

Elektrostraßenfahrzeuge

Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen

Im Auftrag von



Elektrostraßenfahrzeuge

Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen

Auftraggeber:	e.on
FfE-Auftragsnummer:	502.12
Bearbeiter/in:	Tobias Blank
Fertigstellung:	Dezember 2007

Impressum:

Endbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

zum Projekt:

Elektrostraßenfahrzeuge
Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von
Elektrostraßenfahrzeugen

Auftraggeber:

e.on

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Motivation	1
1.1	Allgemeine Betrachtung	1
1.2	SWOT-Analyse	3
2	Technikanalyse	5
2.1	Elektrische Speichersysteme.....	5
2.1.1	Übersicht elektrischer Speichersysteme	5
2.1.2	Bewertung einzelner Speichersysteme	9
2.2	Ladetechniken	11
2.2.1	Ladung über häusliche Standard-Steckdose	11
2.2.2	Ladung über Hochleistungsanschluss.....	12
2.2.3	Ladung über spezielle Elektro-Tankstellen/Ladesäulen.....	12
2.2.4	Wechselbatterie-Stationen	12
2.3	Ladekurven	13
3	Betrachtete Fahrzeuge	16
3.1	Allgemein	16
3.1.1	Elektrofahrzeug	16
3.1.2	Hybridfahrzeug.....	17
3.2	Referenzfahrzeuge	18
3.2.1	Kleinwagen.....	18
3.2.2	Kompaktklasse-PKW.....	19
3.2.3	Plug-In-Hybrid-Fahrzeug.....	20
4	Methodik	21
4.1	Ermittlung des technischen Potenzials.....	21
4.2	Ermittlung des Ladelastgangs	24
5	Annahmen	30
5.1	Rahmenbedingungen.....	30
5.1.1	Pessimistisches Szenario.....	30
5.1.2	Optimistisches Szenario.....	30
5.2	Privat zurückgelegte Strecken	32
5.3	Substitutionsgrad.....	33
5.4	Verbrauch.....	39

5.5 Ladeleistung	40
6 Ermittlung des technischen Potentials	41
6.1 Potenzialbegriffe	41
6.2 Verkehrsstatische Basisdaten	42
6.3 Pessimistisches Szenario	44
6.4 Optimistisches Szenario	46
7 Lastgangsynthese	52
7.1 Verkehrslast.....	52
7.2 Verbrauch	58
7.3 Ladeleistung	58
7.4 Ladelastgang	59
7.5 Gesamtlastkurven	61
8 Zusammenfassung und Ausblick	64
8.1 Handlungsempfehlungen	64
8.2 Ausblick	65
9 Literaturverzeichnis	67

Elektrostraßenfahrzeuge – Szenarien zur künftigen Nutzung und Synthese von Gesamlastkurven

1 Motivation

1.1 Allgemeine Betrachtung

Mobilität ist das Rückgrat für Wirtschaftswachstum und Zuwachs an Beschäftigung. Der Großteil der Mobilität in Deutschland beruht auf dem mobilen Individualverkehr. Dieser erfolgt heute nahezu ausschließlich durch verbrennungsmotorisch betriebene Personenkraftwagen. Begrenzte Ölressourcen bei gleichzeitig weltweit stark steigendem Bedarf an Kraftstoffen und zu erwartende Preissteigerungen von Mineralölprodukten erfordern neue Wege der Energiebereitstellung für diesen volkswirtschaftlich bedeutenden Anwendungssektor.

Das Elektrostraßenfahrzeug (ESF) ist neben zukünftigen wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen die einzige heute schon realisierbare Option zum Einsatz aller Primärenergieträger im Verkehr. Diese mögliche Diversifizierung stellt ein wichtiges energiepolitisches Kriterium dar. Darüber hinaus sind elektrische Straßenfahrzeuge die bis heute einzige Form eines am Einsatzort 100 % emissionsfreien Verkehrsträgers. Elektrische Energie im Verkehr verursacht auch bei ganzheitlicher Betrachtung bis zur Schnittstelle Reifen/Straße bei den meisten Schadstoffarten gegenüber konventionellen Techniken geringere spezifische Emissionen sowie einen geringeren Primärenergieaufwand pro Fahrtkilometer. Im Zuge der bevorstehenden Erneuerung und Modernisierung eines Großteils der Kraftwerkleistung in Deutschland und Europaweit werden die Energieeffizienz steigen und sich die Emissionsfaktoren für die elektrische Energie sowie der Primärenergieverbrauch von ESF noch weiter reduzieren. Eine verstärkte Einspeisung regenerativer Energien ins Netz verstärkt diesen Umstand noch weiter.

Batterie-ESF haben bereits ab einem Strombereitstellungs-Nutzungsgrad von 35 % einen geringeren Primärenergiebedarf als Diesel-Pkw. Dieser Nutzungsgrad wurde bereits 2003 im deutschen Kraftwerksmix erreicht. H₂-Brennstoffzellen-Fahrzeugen erreichen die Energieeffizienz von Erdgasfahrzeugen erst ab einem Nutzungsgrad der Wasserstoff-Bereitstellung von 50 %, die von Diesel-Pkw erst ab 70 % (siehe **Abbildung 1-1**). So stellen bereits heute Batterie-ESF die effizienteste Form des mobilen Individualverkehrs dar.

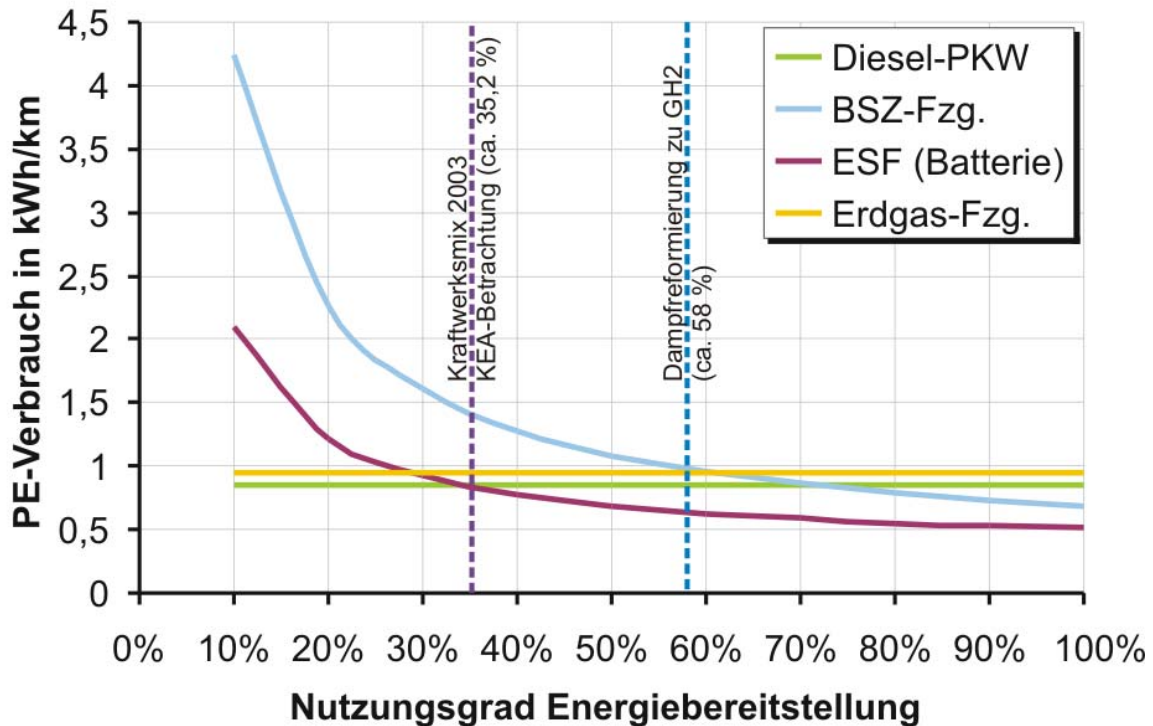


Abbildung 1-1: *Abhängigkeit des Primärenergieverbrauchs vom Nutzungsgrad der Energiebereitstellung*

In Abbildung 1-1 wird der Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit des Nutzungsgrades für die Energiebereitstellung Strom und H₂ graphisch dargestellt. Die Nutzungsgrade der Energiebereitstellung von Öl und Gas sind mit 85,2 % bzw. 95,3 % angesetzt, eingeschlossen ist auch der kumulierte Primärenergieaufwand für die Herstellung der Fahrzeuge (100 GJ Diesel-Pkw, 110 Erdgas-Pkw, 160 GJ BSZ-Pkw, 180 Batterie-Pkw). Dieser Vergleich zeigt, ab welchem Bereitstellungsaufwand Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge aus primärenergetischer Sicht konkurrenzfähig werden.

Weiter stellen elektrisch betriebene Straßenfahrzeuge energiewirtschaftlich betrachtet eine zusätzliche schaltbare Last dar. Elektrische Speicher, wie sie in ESF zum Einsatz kommen, entkoppeln den Verbrauch zeitlich von der Erzeugung der Energie. Dies erleichtert die Einbindung nicht steuerbarer Energieträger wie Wind und Photovoltaik sowie Strom aus wärmegeführten KWK-Anlagen ins Netz. Der Lastverlauf ist hinsichtlich Energiemenge und zeitlicher Verteilung eine noch vollkommen unbekannte Größe.

Dies sind wichtige Argumente für die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der künftigen Nutzung von Elektrostraßenfahrzeugen.

In dieser Studie werden auf der Grundlage des Stands der Technik von ESF und seiner Entwicklungsperspektiven exemplarische Referenzfahrzeuge und die erwarteten typischen Einsatz- und Ladeprofile definiert (Fahrzeugtyp, Antriebsart, Heizung/Klimatisierung, Speichersystem, Aktionsradius, Nutzungsprofil, Ladezeiten und -dauern, Nutzungsgrad, etc.). Mit Blick auf die technischen und betrieblichen Eigenschaften dieser Referenzfahrzeuge werden technische und realisierbare Potenziale

von ESF szenarisch bis zum Jahr 2020 abgeschätzt. Diese Studie soll als Grundlage einer weiteren Arbeit dienen, die das Nutzungsverhalten von Elektrofahrzeugen energiewirtschaftlich bewertet. Weiter kann darauf aufbauend die elektrizitätswirtschaftliche sowie infrastrukturelle Integration untersucht werden.

1.2 SWOT-Analyse

Im Rahmen einer SWOT-Analyse (engl. Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Gefahren)) soll eine Situationsanalyse von Elektrostraßenfahrzeugen durchgeführt werden. Sie bietet eine prägnante Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken von ESF. Hierdurch soll die Frage beantwortet werden, inwieweit das Produkt ESF zukünftig ein entscheidendes Segment im Automobilmarkt im Vergleich zu den herkömmlich motorisierten Fahrzeugen einnehmen kann. Die SWOT-Analyse zielt vorwiegend auf Marktchancen und Marktrisiken ab.

Dabei stehen die produktexternen Umwelteinflüsse bei der Chancen-Risiken-Analyse im Vordergrund. Die produktexternen Faktoren werden im Allgemeinen durch politische und gesellschaftliche Einflüsse geprägt. Die produktinterne bzw. produktbezogene Stärken-Schwächen-Analyse untersucht die Vor- und Nachteile des Produkts für Marktteilnehmer.

Abbildung 1-2 zeigt eine Aufstellung wesentlicher Stärken, Schwächen von Elektrostraßenfahrzeugen sowie Chancen und Risiken, die mit deren Einführung einhergehen.

Produkt	<p style="text-align: center;">Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfacher mechanischer Aufbau • Substitution von fossilen Energieträgern • Energiespeicher für fluktuierende Erzeuger (Wind, Sonne, etc.) • Private Ladung problemlos möglich • Infrastruktur vorhanden (Elektrisches Verteilnetz) 	<p style="text-align: center;">Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frühes Stadium im Produktlebenszyklus (F&E-Phase, Einführungsphase) • Kurze Lebensdauer der Speicher • Geringe Reichweite • Unzuverlässige Reichweitenabschätzung • Hohe Investitionskosten
Umwelt	<p style="text-align: center;">Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Politische Zielvorstellungen (Klimadiskussion) • Fossile Energieverknappung • Wachsender Regelenergiemarkt • Ausnahmeregelungen (Nullemissionszonen, Maut-Befreiungen) • Steuererleichterungen 	<p style="text-align: center;">Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Akzeptanzproblem Mehrstromverbrauch • Uneinheitliche Förderinstrumente in den einzelnen Ländern • Fehlende Kundenakzeptanz (Reichweite / Ladedauer) • Zusätzliche Last

Abbildung 1-2: SWOT-Analyse zur Frage: „Stellen ESF zukünftig ein entscheidendes Marktsegment dar?“

Aus Sicht der Autoren sind die wesentlichen Treiber für die ESF-Technologie die Diversifizierung des Primärenergiebedarfs im Verkehrssektor und die Umweltvorteile durch lokale Emissionsfreiheit und globale Emissionsminderung. Durch die günstige Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie lassen sich gute Fahrleistungen auch bei vergleichsweise geringerer Motorleistung und höherer Effizienz erzielen.

Als wesentliches Hemmnis wird meist der eingeschränkte Aktionsradius von ESF gesehen. In der Praxis ist dieser für die überwiegende Mehrheit aller Einzelfahrten mehr als ausreichend, allerdings muss noch das Problem einer genaueren Reichweitenanzeige gelöst werden. Hier ist noch entsprechende Weiterentwicklung der Batterieperipherie erforderlich, z.B. in Kombination mit Navigationssystemen zur Berechnung des verbleibenden Energiebedarfs bis zum Fahrziel. Auch muss die Ladeinfrastruktur flächendeckend ausgebaut werden, ggf. einschließlich Batterie-Wechselstationen.

Schließlich sollte die mögliche Rolle von ESF im Rahmen eines elektrizitätswirtschaftlichen Lastmanagements untersucht werden, bis hin zur Frage der Bereitstellung von negativer oder evtl. auch positiver Regelenergie.

2 Technikanalyse

In einer Technikanalyse wird die energietechnisch relevante Fahrzeugzeugtechnik beleuchtet. Es erfolgt eine Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes elektrischer Speicher. Dabei werden unterschiedliche Varianten elektrischer Antriebe aufgezeigt. Weiter erfolgt eine kurze Darstellung verschiedener Ladetechniken.

2.1 Elektrische Speichersysteme

Der Schlüssel für den Erfolg elektrisch angetriebener Fahrzeuge liegt in der effizienten und kostengünstigen Bereitstellung der nötigen elektrischen Energie im Fahrzeug. Folgende grundsätzliche Wege für die Deckung des Bedarfs sind denkbar:

- Direkte Speicherung in elektrochemischen Systemen (z.B. Batterien, SuperCaps)
- Indirekte Speicherung durch elektromechanische Komponenten (z.B. Schwungrad)
- Stromerzeugung on-board durch wasserstoffversorgte Brennstoffzellen
- Externe Stromzufuhr (Oberleitung, spurgebundene Systeme, Induktion etc.)

Diese Studie gibt einen kompakten Überblick über aktuell verfügbare und bereits erprobte direkte Speichersysteme, die in Elektro- und Hybridfahrzeugen im Einsatz sind, d.h. Batterie- und Kondensatorsysteme. Indirekte Speichersysteme sowie die Möglichkeit einer externen Stromzufuhr und Stromerzeugung on-board durch Brennstoffzellen werden innerhalb dieser Studie nicht behandelt.

2.1.1 Übersicht elektrischer Speichersysteme

Da Batteriesysteme zum Einsatz in Elektrofahrzeugen wieder aufladbar sein müssen, beschränkt sich die weitere Betrachtung auf Sekundärzellen. Aktuell sind folgende Sekundärsysteme am stärksten verbreitet:

- Blei-Säure (Pb-Acid)
- Nickel-Cadmium (Ni-Cd)
- Nickel-Metallhydrid (Ni-MH)
- Lithium-Ionen (Li-Ion)
- Lithium-Polymer (Li-Poly)
- ZEBRA (zero emission battery research activity)
- Doppelschichtkondensatoren (DLC) / Supercaps

Blei-Säure-Akku

Der Blei-Säure-Akku wird überwiegend im KFZ-Sektor als Starterbatterie und zur Stützung des KFZ-Bordnetzes eingesetzt. Weiter findet sie Verwendung als Traktionsbatterie in Flurförderfahrzeugen und Elektro- sowie Hybridfahrzeugen. Darüber hinaus wird sie stationär eingesetzt in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) und Energiespeichersystemen für photovoltaische Systeme. Sie bestechen vor allem durch geringe Kosten, große Verfügbarkeit und die Einsatzmöglichkeit in einem großen Temperaturbereich.

Der Entwicklungsstand von Blei-Säure-Batterien für Elektrofahrzeuge ist im Vergleich zu allen anderen erwähnten Systemen am weitesten fortgeschritten. Daher sind bezüglich dieser Speichertechnik keine relevanten Entwicklungssprünge mehr zu erwarten. Die Anforderungen, die an die Sicherheit gestellt werden, werden von diesem Batterietyp zweifelsohne erfüllt, da diese Technik bis heute für Kfz-Starterbatterien eingesetzt wird. Es wurde zwar schon in mehreren Feldversuchen gezeigt, dass die Leistungsdichte ausreichend ist, um damit Elektrofahrzeuge zu betreiben, jedoch weisen alle anderen betrachteten Batterietechniken höhere Leistungsdichten auf /IFE 07/ Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Die spezifischen Batteriekosten sind aufgrund der niedrigen Energiedichte relativ hoch, da bei voller Ausnutzung der Kapazität die Lebensdauer der Batterie stark eingeschränkt wird. Bei den Investitionskosten ist keine große Änderung zu erwarten, da die Produktionstechnik von Blei-Akkumulatoren als ausgereift betrachtet werden kann. Die geringe Energiedichte des Blei-Akkus hat eine geringe Reichweite zur Folge, sodass ein rein elektrisch betriebenes Straßenfahrzeug lediglich für Kurzstreckeneinsätze denkbar ist.

Nickel-Cadmium-Akku

Batteriesysteme auf der Basis von Nickel-Cadmium-Zellen finden größtenteils Verwendung als unterbrechungsfreie Stromversorgungen sowie Notbeleuchtungssysteme. Ein weiteres großes Einsatzgebiet stellen elektrische Werkzeuge und Akkus für den Consumer-Bereich dar. Sie zeichnen sich durch eine **lange Zyklenlebensdauer** aus und sind weitestgehend **wartungsfrei**.

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren weisen in etwa die gleiche Energiedichte wie Blei-Säure-Akkus auf, ihre spezifische Leistung liegt jedoch geringfügig über dem Wert dessen, was diese erreichen. Die spezifischen Batteriekosten liegen etwas höher als die der Blei-Säure-Batterie. Die sicherheitsrelevanten Kriterien werden prinzipiell von diesem Akku-Typ erfüllt, jedoch ist die Verwendung von **Cadmium unter ökologischen Gesichtspunkten kritisch** zu sehen. Der Entwicklungsstand dieses Batterie-Systems kann als ausgereift betrachtet werden. Entwicklungssprünge sind daher kaum mehr zu erwarten. Die Einsatzmöglichkeit in Elektrofahrzeugen entspricht weitestgehend dem des Blei-Säure-Akkus.

Nickel-Metallhydrid-Akku

Der Nickel-Metallhydrid-Akku unterscheidet sich in seiner Funktionsweise nur unwesentlich von der Nickel-Cadmium-Batterie. In diesem Fall besteht die Anode aus einer Metall-Legierung. Dadurch entfällt das toxische Cadmium als Bestandteil der Batterie. Da die Zellspannung, die Entladekurven sowie das Ladeverhalten nahezu identisch mit der Nickel-Cadmium-Batterie sind, lassen sich beide Batterien gegenseitig austauschen. Da Ni-MH-Batterien neben einer **höheren Energiedichte** jedoch auch höhere Kosten aufweisen, ergeben sich für beide Systeme unterschiedliche Anwendungsgebiete. Ni-MH-Systeme werden vorwiegend in tragbaren Kommunikations- und Unterhaltungsgeräten eingesetzt. Zunehmend finden sie jedoch auch Verwendung als Traktionsbatterie, da sie durch ihre hohe Energiedichte größere Aktionsradien als Ni-Cd-Batterien oder Blei-Säure-Batterien erlauben.

Nickel-Metallhydrid-Batterien weisen in etwa eine doppelt so hohe Energiedichte auf wie Blei-Säure- bzw. Nickel-Cadmium-Akkus. Aufgrund der Tatsache, dass dieser Akku-Typ im Vergleich zu anderen Systemen erst seit relativ kurzer Zeit in der Entwicklung ist, kann noch mit geringen **Steigerungen bezüglich der Energiedichte gerechnet** werden. Ihre Leistungsdichte weist mit ca. 800 W/kg den höchsten Wert unter den konventionellen Batterien auf. Hinsichtlich der sicherheitstechnischen Aspekte bestehen keinerlei Zweifel an der Einsetzbarkeit dieses Batterie-Systems in Kraftfahrzeugen. Die Tauglichkeit von Nickel-Metallhydrid-Batterien für Traktionsanwendungen wird vor allem durch kommerziell verfügbare Serienfahrzeuge unter Beweis gestellt. So finden Nickel-Metallhydrid-Systeme in den Hybridfahrzeugen der Hersteller **Toyota, Honda und Lexus** bereits Anwendung /TOY 07/, /LEX 07/. Inwieweit dieser Akku-Typ jedoch für rein elektrisch betriebene Fahrzeuge verwendet werden kann, liegt an der weiteren Entwicklung der Energiedichte. Mit aktuell verfügbaren Batterien sind lediglich Kurz- und Mittelstreckeneinsätze denkbar.

Lithium-Ionen-Akku

Lithium-Ionen-Speicher weisen im Vergleich zu den anderen Systemen eine **hohe Energiedichte** auf. Dies liegt am hohen elektrochemischen Potenzial sowie dem geringen spezifischen Gewicht von Lithium. Ihr Einsatzgebiet erstreckt sich daher im Wesentlichen auf mobile Anwendungen, wo kleine Batterien mit hoher Kapazität gefragt sind. Sie ersetzen daher meist die in diesem Sektor früher verwendeten Ni/MH-Batterien. Die Anode besteht dabei aus Kohlenstoff, in dem Lithium-Atome eingelagert sind (LiC_6), die Kathode aus einer Lithium-Verbindung (LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4) und einem flüssigen organischen Elektrolyten.

Lithium-Polymer-Akkumulatoren weisen im Wesentlichen den gleichen Aufbau wie Li-Ion-Akkus auf und stellen deren Weiterentwicklung dar. Sie besitzen einen nicht-organischen Elektrolyten auf Polymerbasis (z.B. Polyvinylidenfluorid, PVDF). Dieser liegt als feste bis gelartige Folie vor. Daher unterliegt der Lithium-Polymer-Akku nahezu keinen Beschränkungen hinsichtlich der Bauform. Feste Elektrolyt-Folien erreichen eine ausreichend hohe Ionenleitfähigkeit erst **ab einer Betriebstemperatur von rund 60 °C**. In modernen Lithium-Polymer-Akkus wird deshalb als Elektrolyt ein Gel eingesetzt, das bereits bei Raumtemperatur seine volle Leistungsfähigkeit erreicht. Lithium-Ionen und Lithium-Polymer-Akkus sind empfindlicher gegenüber elektrischen und thermischen Extrembedingungen. So kann Über- und Tiefentladen, sowie der Betrieb bei sehr hohen und niedrigen Temperaturen über etwa 60 °C bzw. unter 0 °C die Zellen schädigen oder im schlimmsten Fall zerstören.

