd75ed39b.jpg (Download am: 03.04.2011)

INTERNETQUELLE 48

http://www.tuev-sued.de/pkw_nutzfahrzeuge/aktuelles/tuev_sued_und_e.on_treiben_entwicklung_von_strom_tankstellen_voran (Gelesen am: 04.04.2011)

INTERNETQUELLE 49

<http://www.heise.de/autos/artikel/Korea-testet-das-beruehrungslose-Laden-von-Elektroautos-957228.html> (Gelesen am: 04.04.2011)

INTERNETQUELLE 50

http://www.emc-eu.de/index-Dateien/HPSU_lh2_tank_system_323.gif
(Download am: 03.05.2011)

INTERNETQUELLE 51

http://i.auto-bild.de/ir_img/68459565_1371257d7d.jpg (Download am: 03.05.2011)

INTERNETQUELLE 52

http://www.hycenta.tugraz.at/Image/Anlage%20SO_II.JPG (Download am: 03.05.2011)

INTERNETQUELLE 53

<http://www.tenaris.com/ProductsServices/IndustrialAutomotive/de/images/Jumbo1.jpg>
(Download am: 03.05.2011)

INTERNETQUELLE 54

<http://www.argemuc.com/de/img/4sub3info2.jpg> (Download am: 03.05.2011)

INTERNETQUELLE 55

<http://www.vattenfall.de/de/innovationen.htm> (Gelesen am: 14.04.2011)

7.2 Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2

Abbildung 2-1: Erdölbilanz Österreich 2009 [siehe Internetquelle 3].....	5
Abbildung 2-2: Aufbringung von Strom in Österreich 2009 [siehe Internetquelle 4]	6
Abbildung 2-3: Weltweite CO ₂ -Emissionen nach Sektoren [siehe VCÖ (2008), S. 12]	7
Abbildung 2-4: Verkehr ist einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen [siehe VCÖ (2008), S. 15.].....	8
Abbildung 2-5: Globale Autodichten nach Region [siehe VCÖ (2007), S. 14].....	9
Abbildung 2-6: Anteil verschiedener Antriebe am österreichischen PKW-Bestand 2009 [siehe Internetquelle 7]	10
Abbildung 2-7: Anteil der werktäglichen Wege nach Wegzweck und Modal-Split Österreich 1995 [siehe Herry u.a. (2007), S. 100].....	11

Kapitel 3

Abbildung 3-1: Beispiele Konversionsfahrzeug [siehe Internetquelle 9 und 10].....	16
Abbildung 3-2: Beispiel Purpose-Design Fahrzeug [siehe Internetquelle 11].....	17
Abbildung 3-3: Solarmobil [siehe Internetquelle 14]	18
Abbildung 3-4 <i>Toyota Prius</i> PHEV [siehe Internetquelle 15].....	20
Abbildung 3-5: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [siehe Internetquelle 15]	20
Abbildung 3-6: Brennstoffzellenfahrzeug von <i>Daimler</i> [siehe Internetquelle 17]]	21
Abbildung 3-7: Ragone-Diagramm für elektrische Energiespeicher [siehe Saft (2009), (zit. nach: E-Connected (2009), S. 12)].....	28
Abbildung 3-8: Typischer Tagesverlauf des Stromverbrauchs (Lastprofil) für Sommer- und Winter [siehe Smole u.a. (2009), S. 10]	30
Abbildung 3-9: Gesamtladekurven für einen Tag (24h-Verlauf) bei 20% Elektrofahrzeugen [Smole u.a. (2009), S. 11]	30
Abbildung 3-10: Gesamtstromverbrauchsprofil inkl. Ladeenergien für einen typischen Sommer- (oben) und einen typischen Wintertag (unten) (20% Elektrofahrzeuge, 2% Stromverbrauchssteigerung) [siehe Smole u.a. (2009), S. 12].....	31
Abbildung 3-11: Technisches Potenzial erneuerbarer Energien weltweit nach Substitutionsmethode [siehe Schmid (2010), S.9]	32