Lithium-Ionen-Batterien sowie Lithium-Polymer-Batterien weisen mit Energiedichten von ca. 150 Wh/kg die höchsten Werte unter den aufgeführten Batteriesystemen auf. Ihre Leistungsdichte beträgt zwischen 300 W/kg und 500 W/kg und ist somit etwa halb so groß wie die der Nickel-Metallhydrid-Batterien. Aufgrund eines großen Marktes befinden sich Lithium-Ionen- bzw. Lithium-Polymer-Akkus trotz einer im Vergleich zu den anderen Systemen geringen Entwicklungszeit in einem relativ **weit fortgeschrittenen Entwicklungsstadium**. Allerdings sind weitere geringe Steigerungen hinsichtlich der Energiedichte und vor allem der Leistungsdichte denkbar. Ihrem Einsatz in Traktionsanwendungen stehen prinzipiell lediglich **Sicherheitsaspekte** entgegen. Aktuell verfügbare Batterien dieses Typs bestehen den Nageltest nicht und sind leicht entzündlich. Der Nageltest ist ein Prüfverfahren

bezüglich des Verhaltens bei mechanischen Beschädigungen. So bergen Lithium-Ionen- bzw. Lithium-Polymer-Batterien ein großes Risiko im Falle eines Unfalls. Durch den Einsatz verschiedener neuer Technologien wird derzeit versucht, diese Probleme zu lösen. Ob diese Batterien für den Einsatz in Elektrofahrzeugen geeignet sind, hängt im Wesentlichen von den Kosten ab.

Lithium-Metall-Polymer-Batterien befinden sich zurzeit noch im Entwicklungsstadium. Sie zeichnen sich durch bessere Kennzahlen im Vergleich zu herkömmlichen Batteriesystemen aus. So sind heute schon Energiedichten von 200 Wh/kg im Labor realisierbar. Ferner weisen sie weitere Vorteile gegenüber anderen Batteriesystemen auf. Sie sind überladefest und kommen ohne ein aufwändiges Lademanagement aus. Weiter ist eine Tiefentladung der Batterien bis 0 V möglich, ohne dass Schäden eintreten. Ebenso weisen diese Zellen keinen Memory-Effekt auf, und sind demzufolge problemlos teillade- und teilentladefähig, was für den Einsatz im mobilen Sektor von entscheidendem Vorteil ist. Dazu kommt auch die Eigenschaft der **Schnellladefähigkeit**. Sie weisen einen großen nutzbaren Temperaturbereich bis hinunter zu -40 °C auf.

ZEBRA

Die ZEBRA-Batterie zählt zu den **Hochtemperatur-Batterien**. Diese unterscheiden sich von gängigen Batterien dahingehend, dass die Elektroden bei Betriebstemperatur flüssig sind und der Elektrolyt ein Festkörper. Die hohen Temperaturen sind notwendig, um die Elektroden in einen flüssigen Zustand zu bringen. Außerdem wird dadurch der keramische Elektrolyt erst leitfähig. Nur im flüssigen Zustand der Elektroden kann eine Lade- und Entladereaktion stattfinden.

Die Natrium-Schwefel-Batterie (NaS-Batterie) hat als negative Elektrode Natrium, als positive Elektrode Schwefel. Im Betriebszustand bei etwa **290 bis 390 °C** sind beide Elektroden flüssig. Als Elektrolyt dient eine protonenleitfähige Keramik, so genanntes β -Alumina. Während der Entladung gibt metallisches Natrium je ein Elektron ab, die positiv geladenen Natrium-Ionen wandern durch den Elektrolyten zur positiven Elektrode und bilden dort zusammen mit einem Elektron, das über den äußeren Stromkreis geflossen ist, Natriumpolysulfid. Während der Ladung wird dieser Prozess umgekehrt.

Bei der ZEBRA-Batterie (Natrium-Nickelchlorid-Batterie) besteht die negative Elektrode aus Natrium, die positive aus geschmolzenem Nickelchlorid. Neben dem keramischen Elektrolyten kommt ein Hilfselektrolyt aus flüssigem NaAlCl_4 zum Einsatz. An der Entladereaktion nehmen jedoch nur die Elektroden teil; es wandert ein Na^+ -Ion durch die Elektrolyte zur positiven Elektrode und reagiert dort mit dem Nickelchlorid zu Kochsalz und Nickel.

Es gibt praktisch keine Nebenreaktionen, die in der Batterie auftreten. Dies hat zur Folge, dass der coulombsche Wirkungsgrad gleich 100 % und der energetische Wirkungsgrad ebenfalls sehr gut ist. Darüber hinaus altern diese Batterien elektrochemisch praktisch nicht. Nachteilig sind dagegen die hohen Betriebstemperaturen. Häufige Temperaturschwankungen führen zu einer mechanischen Belastung der keramischen Elektrolyte, die brechen können. Dadurch werden Zellen dann unbrauchbar.

ZEBRA-Batterien werden immer wieder in elektrischen Versuchsfahrzeugen eingesetzt. Das aktuellste Beispiel ist der Smart Fortwo ed (siehe 3.2.1). In diesem Fall werden die Fahrzeuge im Flottenbetrieb eingesetzt. Inwieweit der Einsatz in privaten Pkws sinnvoll ist, ist allerdings umstritten, da bei langen Standzeiten die thermischen Verluste einer Hochtemperatur-Batterie den Gesamtwirkungsgrad stark beeinträchtigen können. ZEBRA-Batterien werden zurzeit nur von der Firma MES-DEA S.A. in der Schweiz hergestellt. /ISEA 07/

Doppelschichtkondensator / Supercap

Doppelschichtkondensatoren (DLC) weisen eine hohe Leistungsdichte und lange Lebensdauer auf. Da sie Energie sowohl schnell speichern als auch abgeben können, stellen sie eine interessante Ergänzung zu Batterien dar. Ihre Energiedichte beträgt derzeit ca. 3 Wh/kg /WIM 06/ und liegt damit weit unter dem Wert von Batterien. Ihre Leistungsdichte bewegt sich im Bereich von 100 W/kg bis zu 1500 W/kg. Sie eignen sich daher gut als Speicher für Beschleunigungsanwendungen und das rekuperative Bremsen. Allerdings sind sie aufgrund ihrer sehr geringen Energiedichte nur als Puffer in einem aus mehreren Speichertypen aufgebauten System einsetzbar. So kann beispielsweise beim Bremsen im Supercap Energie gespeichert werden, die danach, zumindest teilweise, in die Batterie umgeladen wird. Umgekehrt kann zur Beschleunigung des Fahrzeugs gespeicherte elektrische Energie im Kondensator verwendet werden, der danach aus der Batterie wieder aufgeladen wird.

2.1.2 Bewertung einzelner Speichersysteme

Der Einsatz in Elektrofahrzeugen (EV) sowie in Hybridfahrzeugen (HEV) stellt hohe Anforderungen an Batteriesysteme, die sich an dem geforderten Maß an Mobilität und Komfort für jedes moderne KFZ orientieren.

So muss sichergestellt sein, dass die fahrtechnischen Eigenschaften konventioneller Fahrzeuge ohne wesentliche Einschränkungen auch von einem elektrisch bzw. hybrid betriebenen Fahrzeug geboten werden können.

Eine Übersicht über technische Parameter, nach denen Batterien für den Elektrofahrzeugeinsatz bewertet werden sollten, gibt /DGES 99/. Dort werden die wichtigsten Parameter genannt. Unter anderem sind dies:

Energiedichte

Die spezifische Energiedichte eines Batteriesystems bestimmt die Reichweite des Fahrzeugs, da ein gewisses Speichervolumen und Gesamtgewicht nicht überschritten werden kann. Zudem ergeben sich aus einem großen Batteriegewicht ein höheres Leistungsgewicht bzw. eine geringere gewichtsbezogene Leistung. Daher sind bevorzugt Batterien mit hoher Energiedichte einzusetzen. Aktuelle Batteriesysteme haben laut Tabelle 2-1 praktische Energiedichten zwischen 35 und 155 Wh/kg, Benzin weist im Vergleich dazu eine spezifische Energie von ca. 12.000 Wh/kg auf. Es ist allerdings nicht möglich, aufgrund dieser Zahlen einen direkten Vergleich der beiden Antriebsarten durchzuführen, da die Antriebs-Nutzungsgrade sehr unterschiedliche sind und elektrisch betriebene Fahrzeuge Fahrenergie rekuperieren und in der Traktionsbatterie speichern können. Ein mit Benzin angetriebenes Fahrzeug weist einen spezifischen

Endenergieverbrauch von ca. 60 kWh/100km auf, bei einem Elektrostraßenfahrzeug liegt der Wert bei etwa 20 kWh/100km. /WIB 03/

Leistungsdichte

Das Fahrverhalten eines Fahrzeugs hängt im Wesentlichen von der Leistung des Antriebsaggregats ab. Dieses bestimmt Beschleunigung und Geschwindigkeit. Um etwa der Leistung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu entsprechen, wird in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug eine Leistung von 25 bis 50 kW gefordert. /DGES 99/. Weiter hängt von der Leistung des Speichers die Ladegeschwindigkeit ab. Die Leistungsdichte aktueller Batterien liegt nach Tabelle 2-1 zwischen 100 und 850 W/kg. Inwiefern damit das Leistungsgewicht konventionell angetriebener Fahrzeuge erreicht werden kann, ist von der Gesamtkonzeption des Antriebssystems abhängig. Dabei sind verschiedene konstruktionstechnische Varianten denkbar. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, wäre eine genauere Untersuchung erforderlich.

Sicherheit

Um eine Batterie in einem Fahrzeug einsetzen zu können, müssen verschiedene Sicherheitskriterien erfüllt werden. Sie hat laut /DGES 99/ sehr hohe Priorität. So müssen nicht nur während dem normalen Betrieb Probleme durch Überladung, Kurzschluss, usw. ausgeschlossen werden können, sondern auch ein von der Batterie ausgehendes erhöhtes Gefahrenpotenzial bei einem Unfall oder Brand. So muss eine im KFZ eingesetzte Batterie den Nageltest erfolgreich absolvieren. Durch Einpressen eines Metallstiftes wird in der Batterie ein Kurzschluss herbeigeführt. Dabei darf diese nicht in Brand geraten bzw. explodieren.

Spezifische Batteriekosten

Ein weiterer wichtiger Parameter sind die spezifischen Batteriekosten. Sie geben die Kosten pro Kilometer Fahrleistung während der gesamten Batterielebensdauer an. Sie sind abhängig von den Investitionskosten, den Betriebskosten sowie der Zyklenlebensdauer der Batterie. Da die Investitionskosten für Batterien nur gering durch technische Weiterentwicklung beeinflusst werden, ist es notwendig, Batteriesysteme auf geringe Betriebskosten und hohe Lebensdauer hin zu optimieren. Die Lebensdauer wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Betriebsbedingungen, wie Temperatur und mechanische Belastungen, wie Vibrationen und Schock. Einen weiteren großen Einfluss auf die Lebensdauer hat der verwendete Ladezustandsbereich. Je weniger die Batterie tiefentladen bzw. überladen wird, desto höher sind die zu erwartende Zyklenlebensdauer und der Gesamtenergiedurchsatz der Batterie. /WEN 99/

Dies erfordert jedoch eine höhere Kapazität der Batterie und somit höhere Investitionskosten. Für eine optimale Auslegung des Gesamtsystems ist somit eine detaillierte Untersuchung notwendig, die neben technischen Anforderungen auch wirtschaftliche Aspekte betrachtet.

Zyklusstabilität und hohe Lebensdauer

Ein wesentlicher Parameter zum Einsatz einer Batterie ist deren Lebensdauer. Dabei ist neben der Zyklenlebensdauer auch die kalendarische Lebensdauer von Interesse, die so genannte Zyklusstabilität. Die erreichbare Zyklenzahl einer Batterie während der

Lebensdauer ist abhängig vom nutzbaren Speicherinhalt. Generell gilt, dass eine größere Ausnutzung der Gesamtkapazität mit einer geringeren Zyklenlebensdauer einhergeht. Dies liegt daran, dass bei Tiefentladungen sowie auch bei Überladungen irreversible Prozesse stattfinden, die zu einer schnelleren Alterung gleichen. Diese Prozesse beginnen jedoch nicht erst ab einer bestimmten Grenze, sondern nehmen immer mehr zu, je näher sich der Ladezustand dem kritischen Punkt annähert. Daher wird versucht, elektrochemische Speicher in einem unkritischen Bereich zu betreiben. Dieser liegt meist im Bereich zwischen 25 % und 75 % Ladung (State of Charge – SOC). Allerdings ist in diesem Fall nur noch die halbe Kapazität des Speichers nutzbar. Als Bewertungskriterium für die Lebensdauer wird daher oft der erreichbare Amperestunden-Durchsatz einer Batterie herangezogen. Dieser stellt ein Optimum des Produkts aus Zyklenzahl und des nutzbarem Speicherinhalt dar.

Vergleich

Einen Vergleich der betrachteten Batteriesysteme hinsichtlich ihrer Kennzahlen zeigt Tabelle 2-1. Dort sind neben der Nennspannung, die theoretische und praktische Energiedichte und die Leistungsdichte sowie weitere Kennzahlen der einzelnen Systeme aufgeführt. Diese geben Aufschluss über die Verwendbarkeit in elektrisch betriebenen Fahrzeugen.

Tabelle 2-1: Kennzahlenvergleich verschiedener Speichersysteme /LIN 01/

Speicher-Typ	Nennspannung in V	Theor. Energiedichte in Wh/kg	Prakt. Energiedichte in Wh/kg	Leistungsdichte in W/kg	Betriebs-temperatur in °C	Zyklenzahl	Ladezeit in h ¹⁾	Selbstentladung in % / Monat
Blei-Säure	2,0	162	35	200	-20 - 50	800	8 - 24	3
Nickel-Cadmium	1,2	244	35	260	-40 - 60	1000	1 - 16	10
Nickel-Metallhydrid	1,2	240	75	850	-30 - 65	900	1 - 2	30
Lithium-Ionen	4,0	410	150	300	-20 - 60	600	2,5	2
ZEBRA	2,58	787	115	160	270 - 350	3000		-
Supercap (DLC)	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Standardladedauer bis zur Vollladung. Aus Lebensdauergründen ist jedoch eine Teilladung zu bevorzugen (z. B. SOC: 20 % bis 80 %). In diesem Bereich ist durchaus eine Schnellladung größer 1C realisierbar.

2.2 Ladetechniken

Im Gegensatz zum Auftanken bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen erfolgt bei Elektrostraßenfahrzeugen ein Aufladen des elektrischen Speichers. Dies kann über verschiedene Arten erfolgen. Nachstehend sind unterschiedliche für ESF in Frage kommende Ladetechniken erläutert.

2.2.1 Ladung über häusliche Standard-Steckdose

Eine Ladung über eine gewöhnliche Haushaltssteckdose (230 V / 16 A) hat den Vorteil, dass sie jederzeit von jedem ESF-Nutzer zu Hause durchgeführt werden kann. Es sind keine aufwändigen Installationen notwendig. Eine entsprechend Zuleitung kann in das Auto integriert werden. Das Lademanagement müsste bordseitig über einen integrierten Laderegler erfolgen. Allerdings ist davon auszugehen, dass dies ein geringes technisches Problem darstellt, da sich eine externe Einspeisung nicht wesentlich von einer

Einspeisung durch Rekuperation unterscheidet. Allerdings wäre eine solche Ladung auf eine Leistung von etwa 3 kW beschränkt. Dadurch dauert eine Ladung für 100 km Reichweite etwa 6 bis 7 Std. Das entspricht einer Ladegeschwindigkeit von ca. 15 km/h.

2.2.2 Ladung über Hochleistungsanschluss

Eine Alternative zur Ladung über den gewöhnlichen 230 V-Anschluss zu Hause ist die Ladung an einem 16 A-Drehstromanschluss. Dieser ermöglicht eine Ladeleistung von etwa 15 kW. Ein Drehstromanschluss kann, soweit noch nicht vorhanden, prinzipiell problemlos in jedem Haushalt nachgerüstet werden. Wie bei der Ladung über die Standardsteckdose müsste das Lademanagement bordseitig über einen integrierten Laderegler erfolgen. Allerdings sollte diese Anordnung prinzipiell bevorzugt gewählt werden, weil dadurch eine optimale Anpassung der Ladung auf das eingebaute Speichersystem möglich ist. Außerdem vereinfacht dies den Aufbau einer Lade-Infrastruktur, da lediglich der Anschluss vorgehalten werden muss. Im Falle einer solchen Ladung ist zu überlegen, ob genormte Anschlusseinheiten für ESF eingeführt werden sollen, sodass ein Ladeanschluss nur zu diesem Zweck verwendet werden kann. In einer verplombten Bauweise würde dies einen separaten ESF-Stromtarif ermöglichen.

Die Ladung für eine Reichweite von 100 km würde in diesem Fall etwa 80 Minuten dauern, das entspricht einer Ladegeschwindigkeit von 75 km/h. Dieses Beispiel zeigt, dass eine Nachladung um 10 km problemlos mit aktueller Technik unter 10 Minuten zu bewältigen ist. Für diese Betrachtung wurde angenommen, dass die Leistung über einen Drehstromanschluss zur Verfügung steht. Ein Gleichzeitigkeitsfaktor wurde in diesem Fall nicht berücksichtigt.

2.2.3 Ladung über spezielle Elektro-Tankstellen/Ladesäulen

Eine Ladung über speziell eingerichtet Elektro-Tankstellen bzw. Ladesäulen erfordert definitiv die Verwendung von einheitlichen Anschlusssystemen. Der Ladestrom könnte bei Anschluss an das Drehstromsystem auch höher als 16 A sein (siehe 2.2.2). Elektro-Tankstellen könnten konzentriert in Parkhäusern, auf Parkplätzen installiert werden – zum einen öffentlich als auch bei privaten und gewerblichen Betreibern als auch auf Firmenparkplätzen am Arbeitsplatz. Zukünftige Überlegungen könnten darin bestehen, drahtlose bzw. zumindest automatisierte Ladesysteme zu entwickeln, um den logistischen Aufwand zum Nachladen für den Nutzer zu verringern.

2.2.4 Wechselbatterie-Stationen

Eine weite Alternative zur „Aufladung“ von Elektrostraßenfahrzeugen stellen Systeme dar, die darauf beruhen, die Speichereinheit an sich, also die gesamte Batterie, physikalisch zu tauschen. Dabei wird eine entladene Batterie aus einem Pkw durch eine voll aufgeladene Batterie ersetzt. Um solche System etablieren zu können, ist es notwendig, sich auf wenige unterschiedliche Formfaktoren für Speicher zu verständigen. Dies vereinfacht die Logistik der Wechselbatteriestationen. Der Austausch der Speichereinheiten sollte so automatisiert wie möglich ablaufen. Das erfordert natürlich weitere Normungen und Vorgaben für ESF, die Einschränkungen beim Fahrzeugdesign mit sich bringen.

Das Konzept des Batterietauschs wurde bereits um 1990 in Düsseldorf in einem Modellversuch mit Bussen getestet.

Vor allem unter dem Aspekt der zukünftigen Nutzung der Batteriespeicher im Regelenergiemarkt (siehe 8.2) sollte die Machbarkeit von Wechselbatterie-Stationen-Konzepten überlegt werden, da so zentrale Speichereinheiten an diesen Stationen entstehen können.

2.3 Ladekurven

Zur Bestimmung der Last, die durch die Ladevorgänge entsteht, ist die Kenntnis über die Ladekurven der einzelnen Speichersysteme notwendig. Geht man von einer großen Zahl an Fahrzeugen aus, die gleichzeitig geladen werden, sowie von einer kontinuierlichen Ladung bis zum Erreichen der Vollladung, so resultiert daraus eine lediglich von der Anzahl der zu ladenden Fahrzeuge abhängige konstante Last. Der Verlauf der Ladekurven ist bei einer hohen Anzahl von gleichzeitigen aber zeitlich versetzten Ladevorgängen lediglich von geringer Bedeutung.

Wird allerdings eine gesteuerte Beladung betrachtet, so muss als zusätzliche Größe die aktuelle Ladeleistung und entsprechende Zeitverschiebungen im Ladeablauf berücksichtigt werden. Getaktete Ladevorgänge erfordern eine Anpassung der Ladekurve, so dass das Gesamtlastverhalten zur Ladung der Speicher einen dynamischeren Charakter hat als bei der ungesteuerten Beladung.

Gängige Ladekurven

Abbildung 2-1 zeigt die Standardladekurve einer Nickel-Cadmium- bzw. Nickel-Metall-Hydrid-Zelle. Das Laden findet mit **konstantem Strom** statt. Die eingeladene Energiemenge kann direkt aus der Ladezeit ermittelt werden. Mit größerem Ladestrom kann die Ladezeit reduziert werden (Schnellladung). Unter Berücksichtigung der o.g. Grenzen von 20 % und 80 % können Schnellladevorgänge bei Nickel-Metall-Hydrid-Systemen prinzipiell in einer Stunde durchgeführt werden (1C-Rate), da hier nur eine geringe Wärmeentwicklung entsteht.

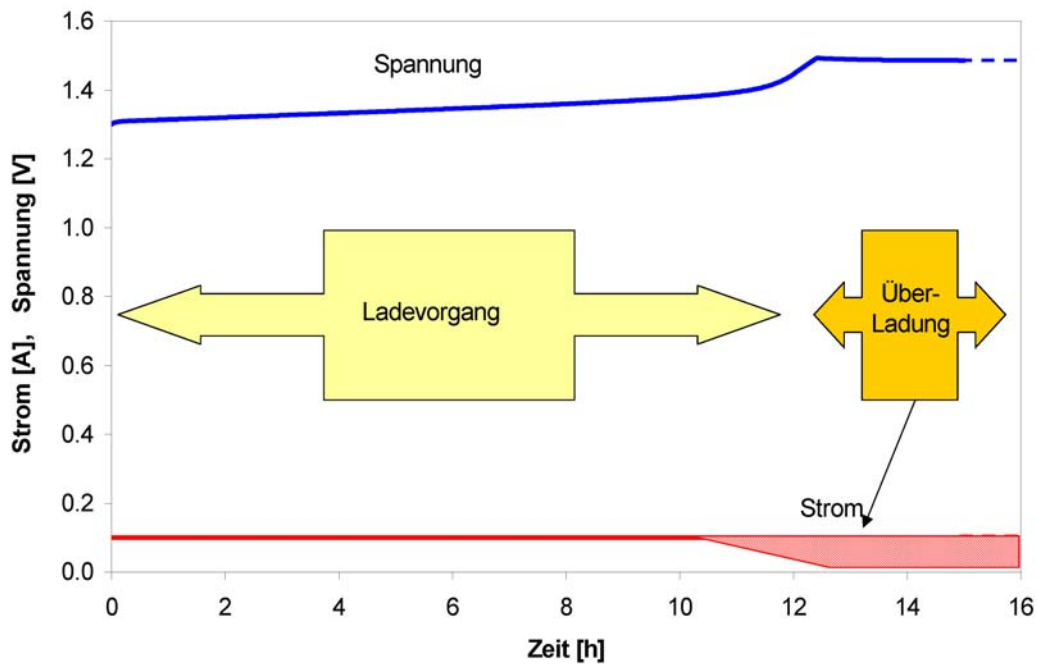


Abbildung 2-1: Standardladung für Nickel-Cadmium- und Nickel-Metall-Hydrid-Zellen

Wird ein Ladeverfahren ohne Abschaltkriterium verwendet (I-Ladung), dann kommt es mit dem Erreichen des Vollladezustandes zum Überladen der Batterie. Der gesamte Ladestrom geht dann in die Nebenreaktionen und bei verschlossenen Batterien kommt es zur Erwärmung. Bei Batterien mit flüssigem Elektrolyten kommt es zu einer Zersetzung des Elektrolyten. Daher werden heute prinzipiell ausschließlich Ladeverfahren mit Abschaltkriterium eingesetzt (I-a-Ladung). Als Abschaltkriterium bei NiCd- und NiMH-Batterien dient meist der Spannungs- und Temperaturverlauf eines Ladevorgangs.

Abbildung 2-2 zeigt die Standardladekurve einer Lithium-Ionen-Zelle. Von den meisten Zellen-Herstellern wird empfohlen, die Ladung zunächst mit konstantem Strom (I-Ladung) und dann mit konstanter Spannung (U-Ladung) durchzuführen. Dies wird auch als I-U-Ladung bezeichnet.

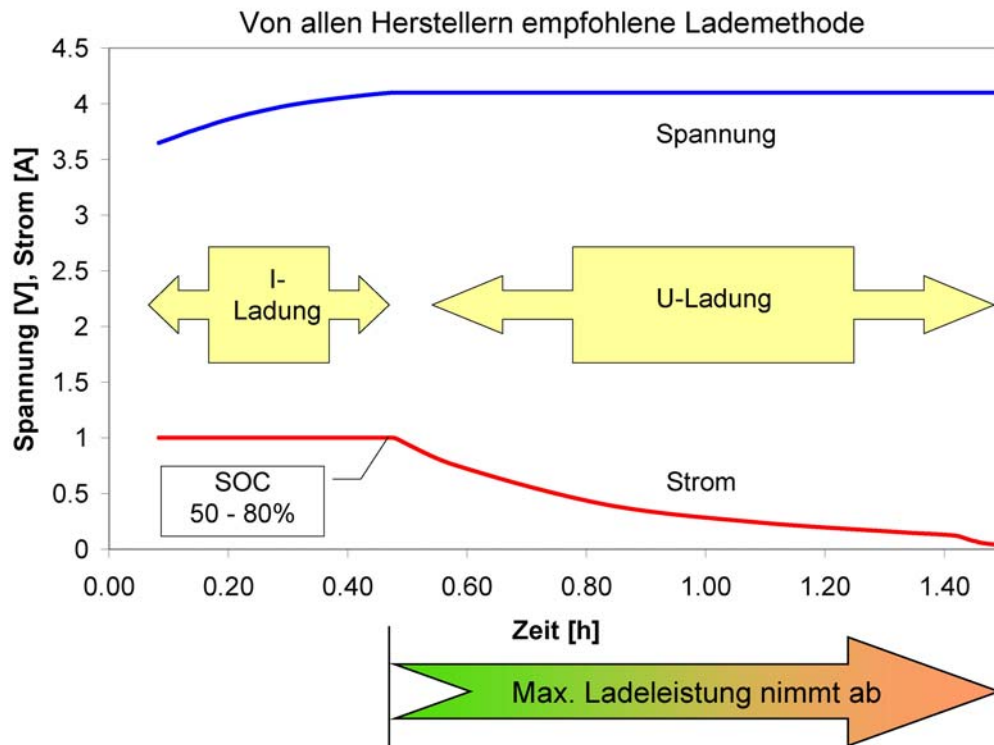


Abbildung 2-2: Standardladung für Lithium-Ionen-Zellen

3 Betrachtete Fahrzeuge

3.1 Allgemein

Es gibt zwei Fahrzeugtypen, die mit einem Elektromotor angetrieben werden. Hierbei handelt es sich zum einen um reine Elektrofahrzeuge, deren einziger Motor ein Elektromotor ist, und zum anderen um Hybridfahrzeuge, die sowohl mit einem Elektro- als auch einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind. Über diese beiden Fahrzeugtypen soll ein kurzer Überblick gegeben werden.

3.1.1 Elektrofahrzeug

Elektrofahrzeuge verwenden als Antriebsaggregat statt einem Verbrennungsmotor einen Elektromotor. Elektrofahrzeuge beziehen ihre Energie aus mitgeführten Batterien, meist Akkumulatoren. Diese werden über das Stromnetz geladen. Da die Energiedichte einer Batterie deutlich geringer als die von Benzin oder Diesel ist, sind bei gleicher Speichergröße nur wesentlich geringere Reichweiten realisierbar. Das ist ein wesentliches Hemmnis bei der Einführung von Elektrofahrzeugen.

Wird die begrenzte Reichweite dieser Fahrzeuge außer Acht gelassen, so ist die Technik prinzipiell zuverlässig und könnte bereits heute zur Marktreife gelangen.

Elektrofahrzeuge gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen. Sie können im Conversion-Design oder im Purpose-Design entwickelt werden. Die folgende Beschreibung dieser Designs beruht auf /WAL 95/.

Conversion Design

Die erste Variante ist ein Elektrofahrzeug im Conversion-Design. Ein bereits bestehendes Fahrzeug wird dabei auf Elektroantrieb umgerüstet. Dabei müssen lediglich der Antriebsstrang und die dazugehörigen Komponenten angepasst werden. Dies vereinfacht den mechanischen Aufbau. Die Karosserie eines konventionell mit Verbrennungsmotor betriebenen Pkw wird weitestgehend übernommen. So kann ein relativ hoher Gleichteile-Anteil erreicht werden. Ein Problem stellt allerdings die Unterbringung des Energiespeichers dar, da er wesentlich größer und schwerer als ein Benzintank ist. Um genügend Energie bereitstellen zu können, wird die Zuladung und der Laderaum deutlich eingeschränkt.

Das Fahrzeug könnte bereits heute gefertigt werden. Für eine Serienfertigung müssen jedoch Zulieferer für die Komponenten des Elektroantriebes und Speichersystems evaluiert werden. Außerdem wäre eine Umstellung der Produktionsstraßen erforderlich. Eine Serienfertigung ab 2010 scheint daher realistisch.

Purpose Design

Die zweite Variante des ESF stellt ein Fahrzeug im Purpose-Design dar. Hierbei wird das Fahrzeug neu konzipiert und der Aufbau kann dem Elektroantrieb ideal angepasst werden. Dabei sind auch neue Antriebskonzepte, z.B. mit Radnabenmotoren, denkbar. Für den Radnabenmotor wird in jeder Radnabe ein Elektromotor installiert, so dass sich

neue Gestaltungsmöglichkeiten der Fahrgastzelle ergeben. Im Vordergrund steht die Karosserie, die im Purpose-Design vorwiegend aus Verbundwerkstoffen gefertigt wird, soweit dies möglich ist. Die Karosserie hat ein deutlich geringeres Gewicht als die des Fahrzeuges im Conversion-Design.

Eine Markteinführung ist aufgrund der nötigen Neukonzeption kurzfristig nicht möglich. Neben der Entwicklung eines neuen Fahrzeuges müssen auch erweiterte Produktionskapazitäten geschaffen und die Zulieferer der Komponenten und Werkstoffe gesucht werden. Mit einer Serienfertigung kann daher vor 2015 nicht gerechnet werden.

3.1.2 Hybridfahrzeug

Die UNO definierte 2003 den Begriff „Hybridfahrzeug“ wie folgt: Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben. Als Hybrid-Elektro-Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles, HEV) werden somit die Fahrzeuge bezeichnet, die neben einer anderen Antriebsart zusätzlich über einen elektrischen Antriebsstrang verfügen.

Micro-Hybrid

Das Fahrzeug verfügt über eine Auto-Start-Stop-Funktion und Bremsenergieerückgewinnung zum Laden der Batterie. Beispielsweise ist der BMW 1er ab Modelljahr 2007 und Schaltgetriebe mit dieser Technik ausgestattet.

Mild-Hybrid

Beim Mild-Hybrid unterstützt der Elektroantriebteil den Verbrennungsmotor zur Leistungssteigerung oder zur Effizienzsteigerung. Als Beispiel kann hier der Honda Civic Hybrid genannt werden, der seit Modelljahr 2006 nahezu Voll-Hybrid-Merkmale aufweist.

Voll-Hybrid

Beim Voll-Hybrid ist das Anfahren und Fahren ohne gestarteten Verbrennungsmotor möglich, Elektro- und Verbrennungsmotor besitzen in diesem Fall vergleichbare Leistungen. Der bekannteste Vertreter dieser Antriebsform stellt der Toyota Prius dar, der auch ohne Verbrennungsmotor ca. 50 km/h erreichen und so innerorts für kurze Strecken rein elektrisch betrieben werden kann.

Plug-In-Hybrid

Die wesentliche Eigenschaft von Plug-In-Hybrid-Elektro-Fahrzeugen (Plug-In Hybrid Electric Vehicles, PHEV) liegt darin, dass ihr elektrischer Speicher nicht nur durch den im Fahrzeug integrierten Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) aufgeladen wird. Der Bezug der elektrischen Energie erfolgt in diesem Fall zum größten Teil aus dem Stromnetz.

Der bekannteste Vertreter dieser Bauart war der Audi Duo (1989). Dabei wurde ein das Serien-Fahrzeug um einen Elektromotor auf der Hinterachse erweitert, der aus Nickel-Cadmium-Batterien gespeist wurde.

Power-Hybrid

Der Power-Hybrid ist ein Voll-Hybrid, der einen Elektromotor mit einer Leistung von mehr als 50 kW hat. Dies ermöglicht auch rein elektrisch eine angemessene Fahrleistung. Auch wenn der Power-Hybrid an sich kein sparsames Fahren als Ziel hat, so kann durch ihn der Kraftstoffverbrauch um mindestens 20% gesenkt werden.

3.2 Referenzfahrzeuge

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die Definition von drei Referenzfahrzeugen, die typische Fahrzeugkategorien und Anwendungsfelder charakterisieren: zwei reine Elektro-Mobile (z.B. Elektro-Smart und Elektro-Kompaktklasse-Pkw) und einem Plug-In-Hybrid-Fahrzeug der Mittelklasse. Die Referenzfahrzeuge werden für ein pessimistisches sowie für ein optimistisches Szenario definiert. Die Fahrzeuge sollen nach folgenden Kriterien charakterisiert werden:

- Klasse
- Bauweise
- Leistung der Antriebseinheit
- Art und Energieinhalt des Speichersystems
- Höchstgeschwindigkeit
- Reichweite
- Verbrauch
- Zeitpunkt der voraussichtlichen Serienreife

3.2.1 Kleinwagen

Die Fahrzeugklasse der Kleinwagen wird repräsentiert durch den **Smart Fortwo ed** (electric drive). Der Smart Fortwo ed wird zurzeit in London im Flottenbetrieb getestet. Bei dem Pilotprojekt, das eine Laufzeit von 4 Jahren hat, werden 100 Fahrzeuge über einen Leasingpartner betrieben. Laut /HEA 4273/ gelten für diese Fahrzeuge folgend Spezifikationen:

- Reichweite: 115 km (Nutzung: ca. 90 % Kapazität)
- Höchstgeschwindigkeit: 112 km/h = 70 mph (elektronisch abgeregelt)
- Leistung: 30 kW
- Speicher: ZEBRA-Batterie, 15,5 kWh
- Geschätzte Lebensdauer: 10 Jahre, 1.000 Aufladungen, 70.000 bis 80.000 km
- Verbrauch: 12 kWh / 100 km

Die Amortisation erfolgt über günstigere Energiekosten (Strom statt Benzin/Diesel) sowie Einsparung der Congestion Charge (12 €/ Tag = ca. 10.000 € in 4 Jahren), die im Londoner Innenstadtbereich erhoben wird. Es werden die Szenarien getrennt voneinander betrachtet. Die Ergebnisse stellt **Tabelle 3-1** gegenüber.

Tabelle 3-1: Referenzfahrzeug Smart Fortwo ed

	Pessimistisches Szenario	Optimistisches Szenario
Bauweise	Conversion-Design Stahl-Karosserie / Kunststoffe	Purpose-Design vorwiegend Kunst- und Verbundstoffe
Fahrzeugklasse	Kleinwagen	Kleinwagen
Leistung	30 kW	30 kW
Höchstgeschwindigkeit	ca. 110 km/h	ca. 110 km/h
Verbrauch	12 kWh / 100 km	12 kWh / 100 km
Reichweite	ca. 115 km	ca. 200 km
Speichersystem	ZEBRA	Li-Ion
Voraussichtliche Serienreife	2010	2015

3.2.2 Kompaktklasse-PKW

FfE-eigene Untersuchungen /FfE 97/ zeigen, dass ein Elektrofahrzeug einen Verbrauch zwischen 15 und 20 kWh auf 100 km hat. Dieser Verbrauch wurde experimentell mit einem **VW Golf CityStromer** als Referenzfahrzeug ermittelt. Das Fahrzeug ist lediglich mit einem Energiespeicher und dem Elektromotor ausgestattet. Das Fahrzeug verfügt über keinerlei Extras, wie z.B. eine Klimaanlage. Obwohl diese Angaben von 1995 stammen, so können sie heute angewendet werden. Elektrostraßenfahrzeuge müssen den aktuellen Ausstattungsstandards genügen, wie z.B. über Klimaanlage, Heizung und Sicherheitselektronik. Auf diese Standards kann nicht verzichtet werden, da ein Elektrofahrzeug den gleichen Komfort wie ein verbrennungsmotorisch betriebener Pkw bieten soll.

Berücksichtigt man dies, so kann festgelegt werden, dass das Referenzfahrzeug durchschnittlich 20 kWh Energie auf 100 km verbraucht. Dieser Verbrauch wurde von der Konzernforschung der Volkswagen AG bestätigt /VW 07/. Aktuell existieren keine Serien-Elektrostraßenfahrzeuge in der Mittelklasse. Laut /VW 07/ sind folgende Spezifikationen denkbar:

- Reichweite: 50 bis 100 km (Conversion) bzw. 100 bis 200 km (Purpose)
- Höchstgeschwindigkeit: max. 150 km/h
- Leistung: 40 bis 80 kW
- Speicher: Nickel-Metallhydrid oder Lithium-Ionen, ca. 25 kWh
- Verbrauch: ca. 20 kWh / 100 km

Ein solches Fahrzeug wäre prinzipiell schon heute im Conversion-Design (siehe /WAL 95/) zu realisieren. Langfristig würden sicherlich auch Modelle in dieser Fahrzeugklasse im Purpose-Design (siehe /WAL 95/) auf den Markt kommen.

Die Antriebseinheit für dieses Fahrzeug hat eine Leistung von 40 bis 80 kW. Dies ist vergleichbar mit der Leistung eines durchschnittlichen VW Golf V. Ein Elektrofahrzeug benötigt eine wesentlich geringere Motornennleistung, da der Wirkungsgrad des Antriebssystems deutlich höher ist als bei einem Verbrennungsmotor. Außerdem ist es möglich, Elektromotoren auch kurzfristig in Überlast zu betreiben.

Das Speichersystem, welches die Energie für den Elektromotor bereitstellt, könnte aus Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren oder aus Lithium-Ion-Akkumulatoren bestehen. Der Verbrauch dieses Fahrzeuges beträgt durchschnittlich etwa 20 kWh / 100 km. Der

Pkw sollte eine Maximalgeschwindigkeit von 150 km/h nicht wesentlich unterschreiten. Die Reichweite würde im Conversion-Design etwa 50 bis 100 km betragen.

Es wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug im Conversion-Design sowie auch im Purpose-Design das gleiche Gewicht hat. Deshalb wird das Fahrzeug im Purpose-Design so ausgelegt, dass das eingesparte Gewicht durch die Verwendung von Verbundstoffen durch einen größeren Energiespeicher kompensiert wird. Die im Purpose-Design-Fahrzeug verwendete Antriebseinheit, die evtl. aus vier einzelnen Radnaben-Motoren besteht, entspricht in den Leistungen denen des Fahrzeuges im Conversion-Design.

Bei der angegebenen Speicherkapazität der Akkumulatoren und dem genannten durchschnittlichen Verbrauch, weist das Fahrzeug, je nach Fahrweise, eine Reichweite von 100 bis zu 200 km auf.

Tabelle 3-2: Referenzfahrzeug Kompaktklasse-PKW

	Pessimistisches Szenario	Optimistisches Szenario
Bauweise	Conversion-Design Stahl-/Aluminum-Karosserie	Purpose-Design vorwiegend Kunst- und Verbundstoffe
Fahrzeugklasse	Kompaktklasse	Kompaktklasse
Leistung	40 bis 80 kW	40 bis 80 kW
Höchstgeschwindigkeit	ca. 150 km/h	ca. 150 km/h
Verbrauch	20 kWh / 100 km	20 kWh / 100 km
Reichweite	ca. 50 km	100 bis 200 km
Speichersystem	NiMH/Li-Ion	Li-Ion
Voraussichtliche Serienreife	2010	2015

3.2.3 Plug-In-Hybrid-Fahrzeug

Beim Plug-In-Hybrid wird davon ausgegangen, dass der Großteil der Fahrten elektrisch zurückgelegt wird. Der Verbrennungsmotor würde in diesem Fall nur als so genannter Range-Extender fungieren. Betrachtet man den rein elektrisch gefahrenen Anteil der zurückgelegten Fahrleistungen, so muss neben dem „Elektrofahrzeug“ zusätzlich das Verbrennungsaggregat sowie die zusätzliche Peripherie mit transportiert werden. Dieses Zusatzgewicht wirkt sich auf einen erhöhten spezifischen Verbrauch aus, der in diesem Fall mit 24 kWh / 100 km angenommen wird. Dieser Verbrauch würde dann erreicht werden, wenn das Fahrzeug rein elektrisch ohne zusätzlichen Einsatz des Verbrennungsmotors betrieben würde. Eine Gesamtübersicht über die angenommenen technischen Daten eines solchen Plug-In-Hybrids zeigt **Tabelle 3-3**.

Tabelle 3-3: Referenzfahrzeug Plug-In-Hybrid-Fahrzeug

	Pessimistisches Szenario	Optimistisches Szenario
Bauweise	Conversion-Design Stahl-/Aluminum-Karosserie	Conversion-Design Stahl-/Aluminum-Karosserie
Fahrzeugklasse	Mittelklasse	Mittelklasse
Leistung	50 bis 100 kW	50 bis 100 kW
Höchstgeschwindigkeit	ca. 180 km/h	ca. 180 km/h
Verbrauch	24 kWh / 100 km	24 kWh / 100 km
Reichweite (rein elektrisch)	ca. 25 km	50 bis 100 km
Speichersystem	NiMH	Li-Ion
Voraussichtliche Serienreife	2010	2015

4 Methodik

4.1 Ermittlung des technischen Potenzials

Basierend auf der Anzahl der Personenkraftfahrzeuge nach /ViZ 06/ und den gesamten zurückgelegten Kilometern nach /ViZ 06/ soll zunächst das technische Potenzial der elektrisch substituierbaren Verkehrsleistungen und der daraus resultierende Energiebedarf bestimmt werden. Dazu werden die Fahrzeuge sechs Nutzungsklassen zugeordnet. Die Einteilung ist in **Abbildung 4-1** dargestellt.

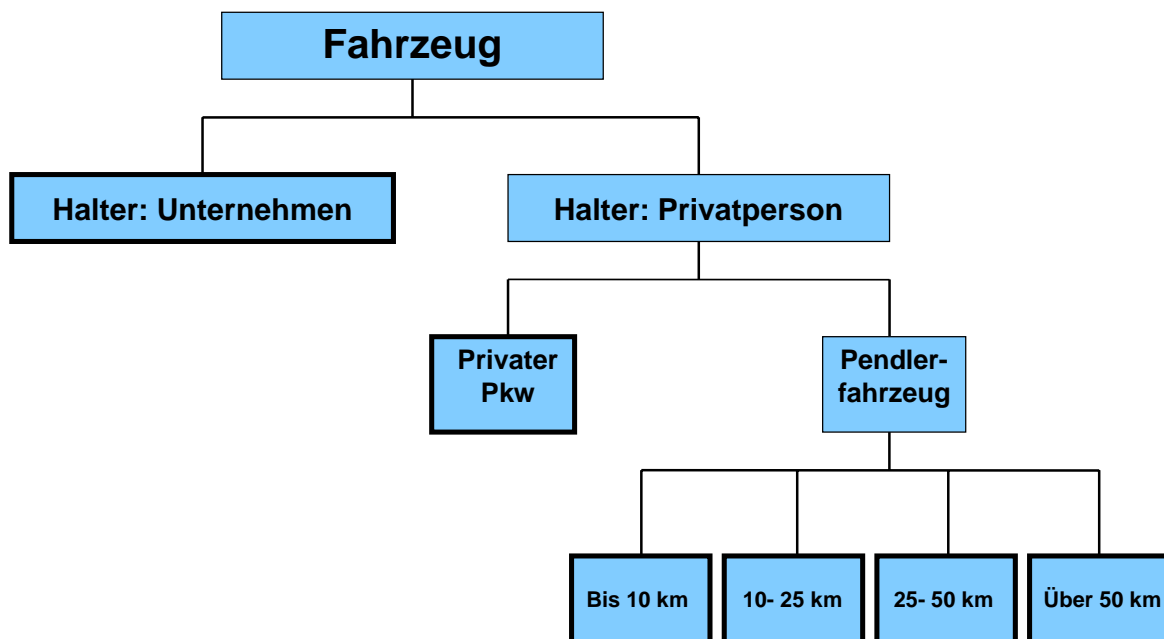


Abbildung 4-1: Einteilung in die Nutzungsklassen

Zuerst wird unterschieden, ob das Fahrzeug auf ein Unternehmen oder eine Privatperson zugelassen ist. Ist eine Privatperson der Halter, so muss bestimmt werden, ob das Fahrzeug zum Pendeln verwendet wird. Im Folgenden wird ein auf ein Unternehmen zugelassener Pkw als geschäftlich genutztes Fahrzeug bezeichnet. Auf Privatpersonen zugelassene Fahrzeuge, die nicht zum Pendeln verwendet werden, werden als private Pkw bezeichnet, die anderen hingegen als Pendlerfahrzeuge. Die Pendlerfahrzeuge sind wegen der Planbarkeit und regelmäßig wiederkehrender Fahrten besonders interessant und werden weiter nach der einfach zurückzulegenden Strecke zum Arbeitsplatz in vier Entfernungsklassen eingeteilt:

- bis 10 km
- 10 bis 25 km
- 25 bis 50 km
- über 50 km

Bei den Pendlerfahrzeugen muss des Weiteren berücksichtigt werden, dass neben den Fahrern zusätzlich Mitfahrer zur Arbeit befördert werden. Der mittlere Besetzungsgrad eines Fahrzeugs gibt an, wie viele Personen durchschnittlich mit diesem befördert werden. Da bei Pendlerfahrzeugen zusätzlich Mitfahrer befördert werden, ist er größer eins. Diese Kennzahl wird in 6.1 benötigt.

Nach der Einteilung der Pkw muss für jede Nutzungsklasse die Jahresfahrleistung bestimmt werden. Diese wird für die drei Gruppen Pendler, Geschäft und Privat gesondert ermittelt.