Abbildung 3-12: Entwicklungspotenzial der Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien [siehe Schmid (2010), S.10]	33
Abbildung 3-13: Übersicht CO ₂ -Emissionen [siehe Kuhnert u.a. (2010), S.46]	34
Abbildung 3-14: Vehicle-to-Grid Konzept [siehe Kuhnert u.a. (2010), S.48]	35
Abbildung 3-15: TCO Vergleich Basis EV und VW Polo 1.4 [siehe Nigl (2010), S. 5, eigene Bearbeitung]	40
Abbildung 3-16: Interessensgruppen bei Elektromobilität (Bsp.)	42

Kapitel 5

Abbildung 5-1: Anschlussposition für die Netzanbindung [siehe Engel (2009b), S. 60]	52
Abbildung 5-2: Typische Kabelführungen bei Elektroautos [siehe Engel (2009b), S. 61]	53
Abbildung 5-3: Pininfarina „Blue Car“ [siehe Internetquelle 30 und 31]	53
Abbildung 5-4: Abschätzung der benötigten Infrastruktur in Frankreich [siehe E-Connected, S.26]	60
Abbildung 5-5: Modellregion Großraum Wien [siehe Gara (2011), S. 8]	61
Abbildung 5-6: Batteriewechselstation [siehe Internetquelle 36]	66
Abbildung 5-7: Batteriewechselstationen für Österreich [siehe Yudan (2011), S. 28]	70
Abbildung 5-8: Stakeholder bei Better Place Geschäftsmodell [vgl. Wallentowitz u.a. (2010), S. 165, eigene Bearbeitung]	74
Abbildung 5-9: Blockschaltbild eines induktiven Ladegerätes [siehe Wiesspeiner (2005), S. 2]	77
Abbildung 5-10: Funktionsprinzip einer stationären induktiven Ladestation [siehe Ulucay (2010), S. 1]	78
Abbildung 5-11: Funktionsprinzip für dynamisches induktives Laden [siehe Internetquelle 43]	79
Abbildung 5-12: EMV-Grenzwerte im Industriebereich [siehe Reker (2010), S. 98]	82
Abbildung 5-13: Induktives „Paddle“ (<i>Hughes Power Control</i>) [siehe Internetquelle 44]	83
Abbildung 5-14: Induktive Matte (<i>SEW Eurodrive</i>) [siehe Internetquelle 45]	84
Abbildung 5-15: Primärspule hinter dem Nummernschild (<i>VAHLE/Kostal</i>) [siehe Internetquelle 47]	84
Abbildung 5-16: Strommehrkostenvergleich induktiver und konduktiver Ladesysteme [siehe Schraven u.a. (2010), S. 14]	85

Abbildung 5-17: LH ₂ -Tanksystem („Kryotank) [siehe Internetquelle 50].....	93
Abbildung 5-18: Tankstutzen für gasförmigen Wasserstoff [siehe Internetquelle 51].....	94
Abbildung 5-19: <i>HyCentA</i> (Graz) [siehe Internetquelle 52].....	95
Abbildung 5-20: Brandtestreihe mit Tanks für Wasserstoff (links) und Benzin (rechts) [siehe Eichseder u.a. (2010), S. 286].....	96
Abbildung 5-21: GH ₂ -Tanklastwagen [siehe Internetquelle 53].....	99
Abbildung 5-22: LH ₂ -Tanklastwagen [siehe Internetquelle 54]	99
Abbildung 5-23: Wasserstoffkorridore für Deutschland und Europa [siehe Schulz u.a. (2005), S. 83].....	101
Abbildung 5-24: Fünf Hauptentwicklungspfade zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ [vgl. Weider u.a. (2005), S. 26]	106

Anhang

Abbildung A-1: Grafische Ermittlung des Lagerbestands bei Batteriewechselsystemen (Annäherung) [vgl. Yudai (2009), S. 8].....	I
Abbildung A-2: Nutzwertanalyse (Gesamt).....	II
Abbildung A-3: Szenariobeschreibung [siehe Pfaffenbichler u.a. (2009), S. 118]	III

7.3 Tabellenverzeichnis

Kapitel 2

Tabelle 2-1: Relevante Parameter für die betrachteten Fahrprofile [siehe Litzlbauer (2009), S. 21].....	13
---	----