Jahresfahrleistung von Pendlern

Für die vier Entfernungsklassen bei Pendlern kann die Jahresfahrleistung für das Pendeln mittels der durchschnittlich zurückgelegten Strecke bis zum Arbeitsplatz ermittelt werden. Jeder Entfernungsklasse wird eine mittlere Entfernung zum Arbeitsplatz zugeordnet, welche in **Tabelle 4-1** dargestellt ist. Die Herleitung soll anhand der Entfernungsklasse bis 10 km erläutert werden. Für diese Entfernungsklasse liegt in /ViZ 06/ eine detaillierte Aufteilung in die Entfernungsklassen bis 0,4 km, 0,4 bis 0,6 km, 0,6 bis 1 km, 1 bis 5 km und 5 bis 10 km vor. Es sind Angaben über die Weglänge von Berufspendlern allgemein und von Pkw-Fahrern vorhanden. Gewichtet man die mittlere Strecke der Entfernungsklasse mit dem Nutzungsanteil, so erhält man sowohl für die Berufspendler als auch für die Pkw-Fahrer eine durchschnittliche Strecke von 4 km für die Entfernungsklasse bis 10 km. Auf dieser Herleitung basierend wird für die Pendler der zweiten Entfernungsklasse von 10 bis 25 km die durchschnittliche Strecke auf 14 km festgelegt. Dieser Wert liegt unterhalb der Klassenmitte von 17,5 km, da davon ausgegangen wird, dass ein Großteil innerorts pendelt und dadurch eine Strecke geringer 17,5 km zurücklegt. Die durchschnittliche Weglänge für Pendler mit einer Entfernung zwischen 25 und 50 km zum Arbeitsplatz wird auf 35 km festgelegt. Pendlern, die eine Strecke länger 50 km zum Arbeitsplatz zurücklegen, wird eine durchschnittliche Weglänge von 60 km zugeordnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Länge der Pendlerstrecken die untere Klassengrenze von 50 km nicht stark überschreitet. Denn ist die Entfernung zum Arbeitsplatz deutlich größer, so wird davon ausgegangen, dass ein Pendler einen Umzug in Erwägung zieht.

Tabelle 4-1: *Durchschnittliche Weglängen der Entfernungsklassen bei Pendlern*

Entfernungsklasse	Durchschnittliche Weglänge
Pendler, bis 10 km	4 km
Pendler, 10 bis 25 km	14 km
Pendler, 25 bis 50 km	35 km
Pendler, mehr als 50 km	60 km

Bei der Angabe der durchschnittlichen Weglänge handelt es sich um die einfache Entfernung; Pendler legen diese Strecke also zweimal an 220 Arbeitstagen im Jahr zurück.

Des Weiteren muss bei den Pendlerfahrzeugen berücksichtigt werden, dass sie nicht ausschließlich dem Zweck des Pendelns dienen, sondern auch privat genutzt werden. Die Jahresfahrleistung dieser Fahrzeuge setzt sich also aus der Jahresfahrleistung zum Pendeln und der für privat zurückgelegte Strecken zusammen. Die private

Jahresfahrleistung von Pendlerfahrzeugen wird als Fremdnutzung der Pkw bezeichnet und in 5.2 bestimmt.

Jahresfahrleistung von geschäftlich genutzten Fahrzeugen

Bei geschäftlich genutzten Fahrzeugen wird die Annahme getroffen, dass sie nur der klassenbezogenen Nutzung dienen, eine Fremdnutzung also nicht berücksichtigt werden muss.

Über die Jahresfahrleistung der geschäftlich genutzten Fahrzeuge liegen keine Statistiken vor. Deshalb wird ihre Jahresfahrleistung über die gefahrenen Personen-km für den Zweck Geschäft nach /ViZ 06/ bestimmt. Unter der Annahme, dass der mittlere Besetzungsgrad der geschäftlich genutzten Fahrzeuge dem der Pendlerfahrzeuge entspricht, können die Personen-km in Fahrzeug-km überführt werden.

Jahresfahrleistung von privat genutzten Pkw

Die restlichen Kilometer entfallen demnach auf die privat genutzten Pkw.

Für jede Nutzungsklasse liegen die Anzahl der Pkw und die Jahresfahrleistung vor. Die weitere Vorgehensweise ist in **Abbildung 4-2** dargestellt.

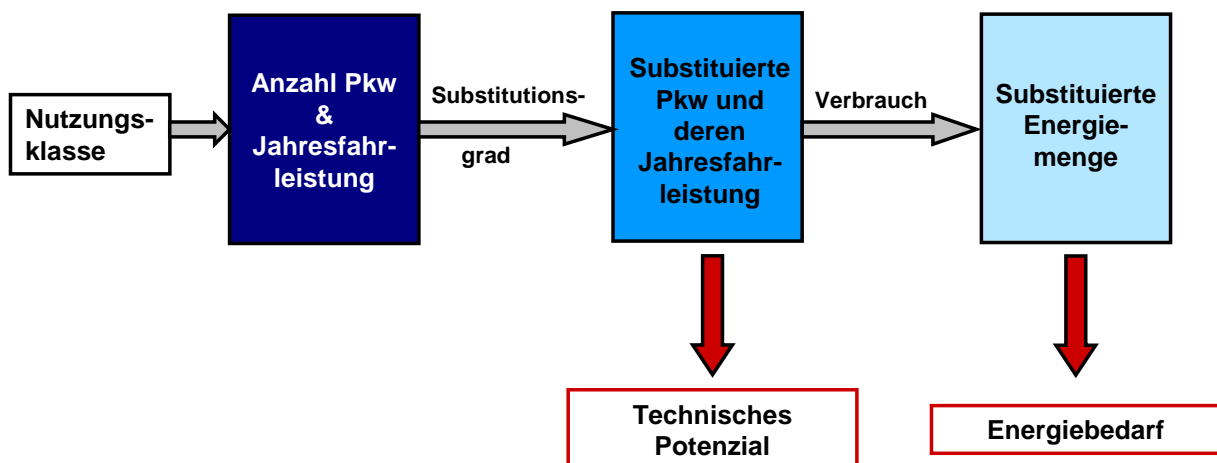


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Ermittlung des technischen Potenzials und des Energiebedarfs

Für jede Nutzungsklasse wird bestimmt, wie viele Pkw durch Elektrostraßenfahrzeuge ersetzt werden können. Dafür werden in 5.3 sechs Substitutionsgrade festgelegt. Hierbei werden zwei Szenarien untersucht: das pessimistische und das optimistische Szenario.

4.2 Ermittlung des Ladelastgangs

Nach der Ermittlung des technischen Potenzials und des daraus resultierenden Energiebedarfs soll bestimmt werden, wann die Nachfrage nach Energie auftritt. Dazu soll der entstehende Lastgang der Energienachfrage synthetisiert werden. Dieser wird in einem Wochengang dargestellt. Als Ausgangspunkt der Berechnungen dient der

Wochengang nach /DÜS 03/ der die stündliche Pkw-Belastung für jeden Tag der Woche wiedergibt und in **Abbildung 4-3** dargestellt ist.

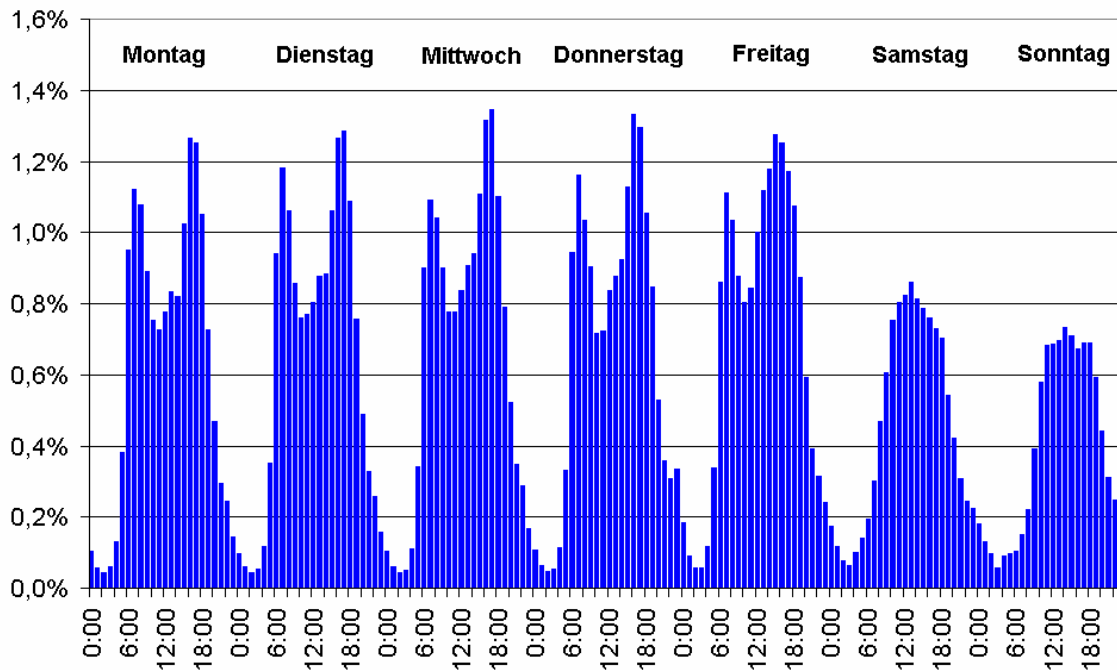


Abbildung 4-3: *Wochengang des Pkw-Verkehrs in Prozent des Wochenverkehrs nach /LSV 05/*

Einen Überblick über die Vorgehensweise gibt **Abbildung 4-4**. Ausgehend vom Wochengang wird der Verkehr zunächst auf die sechs Nutzungsklassen aufgeteilt. Die Prozentangaben werden dann in Kilometer überführt. Die 1-Stunden-Intervalle werden jeweils auf 5-Minuten-Intervalle aufgeteilt. Dafür wird der Verkehr einer Stunde auf die zwölf Intervalle gleichverteilt. Aus den in einem Intervall gefahrenen Kilometern wird die Energienachfrage bestimmt. Es wird festgelegt, dass Fahrzeuge direkt nach Beendigung der Fahrt aufgeladen werden. Die Energienachfrage ist zeitlich bekannt, so dass ein Lastgang ermittelt werden kann.

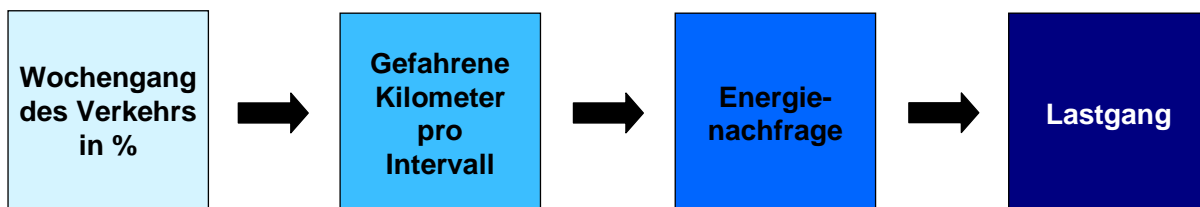


Abbildung 4-4: *Vorgehensweise zur Ermittlung des Lastgangs*

Im Folgenden soll genauer auf die Vorgehensweise zur Ermittlung des Ladelastgangs eingegangen werden.

Zunächst wird der Wochengang auf die sechs Nutzungsklassen aufgeteilt. Dazu wird dieser in Kernwoche, Freitag, Samstag und Sonntag unterteilt. Der Verkehr in der

Kernwoche ist vom Verlauf her identisch. Lediglich die Anzahl der Pkw pro Stunde variiert leicht. Deshalb wird über Mittelwertbildung ein Referenztag für die Kernwoche bestimmt. Der Freitag wird bei der Mittelwertbildung nicht mitberücksichtigt, da es an diesem Tag eine Abweichung vom regelmäßigen Werktagsverkehr gibt, bedingt durch den erhöhten Freizeitverkehr ab Mittag.

Auch hier soll wieder eine Einteilung in die sechs Nutzungsklassen erfolgen. Zunächst wird der Verkehr folgenden drei Gruppen zugeordnet:

- Geschäftlich
- Pendler
- Privat

Für die Aufteilung wird festgelegt, dass am Wochenende weder Geschäfts- noch Pendlerverkehr auftritt. Somit entspricht dieser Verkehr dem Privatverkehr. In der Woche hingegen wird das Verkehrsaufkommen von allen drei Gruppen verursacht. Zunächst soll der Anteil des Privatverkehrs bestimmt werden. Da dieser an jedem Tag der Woche vorhanden ist, wird eine Grundlast definiert. Sie wird aus einem Minimallastgang ermittelt, der folgendermaßen bestimmt wird: Das Verkehrsaufkommen einer Stunde wird an den sieben Tagen verglichen und jeweils das Minimum bestimmt, so dass sich der Minimallastgang aus den verkehrsärmsten Stunden des Wochengangs zusammensetzt. Wie Abbildung 4-3 zu entnehmen ist, ist der Verkehr am Wochenende deutlich geringer als in der Arbeitswoche, so dass sich die Minimallast größtenteils aus dem Wochenendverkehr bildet. Aus diesem Grund muss beachtet werden, dass der Wochenendverkehr zum Teil von Berufspendlern verursacht wird. Der Anteil des Privatverkehrs ist in der Arbeitswoche geringer als am Wochenende. Deshalb werden lediglich 75 % des Minimallastgangs zur Bildung der Grundlast herangezogen. Diese Grundlast wird in einem nächsten Schritt vom Wochengang abgezogen. Der Wochengang setzt sich also aus Grundlast und Differenzverkehr zusammen.

Der Differenzverkehr des Wochenendes entspricht dem Privatverkehr. In der Arbeitswoche hingegen setzt er sich aus dem Geschäfts- und Pendlerverkehr zusammen. Eine Ausnahme stellt der Freitag dar, da hier ab ca. 12:00 Uhr mit einem erhöhten Privatverkehr zu rechnen ist.

Zur Verteilung des Geschäftsverkehrs auf die Arbeitswoche wird folgende Annahme getroffen: Geschäftsverkehr tritt in der Kernwoche von 05:00 bis 20:00 Uhr und freitags von 05:00 bis 19:00 Uhr auf. Aus /ViZ 06/ kann zudem bestimmt werden, welcher Anteil des Verkehrs auf den Zweck Geschäft und welcher aufs Pendeln entfällt. Es kann bestimmt werden, welcher Anteil des Differenzverkehrs der Arbeitswoche insgesamt für den Zweck Geschäft zurückgelegt werden. Dieser wird dann auf die 74 Stunden, in denen es Geschäftsverkehr gibt, gleichverteilt. Der restliche Differenzverkehr entspricht dem Pendlerverkehr.

Um den erhöhten Privatverkehr am Freitag zu berücksichtigen, wird der Geschäftsverkehr, der am Freitag nicht von 19:00 bis 20:00 Uhr auftritt, dem Privatverkehr zugeordnet. Der Verkehr dieser Stunde repräsentiert den erhöhten Privatverkehr des Tages. Die Vorgehensweise zur Aufteilung ist in **Abbildung 4-5** zusammengefasst.

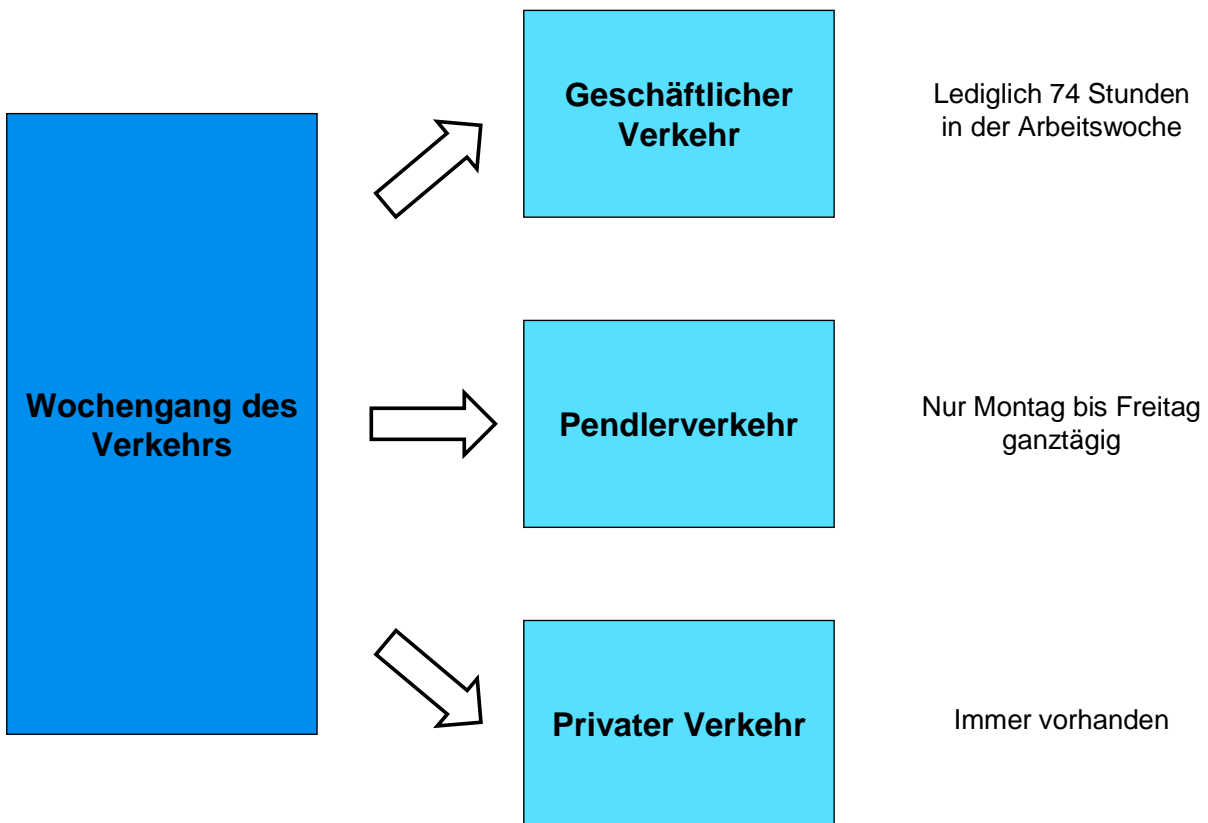


Abbildung 4-5: Aufteilung des Wochengangs auf die drei Gruppen

Der Pendlerverkehr wird auf die vier Entfernungsklassen aufgeteilt. Der Verteilung des Verkehrs liegen dabei die gleichen Anteile zu Grunde wie der Verteilung der Pkw bei der Ermittlung des technischen Potenzials. Es wird nur der Verkehr der Arbeitswoche berücksichtigt, da der Wochenendverkehr aus Privatverkehr besteht.

Bei diesen Angaben handelt es sich um Anteile am Wochenverkehr. Es werden allerdings Angaben über die zurückgelegten Kilometer benötigt, um einen Ladelastgang zu synthetisieren. Dazu werden die Jahresfahrleistungen der elektrisch substituierten Pkw, die für das technische Potenzial ermittelt werden, herangezogen. Es werden beide Szenarien berücksichtigt. Zunächst wird für jede Nutzungsklasse aus der Jahresfahrleistung bestimmt, welche Fahrleistung in einer Woche insgesamt zurückgelegt wird. Diese Fahrleistung wird dann über die Anteile am Wochenverkehr auf die sieben Tage verteilt, so dass bekannt ist, wie viele Kilometer in einem 5-Minuten-Intervall zurückgelegt werden.

Nun soll die Energienachfrage, die durch die in einem Intervall zurückgelegten Kilometer verursacht wird, bestimmt werden. Dazu wird die Anzahl der Kilometer mit dem durchschnittlichen Verbrauch eines Elektrostraßenfahrzeuges, welcher in 5.4 ermittelt wird, multipliziert.

Als letztes wird aus der Energienachfrage der Ladelastgang der Elektrostraßenfahrzeuge synthetisiert. Dazu wird zunächst auf die Herkunft der Daten eingegangen: Bei den Daten handelt es sich um Angaben einer Verkehrszählung. Es ist

davon auszugehen, dass Pkw während einer Fahrt nicht doppelt gezählt werden. Für die Berechnung wird festgelegt, dass Pkw, die den Verkehr in einem Intervall verursachen, die Fahrt in diesem Intervall beginnen. Über die durchschnittliche Wegdauer und -länge kann für jede Nutzungsklasse bestimmt werden, wie weit der zurückgelegte Weg ist und welche Zeit für dessen Bewältigung benötigt wird. Durch die getroffene Annahme ist bekannt, wann eine Fahrt beginnt, über die durchschnittliche Wegdauer kann bestimmt werden, wann sie endet. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass ein Pkw unmittelbar nach der Fahrt wieder aufgeladen wird. Zwischen Beendigung der Fahrt und Start des Ladevorgangs wird ein Zeitraum von fünf Minuten festgelegt, in dem das Fahrzeug an die Ladevorrichtung angeschlossen wird. Dies ist in **Abbildung 4-6** grafisch dargestellt.

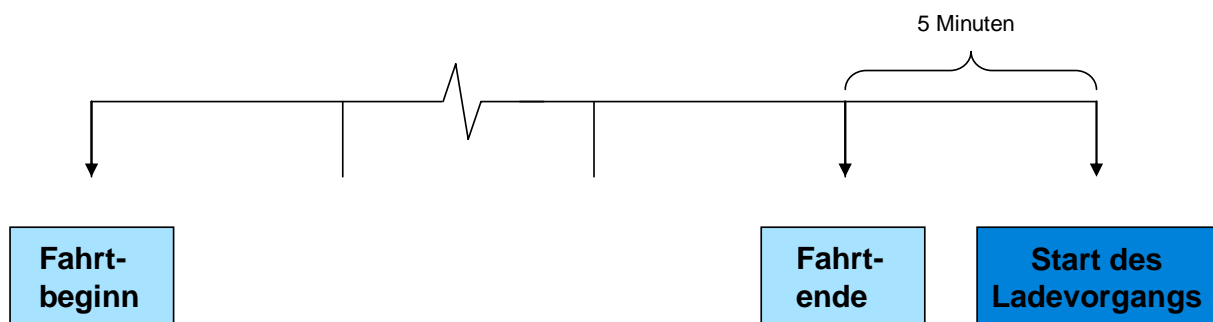


Abbildung 4-6: Zeitlicher Ablauf von Fahrtantritt bis zu Beginn des Ladevorgangs

Für jede Nutzungsklasse muss die Wegdauer bestimmt werden. Da keine Statistiken darüber vorliegen, wird sie aus der durchschnittlichen Strecke abgeleitet.

Die durchschnittliche Weglänge der vier Entfernungsklassen des Pendlerverkehrs entsprechen den durchschnittlichen Entfernungen zum Arbeitsplatz und können **Tabelle 4-1** entnommen werden. Die durchschnittlichen Weglängen für den Geschäfts- und Privatverkehr werden aus /ViZ 06/ ermittelt: Es liegen die Personen-km sowie die Anzahl der beförderten Personen für den Zweck Geschäft vor. Über den mittleren Besetzungsgrad für geschäftlich genutzte Pkw, der in der Ermittlung des technischen Potenzials bestimmt wird, kann die durchschnittliche Weglänge eruiert werden. Für den Privatverkehr kann diese analog bestimmt werden. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Determinanten Einkauf, Freizeit, Begleitung und Urlaub der Nutzungsklasse privat entsprechen. Die Weglängen sind in **Tabelle 4-2** für die sechs Nutzungsklassen zusammengestellt.