Kapitel 3

Tabelle 3-1: Hybridvarianten [siehe Hofmann (2010), S. 19]	19
Tabelle 3-2: Marktvorschau für Elektrofahrzeuge in Europa [siehe Internetquelle 18]	22
Tabelle 3-3: Kennwert und Eigenschaften verschiedener Batterietechnologien [vgl. Löser (2011), S. 7ff].....	27
Tabelle 3-4: Zeitliche Entwicklung einzelner Bereiche [siehe E-Connected (2009), S.35].....	36
Tabelle 3-5: Geschäftsmodelle und deren Bewertung [siehe Weidlich (2010), S. 137f]	39

Kapitel 4

Tabelle 4-1: Bewertungsschema Nutzwertanalyse	47
Tabelle 4-2: Bewertungsskala	47

Kapitel 5

Tabelle 5-1: Technische Spezifikationen verschiedener Steckertypen [siehe Engel (2009c), S. 82f, eigene Bearbeitung]	55
Tabelle 5-2: Kostenabschätzung für konduktive Ladesysteme am Beispiel Schweiz [vgl. E-Connected (2010), S. 26; Engel (2010a), S. 38f.]	59
Tabelle 5-3: Nutzwertanalyse – konduktive Ladesysteme	63
Tabelle 5-4: Elektrischer Leistungsbedarf einer Batteriewechselstation	70
Tabelle 5-5: Kostenabschätzung für Batteriewechselstationen in Österreich.....	72
Tabelle 5-6: Nutzwertanalyse - Batteriewechselstation	75
Tabelle 5-7: Ergonomischer Vergleich induktiver und induktiver Ladesysteme.....	80
Tabelle 5-8: Nutzwertanalyse – Induktive Ladesysteme.....	89
Tabelle 5-9: Liste der veröffentlichten Normen des ISO/TC 197 [siehe Eichlseder u.a. (2010), S. 294].....	95

Tabelle 5-10: Wasserstoffkosten [siehe Lehmann (2001), in: Geitmann (2003), S. 32] 101

Tabelle 5-11: Nutzwertanalyse - Wasserstoff 104

Kapitel 6

Tabelle 6-1: Nutzwert – Konzeptvergleich (technisch) 107

Tabelle 6-2: Nutzwert – Konzeptvergleich (wirtschaftlich) 109

Tabelle 6-3: Nutzwert – Konzeptvergleich (gesamt) 111

7.4 Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

AGM	Absorbent Glass Mat
BEV	Battery Electric Vehicle
BIG	Bundessimobiliengesellschaft
BMW	Bayrische Motorenwerke
BWS	Batteriewechselstation
CAN-BUS	Controller Area Network
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment
CEN	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CIM	Common Information Model
CRM	Customer Relationship Management
CSP	Concentrates Solar Power
DC	Direct Current
DGS	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik
DME	Dimethylether
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
EVU	Energieversorgungsunternehmen
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FIA	Fédération Internationale de l'automobile
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ISO	International Organization for Standardisation
IT	Informationstechnologie
KFZ	Kraftfahrzeug
LKW	Lastkraftwagen
MCV	Mega City Vehicle
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MWSt.	Mehrwertsteuer
NGO	Non-Government Organization
NoVA	Normverbrauchsabgabe

OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personen- und Nahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PLC	Powerline Communication
PM	Particle Matter
REEV	Range Extended Electric Vehicle
RFID	Radio Frequency Identification
RWE	Rheinisch-Westfälisches Energiewerk
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEV	Solar Electric Vehicle
TCO	Total Cost of Ownership
TÜV	Technischer Überwachungsverein
V2G	Vehicle-to-Grid
VCÖ	Verkehrsclub Österreich
VDE	Verein der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik
VKM	Verbrennungskraftmaschinen
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activity
ZEV	Zero Emission Vehicle

Chemische Abkürzungen

CH₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO₂	Kohlendioxid
GH₂	Gaseous Hydrogen
HC	Kohlenwasserstoff
HKW	Halogenierte Kohlenwasserstoffe
LH₂	Liquid Hydrogen
Li-Ion	Lithium-Ionen
N₂O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NaNiCl	Natrium- Nickelchlorid
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NOX	Stickoxid
Pb/PbO₂	Blei/Bleiodioxid