Bei der Festlegung der durchschnittlichen Wegdauern wird berücksichtigt, ob die Strecke eher in der Stadt oder eher Überland zurückgelegt wird. Wird eine Strecke überwiegend in der Stadt zurückgelegt, so ist die durchschnittliche Geschwindigkeit deutlich niedriger als die eines Fahrzeuges, welches überwiegend Überland fährt. Da der Lastgang in 5-Minuten-Intervallen bestimmt wird, werden auch die durchschnittlichen Wegdauern im 5-Minuten-Takt angegeben.

Private Fahrten werden hauptsächlich in Ortschaften getätigt. Die durchschnittliche Wegdauer für die Weglänge von 13 km wird deshalb auf 25 Minuten geschätzt. Auch Pendler mit einer Strecke bis 10 km legen diese überwiegend in Ortschaften zurück. Ihre Wegdauer wird auf 10 Minuten geschätzt. Bei Pendlern von 10 bis 25 km werden mehr

Überlandfahrten als bei der zuvor betrachteten Pendlerklasse getätigt. Deshalb ist die Durchschnittsgeschwindigkeit hier höher und die Wegdauer für das Zurücklegen von 14 km beträgt 20 Minuten. Bei den Pendlern von 25 bis 50 km steigt der Anteil der Überlandfahrten weiter an. Deshalb wird festgelegt, dass diese Pkw für die Strecke von 35 km 45 Minuten benötigen. Da die Pendler der letzten Entfernungsklasse hauptsächlich Überland fahren, wird die durchschnittliche Fahrtdauer auf 60 Minuten geschätzt. Geschäftlich genutzte Fahrzeuge fahren sowohl innerorts als auch Überland. Deshalb wird festgelegt, dass sie 25 Minuten für die durchschnittliche Strecke von 21 km benötigen. Die durchschnittlichen Wegdauern sind ebenfalls in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: *Durchschnittliche Weglänge und -dauer der Nutzungsklassen*

Nutzungsklasse	Durchschnittliche Weglänge	Durchschnittliche Wegdauer
Geschäftlich	21 km	25 min
Privat	13 km	25 min
Pendler, bis 10 km	4 km	10 min
Pendler, 10 bis 25 km	14 km	20 min
Pendler, 25 bis 50 km	35 km	45 min
Pendler, mehr als 50 km	60 km	60 min

Bevor ein Lastgang erstellt werden kann, muss die Energienachfrage, die durch die Elektrostraßenfahrzeuge verursacht wird, bestimmt werden.

Dafür wird zunächst bestimmt, wie viel Energie in einem Intervall durch Elektrostraßenfahrzeuge verbraucht wird. Denn der Verbrauch entspricht der Energienachfrage, die nach Beendigung der Fahrt auftritt. Der Verbrauch wird über die in einem Intervall zurückgelegten Kilometer und dem durchschnittlichen Verbrauch eines Elektrofahrzeuges aus 5.4 bestimmt.

Des Weiteren muss für jede Nutzungsklasse bestimmt werden, welchen durchschnittlichen Verbrauch ein Pkw für eine durchschnittliche Fahrt aufweist. Dies ist mit dem durchschnittlichen Verbrauch eines Elektrofahrzeuges und der durchschnittlichen Weglänge möglich.

Mit der Ladeleistung (vgl. 5.5) kann bestimmt werden, wie lange der Ladevorgang andauert. Zur Vereinfachung wird festgelegt, dass der Ladevorgang immer ein ganzes Vielfaches von 5-Minuten-Intervallen dauert. Dadurch ist die durchschnittliche Ladeleistung geringfügig kleiner als die Ladeleistung der Ladevorrichtung.

Außerdem muss berücksichtigt werden, dass in einem Intervall Pkw geladen werden, die zu verschiedenen Zeitpunkten losgefahren sind. Muss ein Pkw zum Beispiel 20 Minuten geladen werden, so entspricht dies vier Intervallen. In einem Intervall werden dann Pkw, die in vier verschiedenen Intervallen losgefahren sind und damit in vier verschiedenen Intervallen den Ladeprozess begonnen haben, geladen. Dies ist in **Abbildung 4-7** dargestellt.

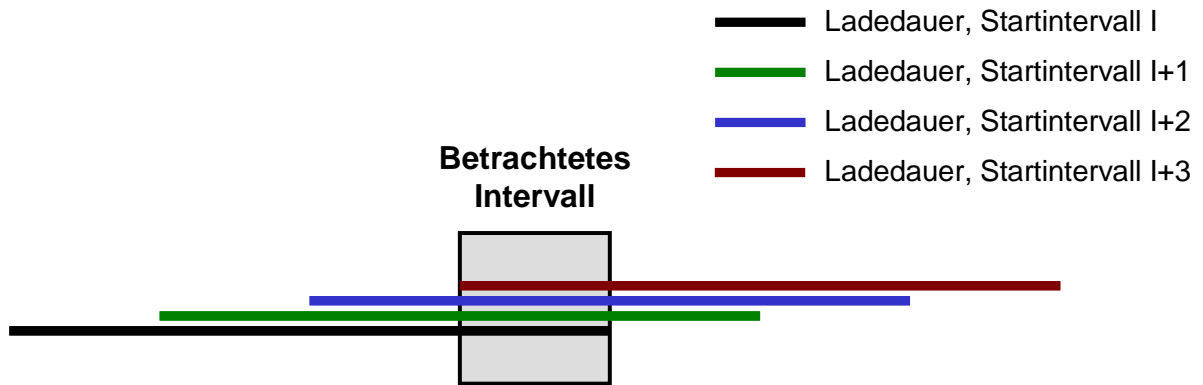


Abbildung 4-7: *Bestimmung der Ladeleistung in einem Intervall*

Für jedes Intervall lässt sich bestimmen, wie hoch die Leistung zum Laden der Fahrzeuge der verschiedenen Nutzungsklassen ist. Aus den Intervallen setzt sich der Lastgang für jede Nutzungsklasse zusammen, deren Summe dem Gesamtlastgang der Ladeleistung entspricht.

5 Annahmen

5.1 Rahmenbedingungen

5.1.1 Pessimistisches Szenario

Beim pessimistischen Szenario wird davon ausgegangen, dass es in naher Zukunft vermehrt zu Fahrverboten in Innenstadtbereichen kommt, um die Emissionen, Immissionen, sowie Verkehrsbelastung gering zu halten. Es liegen z. Zt. keine belastbaren Angaben aus Statistiken zu den Verkehrszahlen in Städten vor. Allerdings sind in den drei größten Städten Deutschlands Berlin, Hamburg und München zusammen ca. 2,5 Mio. PKW zugelassen. So kann davon ausgegangen werden, dass die Summe aller in den Innenbereichen zugelassenen inkl. aller in die Innenbereiche einpendelnden PKW sowie notwendigen Flottenfahrzeuge (Lieferservice, Dienstleistungen, etc.) für diese Bereiche etwa bei 1,5 Mio. Fahrzeuge liegt. Es wird davon ausgegangen, dass ca. die Hälfte dieser von Fahrverboten betroffenen Fahrzeuge elektrisch substituiert wird.

Die Größenordnung der Zahl entspricht in etwa dem in /GRÜ 07/ genannten Konzept Energie 2.0 angegebenen Ziel. Dieses Konzept sieht vor, dass bis zum Jahr 2020 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen eingesetzt werden. Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass dieses Ziel auch mit regem politischem Interesse verfolgt wird und somit, notfalls auch mit Subventionsmitteln, erreicht wird.

In diesem Szenario wird von folgender Verteilung der elektrisch gefahrenen Fahrleistungen ausgegangen:

- **10 % Kleinwagen** → vorwiegend Lieferfahrzeuge, da davon ausgegangen wird, dass sich ESF mit ZEBRA-Batterie in Privathaushalten nicht durchsetzen werden
- **70 % Kompaktklasse** → der Großteil der ESF werden Fahrzeuge der Kompaktklasse sein, da die Realisierung eines ESF im Conversion-Design zunächst in einer Fahrzeugklasse erwartet wird, die den Massenmarkt bedient.
- **20 % Plug-In-Hybrid** → Fahrzeughalter, die auf die Sicherheit, notfalls höhere Reichweiten zurücklegen zu können, nicht verzichten können oder wollen, verwenden Plug-In-Hybridfahrzeuge

5.1.2 Optimistisches Szenario

Das optimistische Szenario sieht vor, dass neben Gesetzen, die zur Erreichung der politisch gesetzten Mindestziele führen sollen, auch darüber hinausgehende Förderinitiativen existieren. So gibt es beispielsweise schon heute Staaten, Länder und Kommunen, die durch verschiedene Gesetze und Anordnungen die Attraktivität von Hybrid- und Elektrofahrzeugen erhöhen, um die Emissionen in den betroffenen Gebieten zu senken:

- In den USA gibt es seit Januar 2006 Steuererleichterungen für Hybrid-Fahrzeuge. Durch den Kauf eines Hybrid-Fahrzeugs können die zu zahlenden Einkommensteuern reduziert werden.

- In einigen Staaten wie z.B. Kalifornien, Virginia und Florida dürfen Hybrid- und Elektrofahrzeuge und Fahrzeuge mit alternativen Antrieben auch auf Spezialspuren fahren, die sonst Fahrzeugen mit mehr als zwei Personen vorbehalten sind (HOL – High-occupancy vehicle lane).
- Zusätzlich dürfen Hybridfahrzeuge kostenlos auf manchen mautpflichtigen Straßen fahren.
- In Los Angeles dürfen Hybrid- und Elektrofahrzeuge seit 2004 an allen kostenpflichtigen Parkplätzen und Parkhäusern kostenlos parken, in San Jose gilt diese Regelung für am Ort gekaufte Hybrid-Fahrzeuge.
- In Deutschland gelten reduzierte Sätze für die Kfz-Steuer und günstige Versicherungstarife für Hybrid- und Elektrofahrzeuge.
- In London sind Elektrofahrzeuge im Innenstadtbereich von der Congestion-Charge befreit.

Neben staatlichen Förderinitiativen sind Marktanzreizprogramme seitens der Industrie denkbar. So stehen aktuell Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge verstärkt zur Diskussion. Diese können theoretisch durch ihre Möglichkeit, am Stromnetz geladen zu werden, als virtuelles Kraftwerk betrieben werden und somit Energieversorgern zur Bereitstellung von Regelleistung im Netz dienen.

Ein weiterer Einflussfaktor, der sich positiv auf die Verwendung von Elektrostraßenfahrzeugen auswirken können, sind technische Fortschritte im Bereich der Speichertechnologie, so dass höhere Reichweiten bei gleich bleibendem Fahrzeuggewicht bzw. ein geringeres Fahrzeuggewicht bei gleich bleibender Reichweite erreicht werden können. Geringere spezifische Preise der Komponenten für Elektrostraßenfahrzeuge, speziell Speicher und Leistungselektronik, tragen ebenfalls positiv zur Marktdurchdringung von ESF bei. Zudem unterstützen steigende Ölpreise in ökonomischer Hinsicht die Förderung von ESF. Selbiges gilt auch bei evtl. zukünftig eingeführten CO₂-Emissions-Besteuerungen von Kraftfahrzeugen.

Mit wachsendem Umweltbewusstsein könnte wie die sichtbare PV Anlage auch das Elektrostraßenfahrzeug vor der Garage zu einem grünen Image beitragen. Ein ESF, betankt mit Naturstrom oder Aqua Power, hätte sicherlich Einfluss auf den Zweitwagensektor.

In diesem Szenario wird von folgender Verteilung der elektrisch gefahrenen Fahrleistungen ausgegangen:

- **30 % Kleinwagen** → es wird davon ausgegangen, dass in diesen Fahrzeugen zukünftig Speichersysteme eingesetzt werden, die die Verwendung dieser ESF in Privathaushalten vereinfachen und somit dieses Fahrzeug zum vollwertigen Pendlerfahrzeug machen.
- **60 % Kompaktklasse** → der Großteil der ESF werden weiterhin Fahrzeuge der Kompaktklasse sein, da die Realisierung eines ESF im Purpose-Design auch zunächst in der Kompaktklasse erwartet wird.
- **10 % Plug-In-Hybrid** → aufgrund der Tatsache dass zukünftig höhere Reichweiten elektrisch zurückgelegt werden können, sinkt die Notwendigkeit, statt einem reinen ESF ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug zu verwenden.

5.2 Privat zurückgelegte Strecken

Neben dem Pendeln werden Fahrzeuge der Pendlernutzungsklassen auch privat genutzt, so dass sich eine Fremdnutzung ergibt. Bei der Bestimmung dieser Fremdnutzung wird davon ausgegangen, dass die klassenfremde Nutzung mit steigender Entfernung zum Arbeitsplatz abnimmt. Es wird festgelegt, dass die Jahresfahrleistung der Pendlerfahrzeuge mit einer Entfernung zum Arbeitsplatz zwischen 10 und 25 km insgesamt der durchschnittlichen Jahresfahrleistung aller auf Privatpersonen zugelassenen Pkw entspricht. Deshalb muss zunächst die durchschnittliche Jahresfahrleistung der auf Privatpersonen zugelassenen Pkw bestimmt werden. Außerdem muss für die Ermittlung der Fremdnutzung bekannt sein, welche klassenbezogene Nutzung bei den Fahrzeugen der einzelnen Entfernungsklassen vorliegt. Diese beiden Größen werden zunächst bestimmt und als Grundlage für die Potenzialabschätzung herangezogen. Weitere „weiche“ Kriterien wie Imagegewinn durch den Besitz eines ESF werden sicher ebenfalls eine Rolle spielen, können aber zum heutigen Zeitpunkt nicht quantifiziert werden.

Durchschnittliche Jahresfahrleistung privat zugelassener Fahrzeuge

Alle Angaben und für die Berechnung herangezogenen Werte beziehen sich auf das Jahr 2004.

Nach /ViZ 06/ waren 2004 41,2 Millionen Fahrzeuge auf Privatpersonen zugelassen, die restlichen 4,9 Millionen Pkw hingegen auf Unternehmen. Die Jahresfahrleistung aller Pkw betrug in diesem Jahr laut /ViZ 06/ 590 Mrd. km. Um die Jahresfahrleistung der auf Privatpersonen zugelassenen Pkw zu ermitteln, wird zunächst die Jahresfahrleistung der auf Unternehmen zugelassenen Pkw bestimmt. Diese lässt sich aus /ViZ 06/ bestimmen: Für den Zweck Geschäft wurden 2004 insgesamt 114,5 Mrd. Personen-km zurückgelegt. Es wird die Annahme getroffen, dass der mittlere Besetzungsgrad der geschäftlich genutzten Pkw dem der Pendler entspricht. Der Besetzungsgrad dieser Fahrzeuge lässt sich aus /LuAiD/ bestimmen. 2004 gab es 18,5 Mio. Pendler, die selber mit dem Pkw zur Arbeit fahren. Sie nahmen insgesamt 0,9 Mio. Mitfahrer mit. Somit ergibt sich ein mittlerer Besetzungsgrad der Pendlerfahrzeuge von 1,048 Personen pro Pkw. Die Personenkilometer lassen sich in Fahrzeugkilometer umrechnen. Geschäftlich genutzte Fahrzeuge legten demnach im Jahr 2004 insgesamt 102 Mrd. km zurück. Die verbleibenden 481 Mrd. km entfielen auf die von Privatpersonen zugelassene Pkw. Ein Pkw mit privatem Halter hat im Schnitt eine Jahresfahrleistung von 11.669 km.

Jahresfahrleistung für das Pendeln der vier Entfernungsklassen

Um die Jahresfahrleistung zum Pendeln zu ermitteln, wird die durchschnittliche Weglänge zu Grunde gelegt. Sie ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Da es sich um eine Angabe der Entfernung handelt, muss berücksichtigt werden, dass Pendler diese Strecke zweimal am Tag an 220 Arbeitstagen im Jahr zurücklegen. Somit legen Pendler der ersten Entfernungsklasse jährlich 1.941 km für diesen Zweck zurück. Bei Pendlern mit einer Entfernung zwischen 10 und 25 km zum Arbeitsplatz sind es 6.794 km im Jahr, bei denen mit einer Weglänge von 25 bis 50 km schon 16.985 km. Die Fahrzeuge der letzten Entfernungsklasse mit einer Weglänge größer 50 km legen jährlich im Schnitt 29.117 km für den Zweck des Pendelns zurück.

Pendler mit einer Jahresfahrleistung fürs Pendeln von 6.794 km haben, um eine Jahresfahrleistung von 11.669 km zu erreichen, somit eine Fremdnutzung von jährlich 4.875 km. Für die erste Entfernungsklasse bis 10 km wird die gleiche Fremdnutzung festgelegt. Pendler mit einer Entfernung von 20 bis 50 km haben 2/3 der Fremdnutzung von den bereits betrachteten Pendlerentfernungsklassen, ihre Fremdnutzung beträgt 3.250 km. Die Fremdnutzung der Pendler mit einer Strecke von mehr als 50 km beläuft sich auf 1/3 der Fremdnutzung von den ersten beiden Entfernungsklassen, also 1.625 km. Die Ergebnisse der Ermittlung der durchschnittlichen Fremdnutzung von Pendlerfahrzeugen ist in **Tabelle 5-1** zusammengefasst.

Tabelle 5-1: *Klassenbezogene und Fremdnutzung von Pendlerfahrzeugen*

Entfernungsklasse	Klassenbezogene Nutzung	Fremdnutzung	Jahresfahrleistung
Bis 10 km	1.941 km	4.875 km	6.816 km
10 bis 25 km	6.794 km	4.875 km	11.669 km
25 bis 50 km	16.985 km	3.250 km	20.235 km
Über 50 km	29.117 km	1.625 km	30.742 km

5.3 Substitutionsgrad

Für die Festlegung der Substitutionsgrade wird zunächst auf das Fahrprofil der verschiedenen Nutzungsklassen eingegangen. Das Nutzungsprofil eines Fahrzeuges ist ausschlaggebend für die Substituierbarkeit. Erst in einem nächsten Schritt sollen die beiden Szenarien berücksichtigt werden.

Wie in **Abbildung 5-1** dargestellt, sind 90 % der Strecken, die mit dem Pkw oder dem **motorisierten Individualverkehr (MIV)** zurückgelegt werden, kürzer als 25 km und somit generell elektrisch zu bewältigen. 99 % der Fahrten sind maximal 100 km lang und können somit von einem Elektrofahrzeug im Purpose Design bewältigt werden. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass Fahrzeuge sowohl elektrisch durchführbare als auch nur verbrennungsmotorische zurücklegbare Strecken bewältigen müssen. Aus diesem Grund können nicht 90 % der Fahrzeuge im elektrisch substituiert werden.

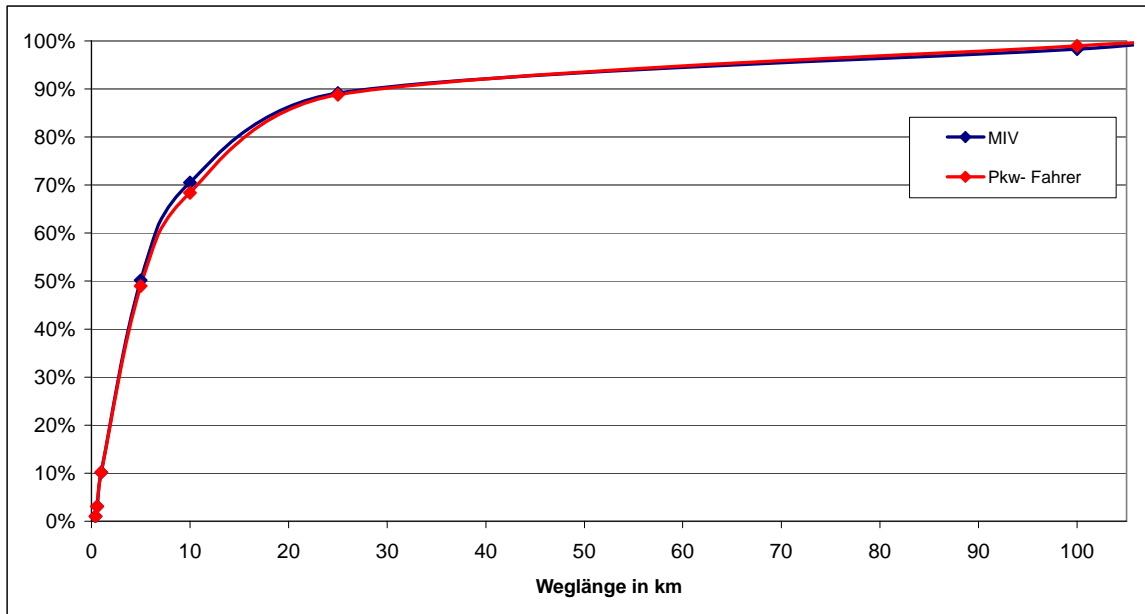


Abbildung 5-1: kumulierte Weglängen des MIV und der Pkw-Fahrer nach /ViZ 06/

Für jede Nutzungsklasse sollen die Substitutionsgrade für die zwei Szenarien hergeleitet werden. Zunächst werden die Pendlerfahrzeuge betrachtet. Dafür ist in **Abbildung 5-2** der Zusammenhang zwischen dem Einkommen, der Pendlerstrecke und der Anzahl der Pkw pro Haushalt aufgezeigt, der aus /ViZ 06/ und /LuAiD/ hergeleitet wird. /LuAiD/ zeigt den Zusammenhang zwischen dem Netto-Einkommen pro Haushaltsmitglied und der Entfernung zum Arbeitsplatz auf. Die Inhalte der Statistik sind in **Tabelle 5-2** wiedergegeben. Das Einkommen soll in Netto-Haushaltseinkommen überführt werden, um einen Vergleich der Statistiken zu ermöglichen. Dazu wird /LuAiD Tab/ herangezogen. Demnach leben in einem durchschnittlichen deutschen Haushalt 2,12 Personen. Auch diese Umrechnung ist in Tabelle 5-2 berücksichtigt.

Tabelle 5-2: Zusammenhang zwischen Einkommen und Entfernung zum Arbeitsplatz nach /LuAiD Tab/

Höhe des Nettoeinkommens je Haushaltsmitglied		Höhe des Nettoeinkommens je Haushalt		Entfernung zum Arbeitsplatz in km			
von	bis	von	bis	bis 10	10 bis 25	25 bis 50	über 50
	500	bis	1.060	2.297	851	224	64
500	900	1.060	1.908	2.387	1.135	315	96
900	1.300	1.908	2.756	3.229	1.955	677	238
1.300	1.700	2.756	3.604	2.681	1.853	736	292
1.700	2.300	3.604	4.876	1.958	1.486	685	305
2.300	2.900	4.876	6.148	800	643	335	180
2.900	mehr	6.148	mehr	1.005	704	381	254
Summe				14.357	8.627	3.353	1.429

Es lässt sich erkennen, dass mit steigendem Einkommen auch die Entfernung zum Arbeitsplatz steigt. Dazu wird das durchschnittliche Einkommen einer Pendlerklasse

ermittelt. Hierfür werden die Klassenmitten der Einkommensklassen herangezogen, für die Randklassen die jeweiligen Klassengrenzen. Sie werden mit den absoluten Zahlen nach Tabelle 5-2 gewichtet. Die Vorgehensweise wird anhand der Entfernungsklasse bis 10 km und dem Netto-Einkommen je Haushaltsmitglied erläutert: 2.297 Berufspendler haben ein Einkommen von durchschnittlich 500 €, 2.387 eines von 700 € Insgesamt 3.229 Pendler der ersten Entfernungsklasse haben ein durchschnittliches Einkommen von 1.100 € usw. Bezieht man dieses Ergebnis auf die Anzahl der Berufspendler der Entfernungsklasse bis 10 km von 14.357, so ergibt sich ein durchschnittliches Gehalt dieser Pendler von 1.345 € Analog kann das durchschnittliche Einkommen für die anderen Pendlerentfernungsklassen sowie für das durchschnittliche Netto-Haushaltseinkommen bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5-3** dargestellt. Diese lassen die Schlussfolgerung zu, dass mit steigendem Einkommen auch oft eine hohe Entfernung zum Arbeitsplatz verbunden ist.

Tabelle 5-3: *Durchschnittliches Einkommen je Entfernungsklasse nach /LuAiD Tab/*

durchschnittliches Einkommen	Entfernung zum Arbeitsplatz in km			
	bis 10 km	10 bis 25 km	25 bis 50 km	über 50 km
je Haushaltsmitglied	1.345 €	1.488 €	1.648 €	1.829 €
je Haushalt	2.850 €	3.154 €	3.495 €	3.877 €

Andersherum lässt sich ebenfalls bestimmen, welche durchschnittliche Weglänge von Pendlern der verschiedenen Einkommensklassen zurückgelegt wird. Dazu wird der Anteil an der jeweiligen Entfernungsklasse mit der durchschnittlichen Weglänge dieser Klasse nach Tabelle 4-1 gewichtet. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5-4** zusammengefasst.

Tabelle 5-4: *Mittlere Entfernung zum Arbeitsplatz nach Netto-Haushaltseinkommen nach /LuAiD Tab/*

Netto-Haushaltseinkommen							
von		1.060 €	1.908 €	2.756 €	3.604 €	4.876 €	6.148 €
bis	1.060 €	1.908 €	2.756 €	3.604 €	4.876 €	6.148 €	
mittlere Weglänge	9,54 km	10,74 km	12,83 km	14,30 km	15,99 km	17,74 km	18,11 km

In /LuAiD Tab/ ist der Zusammenhang zwischen dem Netto-Haushaltseinkommen und der Anzahl der Pkw je Haushalt dargestellt. Hierbei wird nur die mittlere Anzahl an Pkw pro Haushalt berücksichtigt. Der Zusammenhang ist nach Einkommensklassen differenziert in **Tabelle 5-5** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Haushaltseinkommen auch die Anzahl der Pkw steigt. Ab einem Haushaltseinkommen von 1.500 € ist durchschnittlich in jedem Haushalt ein Fahrzeug vorhanden, ab einem Einkommen von 2.600 € in jedem zweiten Haushalt ein Zweitwagen.

Tabelle 5-5: Zusammenhang zwischen dem Netto-Haushaltseinkommen und der mittleren Anzahl an Pkw je Haushalt nach /LuAiD Tab/

Netto-Haushaltseinkommen		mittlere Anzahl der Pkw je Haushalt
von	bis	
	900 €	0,4
900 €	1.500 €	0,7
1.500 €	2.000 €	1,0
2.000 €	2.600 €	1,3
2.600 €	3.000 €	1,5
3.000 €	3.600 €	1,6
3.600 €		1,8

Über die gemeinsame Größe, das Netto-Haushaltseinkommen, wird versucht, einen Zusammenhang zwischen der Entfernung zum Arbeitsplatz und der mittleren Anzahl der Pkw pro Haushalt zu ermitteln. Dieser ist in **Abbildung 5-2** dargestellt.

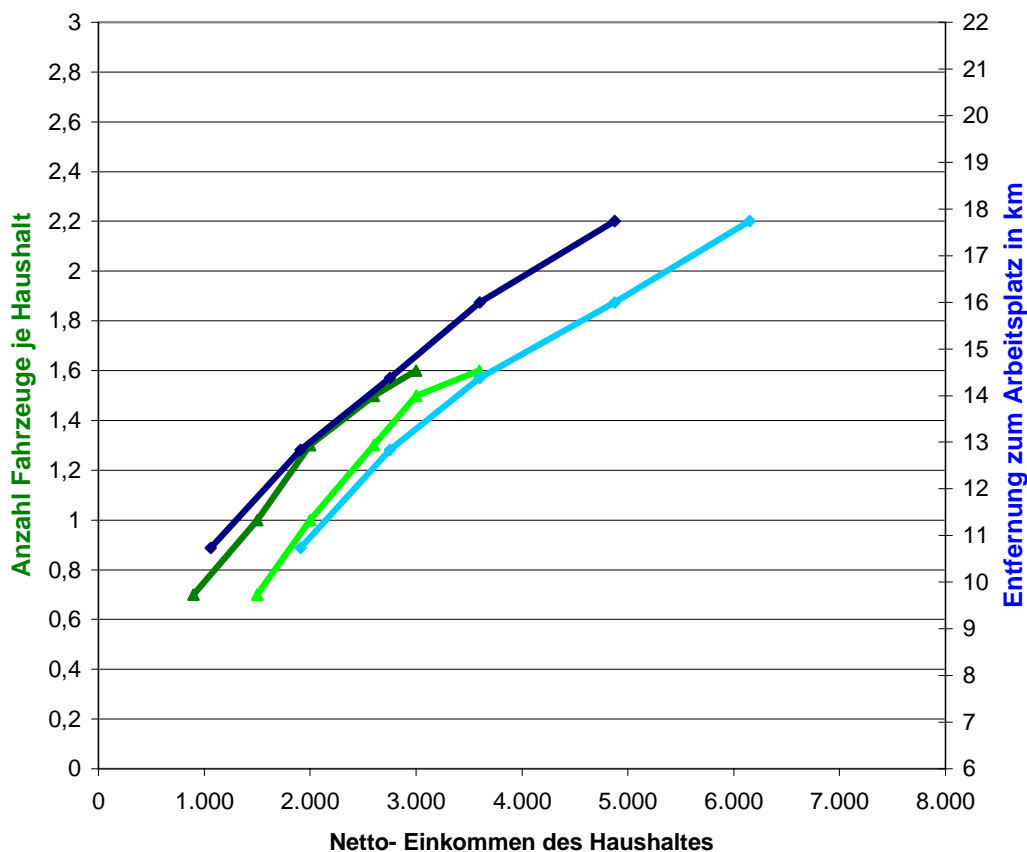


Abbildung 5-2: Zusammenhang zwischen der Entfernung zum Arbeitsplatz und der Anzahl der Pkw pro Haushalt über das Netto-Haushaltseinkommen

Folgendes lässt sich hieraus ableiten: Pendelt der Erwerbstätige 11 km zu seinem Arbeitsplatz, so ist im Haushalt durchschnittlich ein Pkw vorhanden. Ab einer Entfernung von 17 km zum Arbeitsplatz steht im Schnitt ein weiteres Fahrzeug im Haushalt zur Verfügung. Es bestätigt sich die Annahme, dass mit steigender Entfernung zum Arbeitsplatz die Anzahl der Pkw im Haushalt ebenfalls zunimmt. Diese Tatsache

soll bei der Festlegung der Substitutionsgrade für Pendlerfahrzeuge berücksichtigt werden.

Für die sechs Nutzungsklassen wird Folgendes für die Bestimmung der Substitutionsgrade festgelegt. Es wird für jede Nutzungsklasse der Substitutionsgrad für beide Szenarien bestimmt, die Ergebnisse sind in **Tabelle 5-6** zusammenfassend dargestellt.

Pendler mit einer Entfernung bis 10 km

Im pessimistischen Szenario werden in dieser Nutzungsklasse keine Fahrzeuge elektrisch substituiert. Pendlerfahrten können zwar mit einem Elektrostraßenfahrzeug bewältigt werden, über die privaten Fahrten dieser Fahrzeuge kann diesbezüglich allerdings keine Aussage gemacht werden. Es wird davon ausgegangen, dass viele Fahrten mit diesem Fahrzeug, unvorhersehbar oder auch geplant, die Reichweite des Elektrofahrzeuges überschreiten. Zudem kann nach Abbildung 5-2 nicht davon ausgegangen werden, dass weitere Fahrzeuge im Haushalt vorhanden sind, mit denen solche Strecken dann zurückgelegt werden könnten. Deshalb werden keine Fahrzeuge ersetzt, die der Nutzungsklasse Pendler mit einer Entfernung bis 10 km zum Arbeitsplatz angehören.

Im optimistischen Szenario hingegen lassen sich Fahrzeuge ersetzen. Durch die deutlich größere Reichweite des Referenzfahrzeuges können mehr private Fahrten mit dem Elektrostraßenfahrzeug zurückgelegt werden. Zwar ist immer noch davon auszugehen, dass ein Teil der Fahrten auch weiterhin nicht mit einem Elektrostraßenfahrzeug zu bewältigen sind, doch es kann auch davon ausgegangen werden, dass ein geringer Teil der Fahrzeuge auch durch ein Elektrostraßenfahrzeug ersetzt werden kann, da die gefahrenen Strecken die Reichweite des Fahrzeuges nicht überschreiten. Es wird deshalb festgelegt, dass 10 % dieser Fahrzeuge in diesem Szenario durch Elektrostraßenfahrzeuge substituiert werden.

Pendler mit einer Entfernung zwischen 10 und 25 km

Im pessimistischen Szenario können bei Pendlern der Entfernungsklasse 10 bis 25 km ein geringer Teil der Pkw ersetzt werden. Auch hier kann die Pendlerstrecke elektrisch zurückgelegt werden, da sie die Reichweite des Pkws deutlich unterschreitet. Diese Entfernungsklasse weist die gleiche Fremdnutzung wie die zuvor betrachtete auf. Daraus wird abgeleitet, dass die Nutzungsprofile für private Zwecke gleich sind, also auch mit diesen Fahrzeugen Strecken zurückgelegt werden, die nicht elektrisch zu bewältigen sind. Der Grund, warum trotzdem Fahrzeuge substituiert werden können, ist der Zweitwagenanteil. Nach /LuAiD Tab/ ist ab einer Pendlerstrecke von 17 km ein Zweitwagen im Haushalt vorhanden, bei der durchschnittlichen Entfernung von 14 km immerhin in jedem zweiten. Wenn Zweitwagen im Haushalt vorhanden sind, so können diese für Fahrten genutzt werden, die die Reichweite des Elektrofahrzeuges überschreiten. Es wird der Substitutionsgrad für dieses Szenario auf 3 % festgelegt.

Im optimistischen Szenario ist der Anteil der substituierbaren Pkw höher. Dies liegt daran, dass durch die größere Reichweite des Pkw mehr Fahrten mit diesem bewältigt werden können. Außerdem ist die zu erwartende Akzeptanz in der Bevölkerung mit steigender Reichweite ebenfalls größer, so dass mehr Fahrzeughalter bereit sind, auf ein

Elektrofahrzeug umzusteigen. Deshalb ist der Substitutionsgrad im optimistischen Szenario um das 10-fache größer als im zuvor betrachteten und beträgt 30 %.

Pendler mit einer Entfernung zwischen 25 und 50 km

Diese Entfernungsklasse weist in beiden Szenarien die größten Substitutionsgrade der Pendlerklassen auf. Denn wie Abbildung 5-2 zu entnehmen ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil an Zweitwagen hier größer als in der zuvor betrachteten Nutzungsklasse ist. Des Weiteren ist sichergestellt, dass in beiden Szenarien die Reichweite der Elektrofahrzeuge ausreichend ist, um die Pendlerstrecke zurückzulegen.

Deshalb werden im pessimistischen Szenario 5 % dieser Fahrzeuge elektrisch ersetzt.

Im optimistischen Szenario weist diese Nutzungsklasse den höchsten Substitutionsgrad auf. Da davon ausgegangen werden kann, dass ein weiteres Fahrzeug für nicht elektrisch zurücklegbare Strecken vorhanden ist, wird die Hälfte der Pkw durch Elektrofahrzeuge ersetzt.

Pendler mit einer Entfernung von mehr als 50 km

Auch wenn bei dieser Nutzungsklasse davon ausgegangen werden kann, dass ein Haushalt ein weiteres Fahrzeug vorhanden ist, kann keines dieser Fahrzeuge im pessimistischen Szenario ersetzt werden. Die Strecke, die zum Arbeitsplatz zurückgelegt werden muss, übersteigt die Reichweite des Fahrzeuges, so dass sie nur mit einem verbrennungsmotorisch betriebenen Pkw bewältigt werden kann. Eine Substitution ist technisch nicht möglich, weshalb der Substitutionsgrad 0 % beträgt.

Im optimistischen Szenario hingegen können aufgrund der Reichweite des Referenzfahrzeuges auch Pkw dieser Nutzungsklasse substituiert werden. Auch wenn davon ausgegangen wird, dass ein Zweitwagen im Haushalt vorhanden ist, so ist der Substitutionsgrad dieser Entfernungsklasse niedriger als der mit einer Entfernung zwischen 25 und 50 km. Zum einen gibt es Pendler, die eine Strecke zurücklegen müssen, die auch die Reichweite eines Elektrofahrzeuges im Purpose Design überschreiten. Laut /ViZ 06/ legen rund 1 % aller Erwerbstätigen auf dem Weg zur Arbeit eine Strecke von mehr als 100 km zurück. Diese können nur ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor verwenden. Des Weiteren wird auf eine Substitution verzichtet, wenn die Strecke, die zum Arbeitsplatz zurückgelegt werden muss, deutlich länger als 50 km ist. Denn es besteht die Möglichkeit, dass z.B. im Falle eines Umweges die Ladung des Energiespeichers nicht ausreicht, um die Strecke zu bewältigen. Aus diesen Gründen ergibt sich für diese Entfernungsklasse ein Substitutionsgrad von 30 %.

Geschäftlich genutzte Fahrzeuge

Im pessimistischen Szenario weisen die geschäftlich genutzten Fahrzeuge den größten Substitutionsgrad auf. Diese Fahrzeuge legen Strecken zurück, die planbar sind, so dass in regelmäßigen Abständen der Energiespeicher geladen werden kann. Dafür wird ein Fuhrparkmanagement benötigt. Dieses macht eine Substitution von vor allem Flottenfahrzeugen von Lieferservices oder Dienstleistungsunternehmen möglich. Dabei wird darauf geachtet, die Routen dem Leistungsprofil des Fahrzeuges anzupassen. Es wird festgelegt, dass trotz der geringen Reichweite der Fahrzeuge im pessimistischen Szenario 1/10 der Fahrzeuge substituiert werden können.

Im optimistischen Szenario können aufgrund der höheren Reichweite weitere Fahrzeuge elektrisch substituiert werden. Der Substitutionsgrad von 30 % wird festgelegt.

Privat genutzte Fahrzeuge

Von den privat genutzten Fahrzeugen lässt sich nur ein geringer Anteil elektrisch substituieren. Zum einen handelt es sich bei diesen Fahrzeugen um Zweitwagen. Diese können nicht elektrisch substituiert werden, wenn bereits der Erstwagen mit einem Elektromotor angetrieben wird. In einem Haushalt soll es nicht mehr als ein Elektrostraßenfahrzeug geben, um so gewährleisten zu können, dass auch lange Strecken mit dem eigenen Pkw zurückgelegt werden können. Handelt es sich um einen Erstwagen, ist auch hier die Substitution nur in geringem Maße möglich. Denn ist nur ein Fahrzeug im Haushalt vorhanden, so muss bei diesem sichergestellt werden, dass mit ihm alle Strecken zu bewältigen sind. Deshalb kann ein solcher Pkw nur dann ersetzt werden, wenn er keine Strecken länger als 100 km zurücklegen wird.

Es lässt sich trotzdem ein geringer Teil der Privatfahrzeuge substituieren, z.B. weil Fahrzeughalter sich umweltbewusst verhalten wollen. Aus diesen Gründen wird hier der gleiche Substitutionsgrad wie bei den Pendlerfahrzeugen mit einer Strecke bis 10 km festgelegt.

Aus den in 5.1 dargelegten Rahmenbedingungen und den in 5.2 genannten privat zurückgelegten Strecken wurden die in Tabelle 5-6 aufgelisteten Substitutionsgrade für die beiden Szenarien und jeweils sechs Nutzungsklassen festgelegt.

Tabelle 5-6: *Substitutionsgrade der sechs Nutzungsklassen für beide Szenarien*

Nutzungsklasse	Substitutionsgrade	
	pessimistisches Szenario	optimistisches Szenario
Geschäftlich	10 %	30 %
Pendler, bis 10 km	0 %	10 %
Pendler, 10 bis 25 km	3 %	30 %
Pendler, 25 bis 50 km	5 %	50 %
Pendler, über 50 km	0 %	30 %
Privat	0 %	10 %

5.4 Verbrauch

Der durchschnittliche spezifische Verbrauch ist in beiden Szenarien unterschiedlich, das ergibt sich aus den differenzierten Rahmenbedingungen und Fahrzeugverteilungen (vgl. 5.1) der Referenzfahrzeuge in 3.2.

Tabelle 5-7: *Durchschnittlicher spezifischer Verbrauch für beide Szenarien*

Fahrzeugklasse	pessimistisches Szenario		optimistisches Szenario	
	Anteil	Verbrauch	Anteil	Verbrauch
Kleinwagen	10 %	12 kWh / 100 km	30 %	12 kWh / 100 km
Kompaktklasse	70 %	20 kWh / 100 km	60 %	20 kWh / 100 km
Plug-In-Hybrid	20 %	24 kWh / 100 km	10 %	24 kWh / 100 km
Durchschnitt		20 kWh / 100 km		18 kWh / 100 km

Um eine Vergleichbarkeit der Szenarien hinsichtlich der Anzahl der Fahrzeuge zu gewährleisten, beschränken sich die folgenden Berechnungen auf lediglich eine Klasse. Dazu werden die Werte der Kompaktklasse herangezogen, da diese in beiden Szenarien den größten Anteil der Fahrzeuge liefert. Der spezifische Verbrauch wird somit im weiteren Verlauf der Studie für beide Szenarien auf 20 kWh / 100 km angesetzt.

5.5 Ladeleistung

Für die Ladung der Elektrostraßenfahrzeuge stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Sie können entweder über eine übliche Haushaltssteckdose oder an eine Ladevorrichtung mit Drehstromanschluss angeschlossen werden. Wird der Pkw an die Haushaltssteckdose angeschlossen, so wird er mit einer Leistung von 3 kW geladen. Ein Drehstromanschluss hingegen kann eine Leistung von 15 kW abgeben.

Im Folgenden soll festgelegt werden, mit welcher Leistung die Fahrzeuge geladen werden. Dabei wird zwischen den verschiedenen Nutzungsklassen differenziert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5-8** zusammengestellt.

Es wird die Annahme getroffen, dass Unternehmen generell über Drehstromanschlüsse verfügen. Deshalb werden alle Elektrostraßenfahrzeuge, die geschäftlich genutzt werden, über Ladevorrichtungen mit Drehstromanschluss geladen. Für diese Nutzungsklasse ergibt sich somit die größtmögliche Ladeleistung von 15 kW.

Fahrzeuge, die den Nutzungsklassen privat, Pendler bis 10 km oder Pendler 10 bis 25 km angehören, können nicht über eine Ladevorrichtung mit Drehstromanschluss geladen werden. Es wird angenommen, dass Haushalte mit diesen Fahrzeugtypen über keinen Drehstromanschluss verfügen, so dass nur die Ladung über die Haushaltssteckdose in Frage kommt. Diese Fahrzeuge werden mit einer Leistung von 3 kW geladen.

Fahrzeuge der anderen beiden Pendlerklassen mit einer Entfernung von mehr als 25 km zum Arbeitsplatz nutzen sowohl die Haushaltssteckdose mit einer Leistung von 3 kW als auch Ladevorrichtungen mit Drehstromanschluss mit einer Leistung von 15 kW am Arbeitsplatz. Es wird festgelegt, dass 1/6 der Pendler dieser beiden Entfernungsklassen die Möglichkeit hat, sein Fahrzeug an einer Ladevorrichtung mit Drehstromanschluss zu laden. Die anderen Pendler verfügen lediglich über eine übliche Haushaltssteckdose, an der das Elektrostraßenfahrzeug geladen wird. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Ladeleistung dieser Nutzungsklassen von 5 kW.

Tabelle 5-8: *Ladeleistung der Nutzungsklassen*

Nutzungsklasse	Ladeleistung
Geschäftlich	15 kW
Pendler, bis 10 km	3 kW
Pendler, 10 - 25 km	3 kW
Pendler, 25 - 50 km	5 kW
Pendler, über 50 km	5 kW
Privat	3 kW

6 Ermittlung des technischen Potentials

6.1 Potenzialbegriffe

Ein wesentliches Kriterium für die Effizienz einer neuen Technologie oder Maßnahme ist deren Umsetzungspotenzial. Es ist zwischen dem theoretischen, dem technischen, dem wirtschaftlichen und dem praktischen Potenzial zu unterscheiden /RUD 97/. Die Potenziale sind untereinander dadurch verknüpft, dass sie wie in Abbildung 6-1 Teilmenge eines anderen Potenzials sind bzw. ein anderes Potenzial als Teilmenge enthalten.

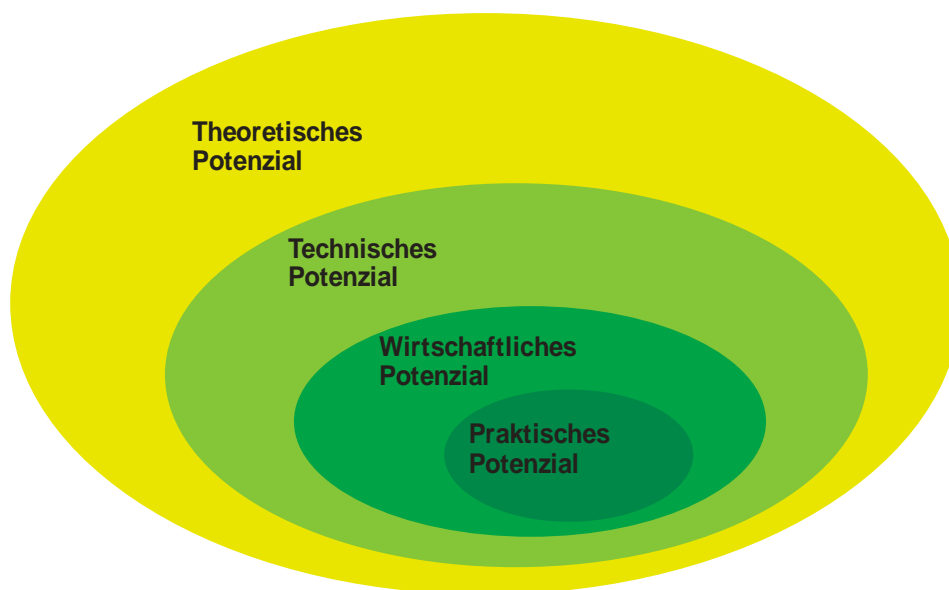


Abbildung 6-1: Potenzialbegriffe

Theoretisches Potenzial

Als theoretisches Potenzial wird die maximal mögliche Umsetzung einer Technologie verstanden, die sich aus dem gesamten Angebot oder der gesamten Nachfrage ergibt. Die theoretischen Potenziale können aufgrund technischer und wirtschaftlicher Einschränkungen nur zum kleinen Teil genutzt werden.