Physikalische Abkürzungen

°C	Grad Celsius
Bar	Druckeinheit
Kg	Kilogramm
Km	Kilometer
kW	Kilowatt (elektrische Leistung)
kWh	Kilowattstunde (elektrische Energie)
MW	Megawatt
Nm³	Normkubikmeter
T	Tonne
µm	Micrometer
V	Volt (elektrische Spannung)
W/l	Watt pro Liter

8 Anhang

8.1 Lagerbestand bei Batteriewechselstationen

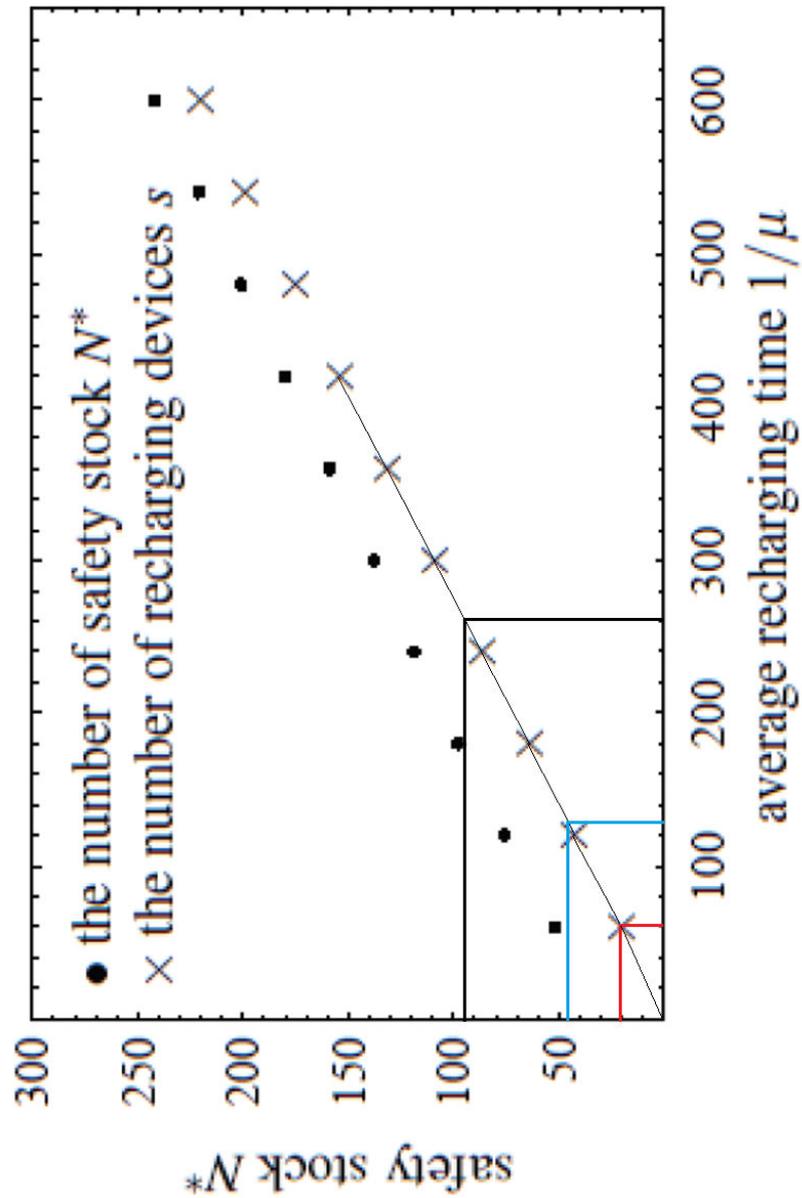


Abbildung A-1: Grafische Ermittlung des Lagerbestands bei Batteriewechselsystemen (Annäherung)

[vgl. Yudai (2009), S. 8]