Technisches Potenzial

Das technische Potenzial ergibt sich aus dem theoretischen Potenzial unter Berücksichtigung technischer, ökologischer, infrastruktureller und anderer Belange. Technische Rahmenbedingungen und ökologische Forderungen können das nutzbare Potenzial erheblich einschränken.

Wirtschaftliches Potenzial

Das wirtschaftlich nutzbare bzw. ausbauwürdige Potenzial entspricht dem Anteil des technischen Potentials, der wirtschaftlich im Vergleich zu anderen Energieformen genutzt werden kann. Als Kriterium dafür wird die Amortisation des investierten Kapitals innerhalb der Nutzungsdauer herangezogen.

Praktisches Potenzial

Das praktische oder Erwartungspotenzial beschreibt die zu erwartende tatsächliche Anzahl an Fahrzeugen. Es ist in der Regel geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da es im Allgemeinen nicht sofort, sondern allenfalls innerhalb eines längeren Zeitraumes vollständig erschließbar ist. Dies liegt u. a. in den nur begrenzten Kapazitäten für die Herstellung der Fahrzeuge und deren Komponenten, der noch gegebenen Funktionsfähigkeit vorhandener Fahrzeuge sowie einer Vielzahl sonstiger Hemmnisse (u. a. Akzeptanzprobleme, mangelnde Information) begründet, die selbst einer wirtschaftlichen Nutzung entgegenstehen. Das praktische Potenzial kann aber auch größer als das wirtschaftliche Potenzial sein, wenn z. B. eine staatliche Förderung gewährt wird.

6.2 Verkehrsstatistische Basisdaten

In Deutschland waren im Jahr 2004 nach /ViZ 06/ 46 Mio. Fahrzeugen zugelassen, die laut /ViZ 06/ eine Strecke von insgesamt 590 Mrd. km zurücklegten.

Die Fahrzeuge sind entweder auf Unternehmen oder Privatpersonen zugelassen. Laut /ViZ 06/ handelt es sich bei 4,9 Mio. Fahrzeugen um solche, die auf Unternehmen zugelassen sind. Die restlichen 41,3 Mio. Fahrzeuge entfallen auf den privaten Sektor.

Da der Großteil der Erwerbstätigen zur Arbeit pendeln muss, wird der private Pkw von vielen hierzu genutzt, laut /LuAiD/ sind es rund 18,5 Mio. Fahrzeuge. Diese Fahrzeuge können in unterschiedliche Entfernungsklassen eingeteilt werden. Mit 7,4 Mio. Pkw wird eine Strecke von weniger als 10 km zur Arbeitsstätte zurückgelegt, 7,0 Mio. Pendler legen eine Strecke zwischen 10 und 25 km zurück, 2,9 Mio. Pendler sind zwischen 25 und 50 km zum Arbeitsplatz unterwegs. Bei lediglich 1,2 Mio. ist dieser Weg länger als 50 km. In diesen 18,5 Mio. Fahrzeugen werden neben den Fahrern zusätzlich noch 0,9 Mio. Mitfahrer zur Arbeit befördert, so dass sich ein mittlerer Besetzungsgrad von ca. 1,05 Personen pro Fahrzeug bei Pendlern ergibt.

Nicht nur die Anzahl der genutzten Fahrzeuge, sondern auch deren Jahresfahrleistung sind von Bedeutung. Für Pendler setzt sich diese aus der Jahresfahrleistung fürs Pendeln und der Fremdnutzung zusammen. Die Jahresfahrleistung fürs Pendeln kann aus der durchschnittlichen Weglänge ermittelt werden und soll am Beispiel der Entfernungsklasse bis 10 km erläutert werden: 7,4 Mio. Pkw legen an 220 Arbeitstagen im Jahr zweimal die Strecke von 4 km zurück. Es ergibt sich eine Jahresfahrleistung fürs Pendeln von 14,5 Mrd. km, 1.941 km pro Pkw. Zusätzlich muss die Fremdnutzung berücksichtigt werden, die in 5.2 ermittelt wurde und Tabelle 5-1 zu entnehmen ist. Somit ergibt sich eine Jahresfahrleistung für Pendler bis 10 km von 6.816 km pro Pkw und 50,7 Mrd. km insgesamt. Analog lassen sich die Jahresfahrleistungen der anderen Entfernungsklassen bestimmen, die Ergebnisse sind in **Tabelle 6-1** zusammengefasst. Die 7 Mio. Pendler, die zwischen 10 und 25 km von ihrem Arbeitsplatz entfernt wohnen,

haben jährlich eine Fahrleistung von 6.794 km fürs Pendeln und eine Fremdnutzung von ebenfalls 4.875 km, so dass sich eine Jahresfahrleistung von 11.669 km pro Pkw und von 47,6 Mrd. km für die gesamte Entfernungsklasse ergibt. Die dritte Entfernungsklasse weist eine Jahresfahrleistung von 16.985 km pro Pkw zum Pendeln und von 3.250 km pro Pkw für private Zwecke auf. Somit ergibt sich eine Jahresfahrleistung von 20.235 km pro Pkw und 48,4 Mrd. km für die Entfernungsklasse. Die 1,2 Mio. Pendler, die eine Strecke länger als 50 km bewältigen müssen, haben eine Jahresfahrleistung von insgesamt 30.742 km pro Pkw, davon werden 29.117 km zum Pendeln gefahren, 1.625 km für private Zwecke. Die Jahresfahrleistung der Entfernungsklasse beträgt 33,7 Mrd. km.

Tabelle 6-1: Anzahl der Pendlerfahrzeuge und deren Jahresfahrleistung nach Entfernungsklasse

Entfernungs- klasse	Anzahl der Pkw	Klassenbezogene Nutzung pro Pkw	Fremdnutzung	Jahresfahr- leistung pro Pkw	Jahresfahrleistung der Entfernungsklasse
Bis 10 km	7,4 Mio.	1.941 km	4.875 km	6.816 km	14,5 Mrd. km
10 - 25 km	7,0 Mio.	6.794 km	4.875 km	11.669 km	47,6 Mrd. km
25 - 50 km	2,9 Mio.	16.985 km	3.250 km	20.235 km	48,4 Mrd. km
Über 50 km	1,2 Mio.	29.117 km	1.625 km	30.742 km	33,7 Mrd. km

Um die Jahresleistung von geschäftlich genutzten Fahrzeugen zu ermitteln, wird der mittlere Besetzungsgrad dieser Fahrzeuge dem der Pendler gleichgesetzt, also 1,05 Personen pro Pkw. Geschäftlich genutzte Fahrzeuge legten 2004 nach /ViZ 06/ 115 Mrd. Personenkilometer zurück, so dass sich bei dem angegebenen Besetzungsgrad eine Jahresfahrleistung von 109 Mrd. km ergibt. Die Jahresfahrleistung pro Pkw beträgt demnach 22.495 km.

Die restlichen 255 Mrd. km entfallen auf die privat genutzten Fahrzeuge. Hier ergibt sich eine Jahresfahrleistung von 11.213 km pro Pkw. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6-2** zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Anzahl der Pkw und Jahresfahrleistung pro Nutzungsklasse

Nutzungsklasse	Anzahl der Pkw	Klassenbezogene Nutzung pro Pkw	Fremdnutz- ung	Jahresfahrleistun- g pro Pkw	Jahresfahrleistung der Entfernungsklasse
Geschäftlich	4,9 Mio.	22.495 km	0 km	22.495 km	109 Mrd. km
Pendler, bis 10 km	7,4 Mio.	1.941 km	4.875 km	6.816 km	51 Mrd. km
Pendler, 10 - 25 km	7,0 Mio.	6.794 km	4.875 km	11.669 km	82 Mrd. km
Pendler, 25 - 50 km	2,9 Mio.	16.985 km	3.250 km	20.235 km	58 Mrd. km
Pendler, über 50 km	1,2 Mio.	29.117 km	1.625 km	30.742 km	36 Mrd. km
Privat	22,8 Mio.	11.213 km	0 km	11.213 km	255 Mrd. km

In einem nächsten Schritt werden die elektrisch substituierbaren Pkw und ihre Jahresfahrleistung bestimmt. Dabei werden beide Szenarien berücksichtigt. Die Szenarien werden getrennt voneinander betrachtet. Zum Schluss sollen die Ergebnisse gegenübergestellt werden.

6.3 Pessimistisches Szenario

Im pessimistischen Szenario wird nur ein geringer Teil der Fahrzeuge elektrisch substituiert, da sich durch das Conversion-Design des Fahrzeuges starke technische Einschränkungen in der Nutzung ergeben. Deshalb kann in drei Nutzungsklassen auch kein Pkw ersetzt werden. Den größten Substitutionsgrad weisen mit 10 % hingegen die geschäftlich genutzten Fahrzeuge auf. Die Ergebnisse der Substitution sind in **Tabelle 6-3** zusammengefasst. Aufgrund der geringen Marktdurchdringung werden lediglich 840.000 Pkw elektrisch ersetzt. Mehr als die Hälfte dieser Fahrzeuge, 490.000 Fahrzeuge, werden geschäftlich genutzt. Auf die Pendlerklassen entfallen die übrigen 350.000 Pkw, bei der Entfernungsklasse von 10 bis 25 km werden 210.000, bei der von 25 bis 50 km 140.000 Pkw elektrisch substituiert. Es können lediglich 2 % aller Fahrzeuge ersetzt werden. Wie sich der Pkw-Bestand auf die Antriebsarten Verbrennungsmotor und Elektromotor aufteilt, ist in **Abbildung 6-2** dargestellt.

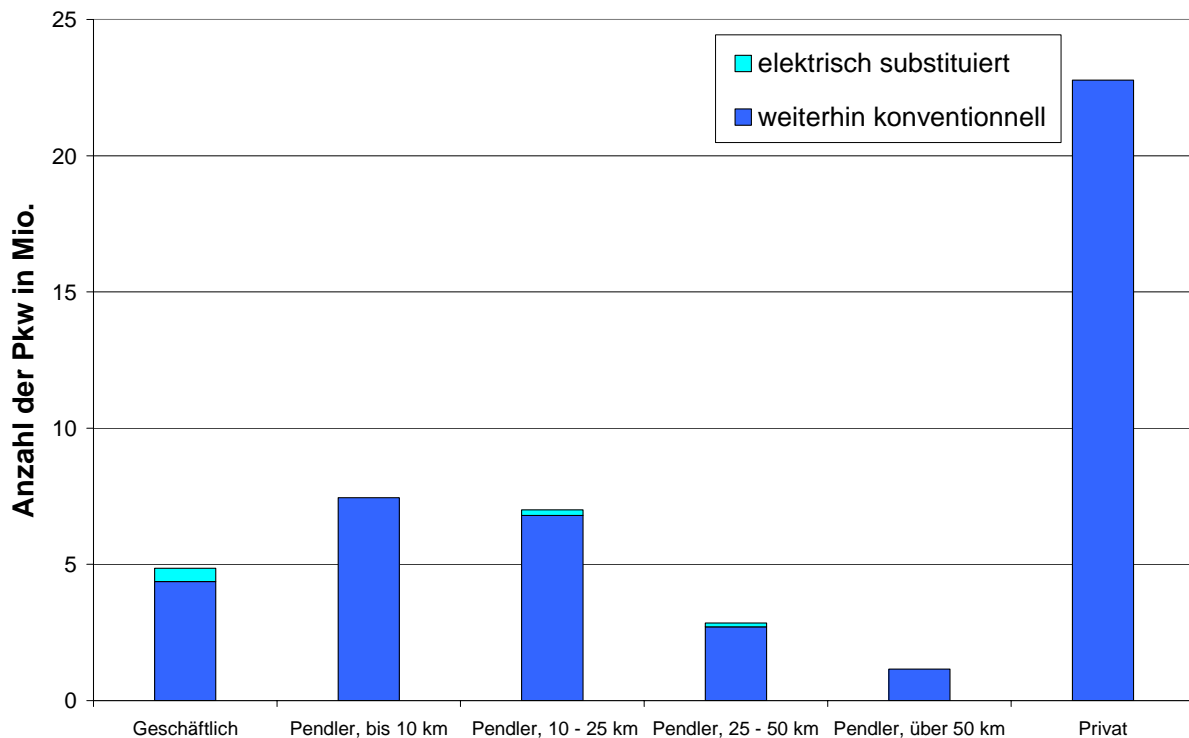


Abbildung 6-2: Verteilung der Pkw nach deren Anzahl auf die Antriebsarten Elektro- und Verbrennungsmotor im pessimistischen Szenario

Die daraus resultierenden Jahresfahrleistungen der einzelnen Nutzungsklassen lassen sich über die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen der Pkw bestimmen und sind ebenfalls in Tabelle 6-3 zusammengefasst. Insgesamt werden im pessimistischen Szenario nach der Substitution 16,3 Mrd. km elektrisch zurückgelegt. Auch hier entfällt der Großteil der Jahresfahrleistung mit 10,9 Mrd. km auf die Nutzungsklasse der geschäftlich genutzten Pkw. Die Pendler legen die restlichen 5,4 Mrd. km zurück. Somit werden nach der Substitution insgesamt 3 % der Jahresfahrleistung elektrisch zurückgelegt. Die Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die beiden Antriebsysteme ist in **Abbildung 6-3** dargestellt.

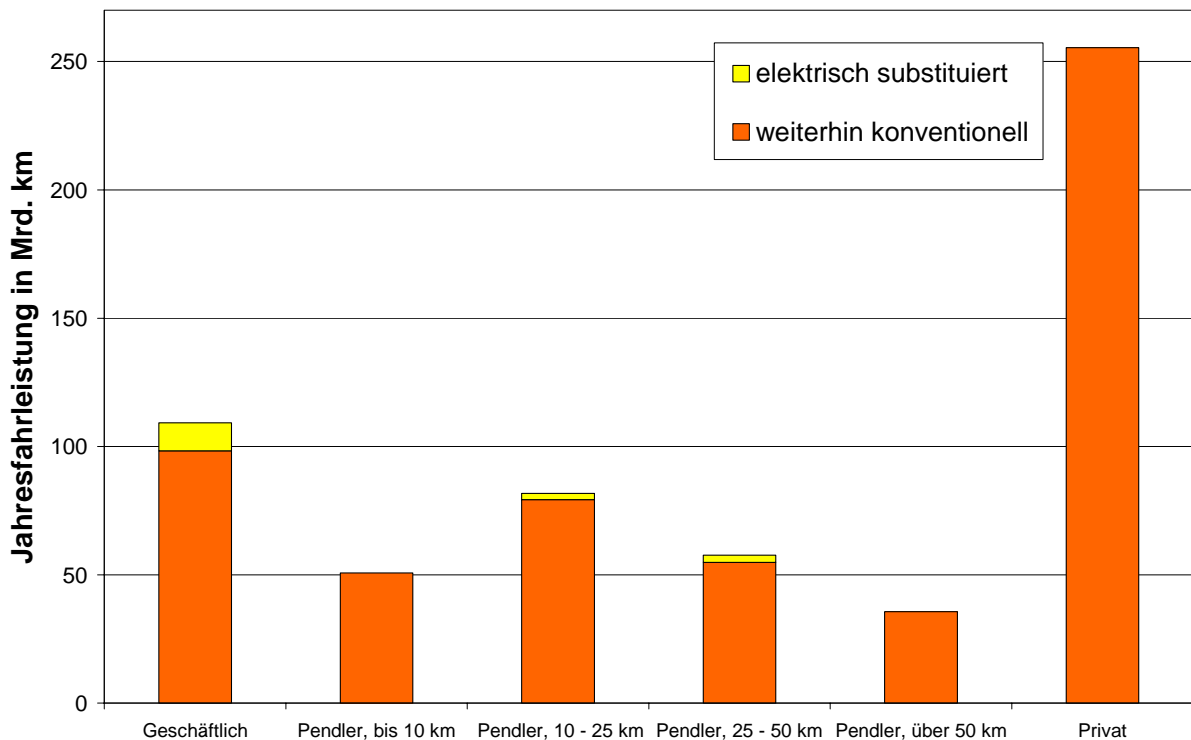


Abbildung 6-3: Verteilung der Jahresfahrleistung auf die Antriebsarten Elektro- und Verbrennungsmotoren im pessimistischen Szenario

Die Ergebnisse für die Substitution der Pkw und der Jahresfahrleistung sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst. Sie dienen als Grundlage für die folgende Bestimmung des durch Elektrostraßenfahrzeuge verursachten Energiebedarfs.

Tabelle 6-3: Ergebnisse der Substitution für das pessimistische Szenario

Nutzungsklasse	Anzahl Pkw pro Nutzungsklasse	Substitutionsgrad	substituierte Pkw	Jahresfahrleistung pro Pkw	substituierte Jahresfahrleistung
Geschäftlich	4,9 Mio.	10%	490.000	22.495 km	10,9 Mrd. km
Pendler, bis 10 km	7,4 Mio.	0%	0	6.816 km	0 km
Pendler, 10 - 25 km	7,0 Mio.	3%	210.000	11.669 km	2,5 Mrd. km
Pendler, 25 - 50 km	2,9 Mio.	5%	140.000	20.235 km	2,9 Mrd. km
Pendler, über 50 km	1,2 Mio.	0%	0	30.742 km	0 km
Privat	22,8 Mio.	0%	0	11.213 km	0 km

Legt man für alle Pkw einen Verbrauch von 20 kWh auf 100 km zu Grunde, so wird in einem Jahr eine Energiemenge von 3,3 GWh durch die Elektrostraßenfahrzeugen nachgefragt. Die Pendlerfahrzeuge benötigen insgesamt 1,1 GWh an Energie, um die Jahresfahrleistung von 5,4 Mrd. km zurückzulegen. Durch geschäftlich genutzte Elektrostraßenfahrzeuge wird eine Energiemenge von 2,2 GWh verbraucht. **Tabelle 6-4** fasst die Ergebnisse für die Bestimmung des Energiebedarfs zusammen.

Tabelle 6-4: *Energiebedarf der Nutzungsklassen im pessimistischen Szenario*

Nutzungsklasse	Energieverbrauch	Energiebedarf
Geschäftlich	20 kWh / 100 km	2,2 GWh
Pendler, bis 10 km	20 kWh / 100 km	0 GWh
Pendler, 10 - 25 km	20 kWh / 100 km	0,5 GWh
Pendler, 25 - 50 km	20 kWh / 100 km	0,6 GWh
Pendler, über 50 km	20 kWh / 100 km	0 GWh
Privat	20 kWh / 100 km	0 GWh

6.4 Optimistisches Szenario

Betrachtet man nun das optimistische Szenario, so lassen sich hier deutlich mehr Fahrzeuge ersetzen. Durch das Referenzfahrzeug im Purpose Design eröffnen sich weitere Anwendungsmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen. Es können in allen Nutzungsklassen Pkw ersetzt werden, da die technischen Restriktionen zum Teil aufgehoben sind. Die höhere Reichweite ermöglicht es nun auch einem Teil der Pendlern aller Entfernungsklassen und auch der Privatpersonen ein Elektrostraßenfahrzeug zu nutzen. Die Substitutionsgrade reichen in diesem Szenario von 10 % für Pendler mit einer Entfernung bis zu 10 km zum Arbeitsplatz und privat genutzten Pkw bis zu 50 % bei der Pendlerentfernungsklasse von 25 bis 50 km.

Die Ergebnisse der Substitution sind in **Tabelle 6-5** zusammenfassend dargestellt. Aufgrund der deutlich höheren Marktdurchdringung werden insgesamt 8,4 Mio. Pkw elektrisch ersetzt. Der größte Teil entfällt mit 4,6 Mio. Pkw auf die vier Entfernungsklassen der Pendler. 750.000 Fahrzeuge werden in der ersten Entfernungsklasse ersetzt, in der zweiten sind es mit 2,1 Mio. fast dreimal so viele. In der dritten Entfernungsklasse können rund 1,4 Mio. Pkw auch elektrisch betrieben werden, in der letzten mit einer Entfernung von über 50 km sind es lediglich 300.000. Des Weiteren werden insgesamt 1,5 Mio. geschäftlich genutzte sowie 2,3 Mio. private Pkw ersetzt. Auch für das optimistische Szenario soll der Pkw-Bestand nach der Substitution differenziert nach Antriebsart in **Abbildung 6-4** dargestellt werden.

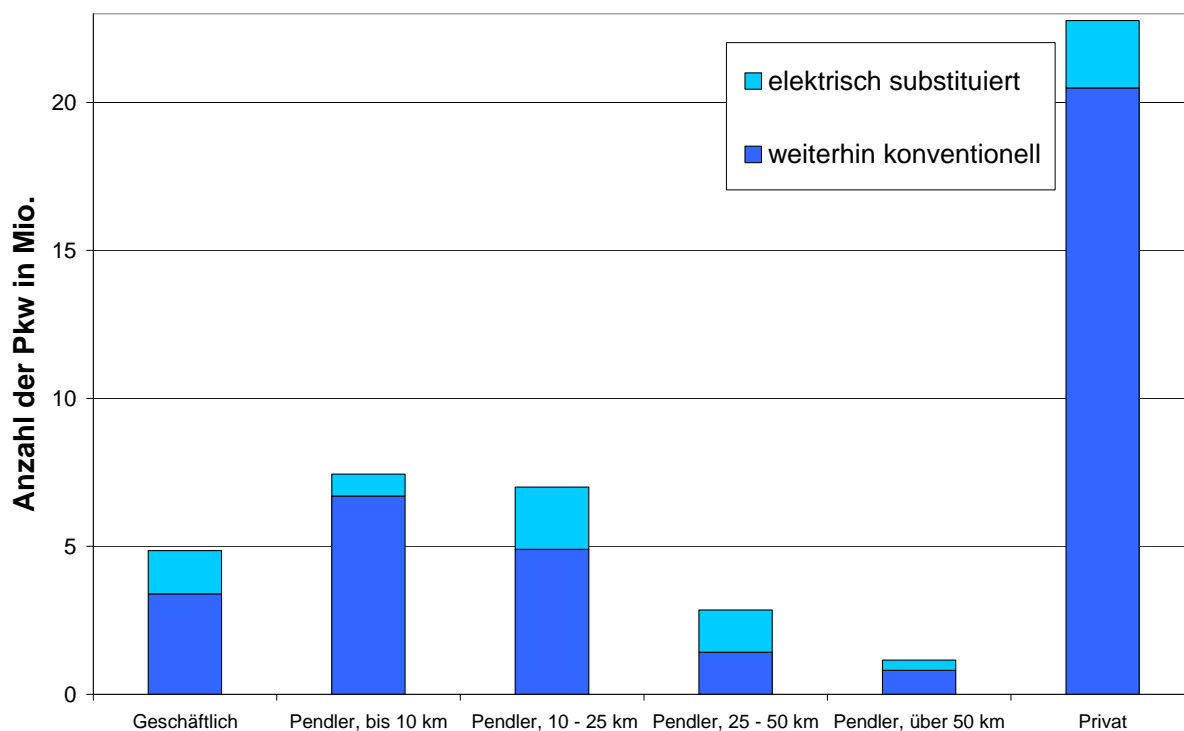


Abbildung 6-4: Verteilung der Pkw nach deren Anzahl auf die Antriebsarten Elektro- und Verbrennungsmotor im optimistischen Szenario

Die elektrisch substituierte Jahresfahrleistung ist ebenfalls in Tabelle 6-5 zusammengefasst. Von diesen insgesamt 14,5 Mio. Fahrzeugen werden jährlich 206 Mrd. km zurückgelegt. Mit 100 Mrd. km entfällt knapp die Hälfte der Jahresfahrleistung auf die Pendlerfahrzeuge allgemein. 55 Mrd. km werden von den 2,4 Mio. geschäftlichen Fahrzeugen zurückgelegt und 51 Mrd. km von den privat genutzten Pkw. Insgesamt werden in diesem Szenario von 18 % der Fahrzeuge also 22 % der Jahresfahrleistung aller Pkw zurückgelegt.