8.2 Nutzwertanalyse – Gesamtwertung

	Konduktiv			Batteriewechsel			Induktiv			Brennstoffzelle			
	Gewichtung	Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert	Nutzwert	
Ergonomie	15%	5	0,75	10	1,50	10	1,50	8	1,20	10	1,50	8	1,20
Normung & Standardisierung	15%	10	1,50	2	0,30	6	0,90	7	1,05	7	1,05	7	1,05
Sicherheit	15%	6	0,90	10	1,50	7	1,05	5	0,75	5	0,75	5	0,75
Batterietechnologie	5%	8	0,40	3	0,15	9	0,45	10	0,50	10	0,50	10	0,50
Netzintegration	5%	8	0,40	9	0,45	2	0,10	10	0,50	10	0,50	10	0,50
Fahrzeugtechnik	5%	8	0,40	2	0,10	6	0,30	8	0,40	8	0,40	8	0,40
Integration in bestehende Infrastruktur	10%	8	0,80	9	0,90	7	0,70	1	0,10	1	0,10	1	0,10
Geschäftsmodelle	5%	10	0,50	7	0,35	1	0,05	1	0,05	1	0,05	1	0,05
Kosten	15%	9	1,35	5	0,75	7	1,05	3	0,45	3	0,45	3	0,45
Ressourcenverbrauch	5%	5	0,25	5	0,25	9	0,45	5	0,25	5	0,25	5	0,25
Nutzerprofile	5%	7	0,35	6	0,30	5	0,25	10	0,50	10	0,50	10	0,50
Total	100%		7,60		6,55		6,80		5,75		6,80		5,75

Abbildung A-2: Nutzwertanalyse (Gesamt)

8.3 Szenariobeschreibung

Tabelle 15: Überblick über die Maßnahmen und Veränderungen der Rahmenbedingungen der untersuchten Szenarien

Maßnahme	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Ab 2011 bis 2020 Reduktion Herstellungskosten für Hybridfahrzeuge um 0,6 % p. a.	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ab 2011 bis 2020 Reduktion Herstellungskosten für E-Pkws um durchschnittlich 4,7 % p. a.	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Zunahme des Anteils der Tankstellen mit Schnelllade- und Wartungsmöglichkeit für E-Pkw von 10 % (2011) auf 100 % (2020).		X	X		X	X	X	X	X
Verdopplung des Anteils der verfügbaren Hybrid-Modelle im Jahr 2011.		X	X	X	X	X	X	X	X
Lineare Zunahme des Anteils der verfügbaren Hybridmodelle auf ca. 50 % im Jahr 2020.		X	X	X		X	X	X	X
Verdopplung des Anteils der verfügbaren E-Pkw-Modelle im Jahr 2012.		X	X	X	X	X	X	X	X
Lineare Zunahme des Anteils der verfügbaren E-Pkw-Modelle auf ca. 10% im Jahr 2020.		X	X	X		X	X	X	X
Ab 2012 linearer Rückgang des Anteils der reinen VKM-Modelle auf 85 % im Jahr 2020 (d.h. 15% sind nur mehr als Hybrid- oder E-Pkw-Modell verfügbar).		X	X	X		X	X	X	X
Ab 2011 Reduktion Treibstoffverbrauchs der Hybridfahrzeuge um 1 % p. a.		X	X	X	X	X	X	X	X
Ab 2012 Erhöhung der Reichweite der E-Pkw um 17 %.		X	X	X	X	X		X	X
Ab 2015 nochmalige Erhöhung der Reichweite der E-Pkw um 43 %.		X	X	X	X	X		X	X
Ab 2011 Investitionsförderung für Hybridfahrzeuge in der Höhe von 5 % des Kaufpreises.					X		X		
Ab 2011 Investitionsförderung für E-Pkw in der Höhe von 10 % des Kaufpreises.	X	X	X	X	X		X	X	X
Ab 2011 NOVA für Hybridfahrzeuge halbiert.					X		X	X	X
Erhöhung der NOVA für VKM 2011 um +40 %, 2012 um weitere +15 % und 2015 um weitere +17 %.	X	X	X	X	X		X	X	X
Ab 2010 Erhöhung der Betriebskosten für VKM-Fahrzeuge um 5,0 % p. a.									X