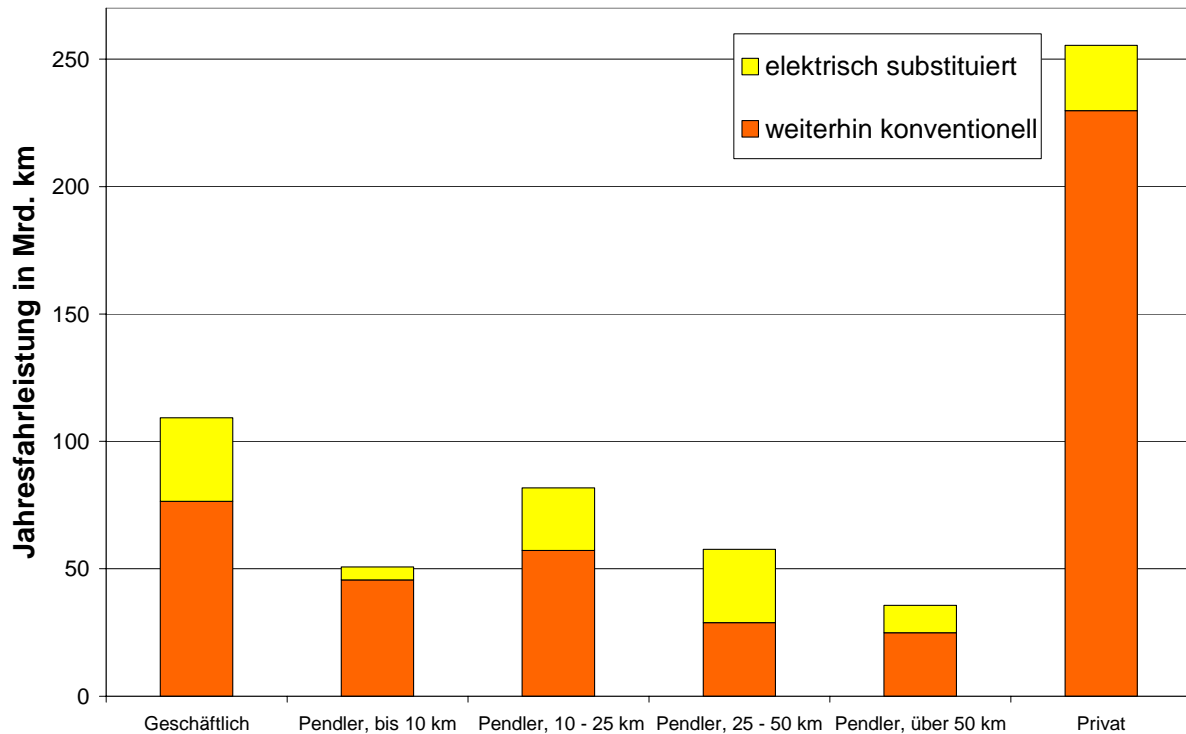


Abbildung 6-5: Verteilung der Jahresfahrleistung auf die Antriebsarten Elektro- und Verbrennungsmotoren im optimistischen Szenario

Die elektrisch substituierten Pkw sowie deren Jahresfahrleistung für das optimistische Szenario sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Substitution für das optimistische Szenario

Nutzungsklasse	Anzahl Pkw pro Nutzungsklasse	Substitutionsgrad	substituierte Pkw	Jahresfahrleistung pro Pkw	substituierte Jahresfahrleistung
Geschäftlich	4,9 Mio.	30%	1,5 Mio.	22.495 km	32,8 Mrd. km
Pendler, bis 10 km	7,4 Mio.	10%	0,8 Mio.	6.816 km	5,1 Mrd. km
Pendler, 10 - 25 km	7,0 Mio.	30%	2,1 Mio.	11.669 km	24,5 Mrd. km
Pendler, 25 - 50 km	2,9 Mio.	50%	1,4 Mio.	20.235 km	28,8 Mrd. km
Pendler, über 50 km	1,2 Mio.	30%	0,3 Mio.	30.742 km	10,7 Mrd. km
Privat	22,8 Mio.	10%	2,3 Mio.	11.213 km	25,5 Mrd. km

Auch bei der Bestimmung des Energiebedarfs im optimistischen Szenario dient für alle Nutzungsklassen ein Verbrauch von 20 kWh auf 100 km als Basis. Durch die deutlich größere Anzahl der substituierten Pkw und der daraus resultierenden größeren Jahresfahrleistung, die elektrisch zurückgelegt wird, ist auch der Energiebedarf dieses Szenarios fast acht mal so groß wie der des zuvor betrachteten Szenarios und beträgt 25,5 GWh. Der Energiebedarf der einzelnen Nutzungsklassen ist in **Tabelle 6-6** aufgeführt. Mit 13,8 GWh wird mehr als die Hälfte der Energie von den vier

Entfernungsklassen der Pendler verbraucht. 6,6 GWh entfallen auf die geschäftlich genutzten, 5,1 GWh auf die privat genutzten Pkw.

Tabelle 6-6: *Energiebedarf der Nutzungsklassen im optimistischen Szenario*

Nutzungsklasse	Energieverbrauch	Energiebedarf
Geschäftlich	20 kWh / 100 km	6,6 GWh
Pendler, bis 10 km	20 kWh / 100 km	1,0 GWh
Pendler, 10 - 25 km	20 kWh / 100 km	4,9 GWh
Pendler, 25 - 50 km	20 kWh / 100 km	5,8 GWh
Pendler, über 50 km	20 kWh / 100 km	2,1 GWh
Privat	20 kWh / 100 km	5,1 GWh

Zusammenfassung der Ergebnisse

Es sollen die Ergebnisse der beiden Szenarien gegenübergestellt werden. Dazu ist in **Abbildung 6-6** die Anzahl der substituierten Pkw für beide Szenarien dargestellt. Insgesamt werden im optimistischen Szenario fast zehnmal so viele Pkw ersetzt wie im pessimistischen. Dies liegt vor allem an den hier ersetzten privaten Pkw, die den größten Anteil der substituierten Pkw im zweiten Szenario darstellen. Für die Pendlerklassen, in denen in beiden Szenarien Pkw ersetzt werden, haben sich die Substitutionsgrade verzehnfacht. Da beiden Substitutionen der gleiche Pkw-Bestand zu Grunde liegt, sind die Substitutionsgrade und ersetzte Pkw proportional zueinander.

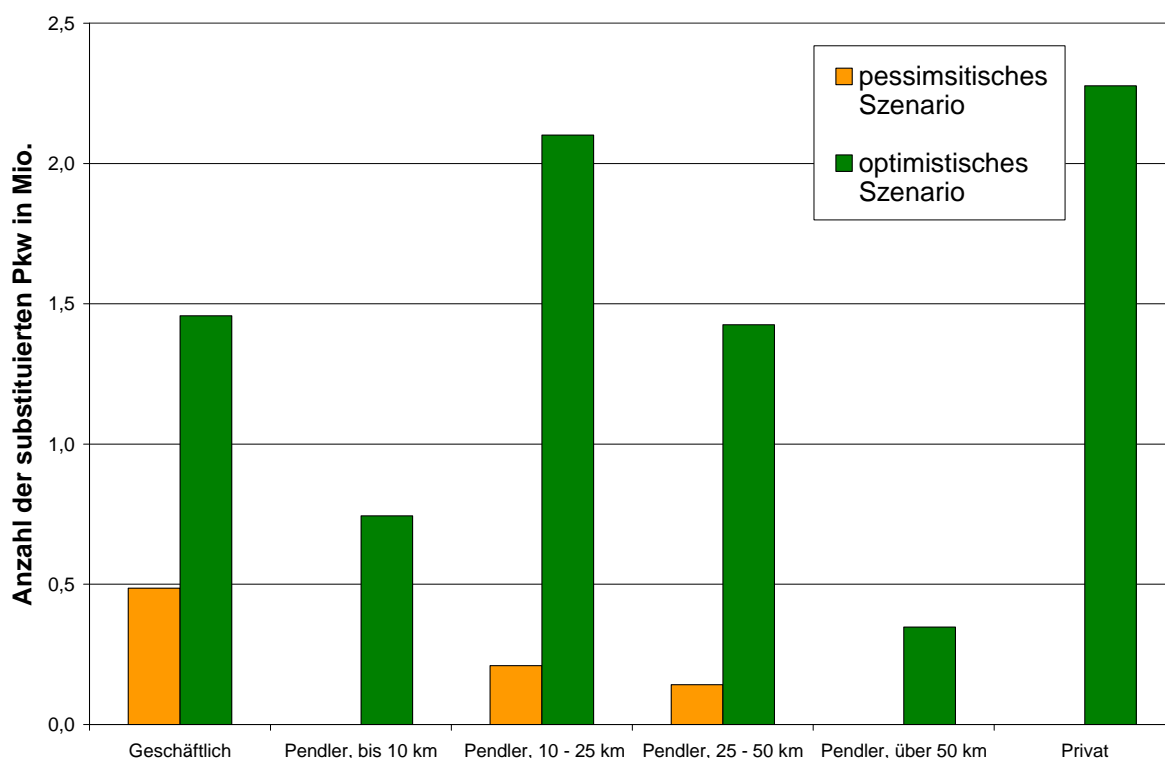


Abbildung 6-6: *Anzahl substituiertes Pkw in beiden Szenarien*

Auch die Jahresfahrleistungen der beiden Szenarien unterscheiden sich deutlich, wie **Abbildung 6-7** zu entnehmen ist. Während im pessimistischen Szenario nach der Substitution lediglich 16 Mrd. km elektrisch zurückgelegt werden, sind es im optimistischen 100 Mrd. km mehr, somit liegt eine Verachtfachung der substituierten Jahresfahrleistung vor. Dass hier nicht wie bei der Anzahl der Pkw eine Verzehnfachung vorliegt, beruht auf den unterschiedlichen Jahresfahrleistungen der Pkw für die verschiedenen Nutzungsklassen. Im pessimistischen Szenario wird der Großteil der Pkw in der Nutzungsklasse der geschäftlich genutzten Fahrzeuge ersetzt. Diese Nutzungsklasse weist mit Abstand die größte Jahresfahrleistung auf (Vgl. Tabelle 6-1). Im optimistischen Szenario hingegen werden mehr Pkw ersetzt, die eine geringe Jahresfahrleistung pro Pkw aufweisen. Deshalb werden im pessimistischen Szenario pro Pkw mehr Kilometer zurückgelegt als im optimistischen.

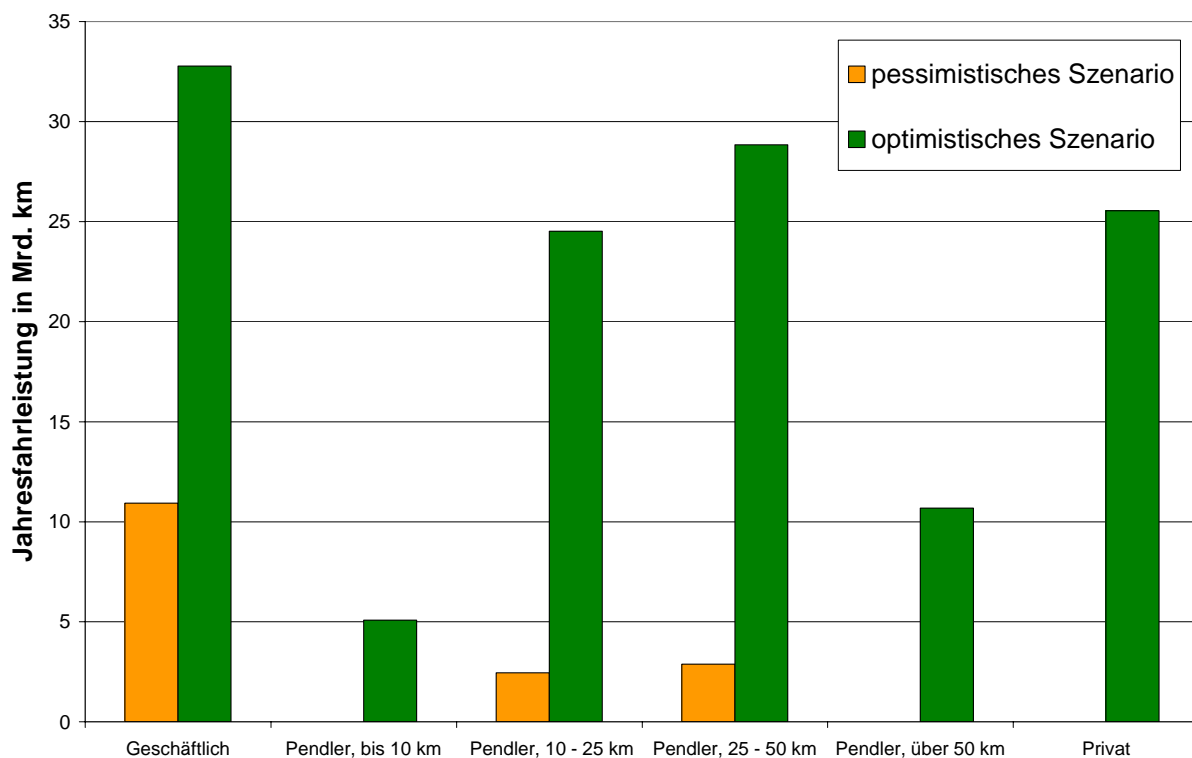


Abbildung 6-7: substituierte Jahresfahrleistung je Nutzungsklasse für beide Szenarien

Aus der Jahresfahrleistung lässt sich über den durchschnittlichen Verbrauch der Energiebedarf bestimmen. Da dieser auf der Jahresfahrleistung beruht, liegt wiederum eine Verachtfachung des Energiebedarfs vom pessimistischen zum optimistischen Szenario vor. Für die 800.000 substituierten Pkw im pessimistischen Szenario wird eine Energiemenge von 3,3 GWh im Jahr benötigt, bei den 8,4 Mio. ersetzten Pkw des optimistischen Szenarios sind es 25,5 GWh pro Jahr. Die Energieverbräuche der Nutzungsklassen sind in **Abbildung 6-8** für die beiden Szenarien gegenübergestellt.

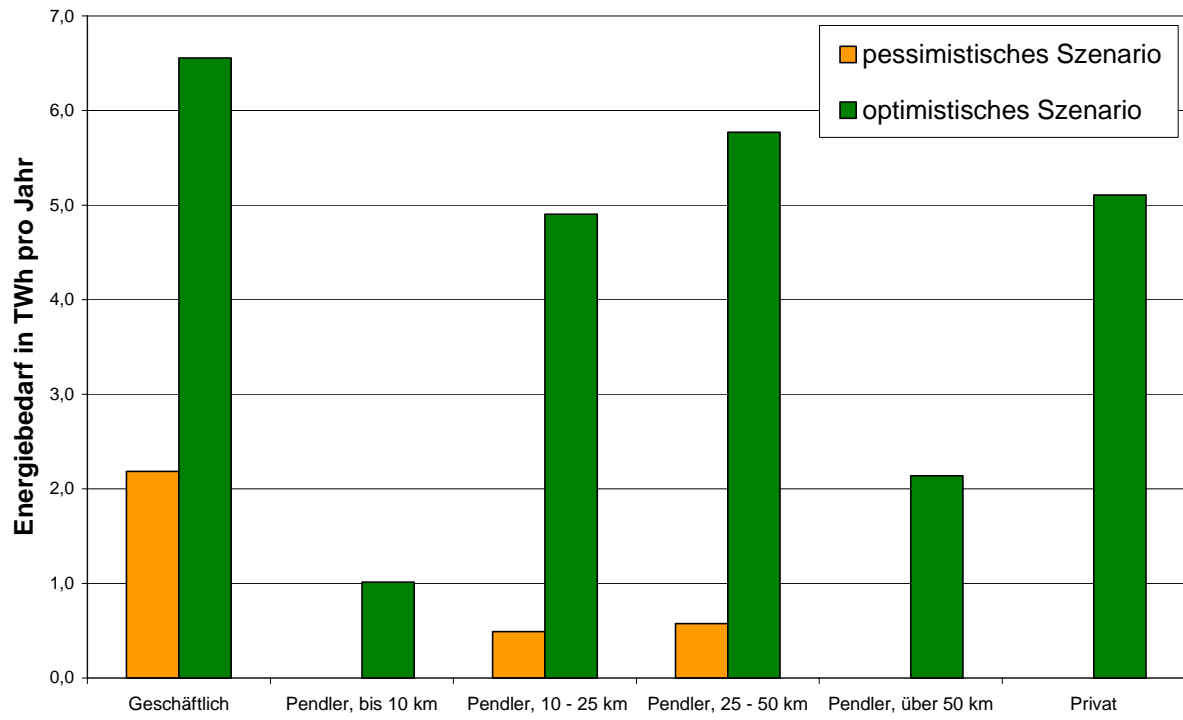


Abbildung 6-8: Energiebedarf durch Elektrostraßenfahrzeuge in beiden Szenarien

7 Lastgangsynthese

7.1 Verkehrslast

Ausgehend von dem Wochengang des Pkw-Verkehrs nach Abbildung 4-3 soll der Lastgang der Energienachfrage, die durch Elektrostraßenfahrzeuge verursacht wird, bestimmt werden.

Es wird die Annahme getroffen, dass der Verkehr der Kernwoche vom Verlauf und der Pkw-Belastung her identisch ist. Deshalb wird ein durchschnittlicher Tag ermittelt, der für alle vier Tage der Kernwoche angesetzt wird. Dadurch ergibt sich der Lastgang in **Abbildung 7-1**, der als Grundlage für die folgenden Berechnungen dient.

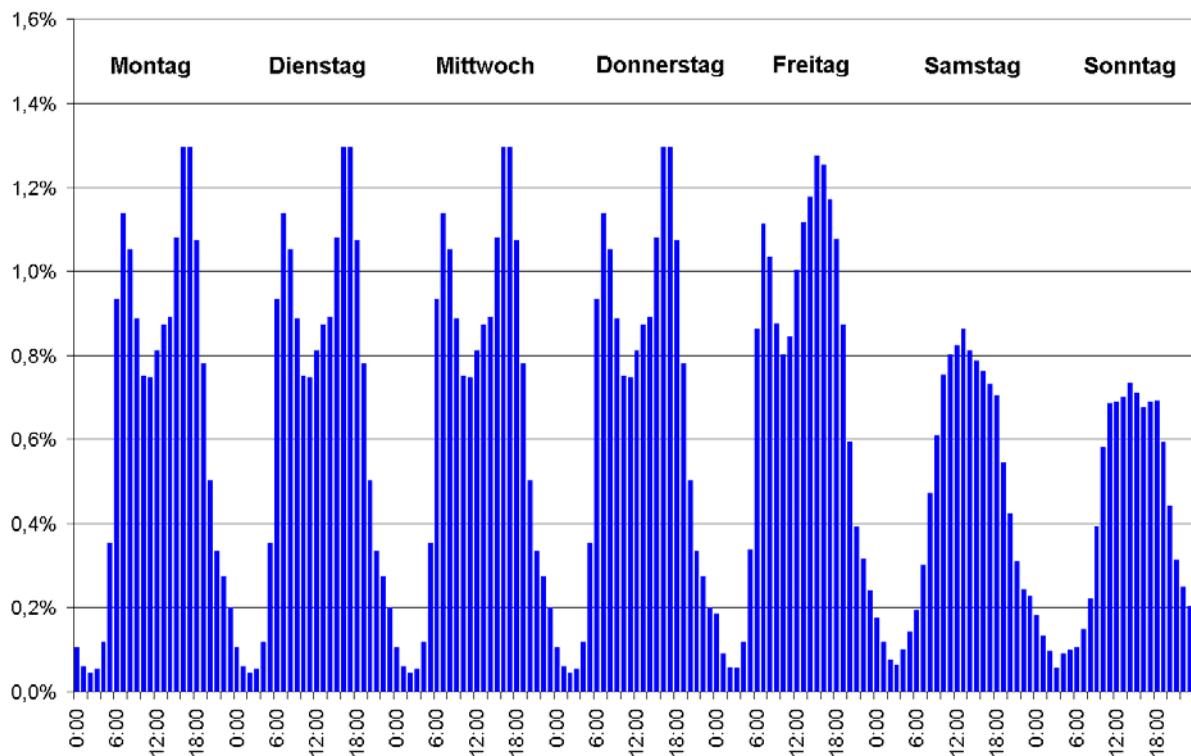


Abbildung 7-1: *Wochengang des Pkw-Verkehrs in Prozent des Wochenverkehrs nach /LSV 05/*

Um den Wochengang in die sechs Nutzungsklassen einzuteilen, wird zunächst die Grundlast bestimmt, die in **Abbildung 7-2** dargestellt ist. Sie stellt den Privatverkehr der Arbeitswoche dar. In den Nachtstunden entspricht die Grundlast dem Verkehr der Kernwoche, während der Tagesstunden dem Sonntagsverkehr.

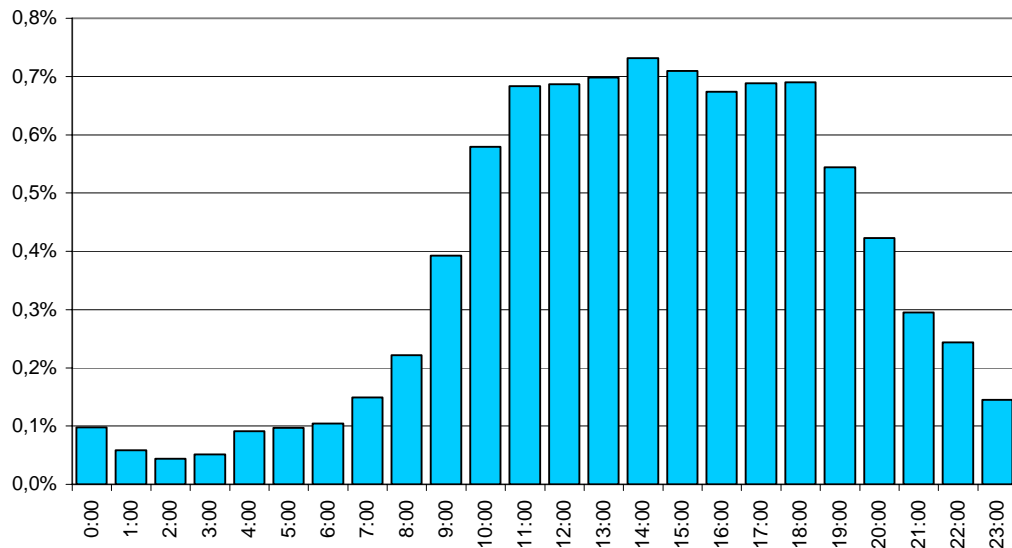


Abbildung 7-2: Grundlast des Verkehrs

Zieht man die Grundlast nun vom Verkehrsgang jeden Tages der Woche ab, so erhält man die Aufteilung in Grundlast und Differenzverkehr. Letzteres ist der Verkehr, der mit der Grundlast zusammen den Wochengang ergibt. Die Aufteilung ist in **Abbildung 7-3** dargestellt.

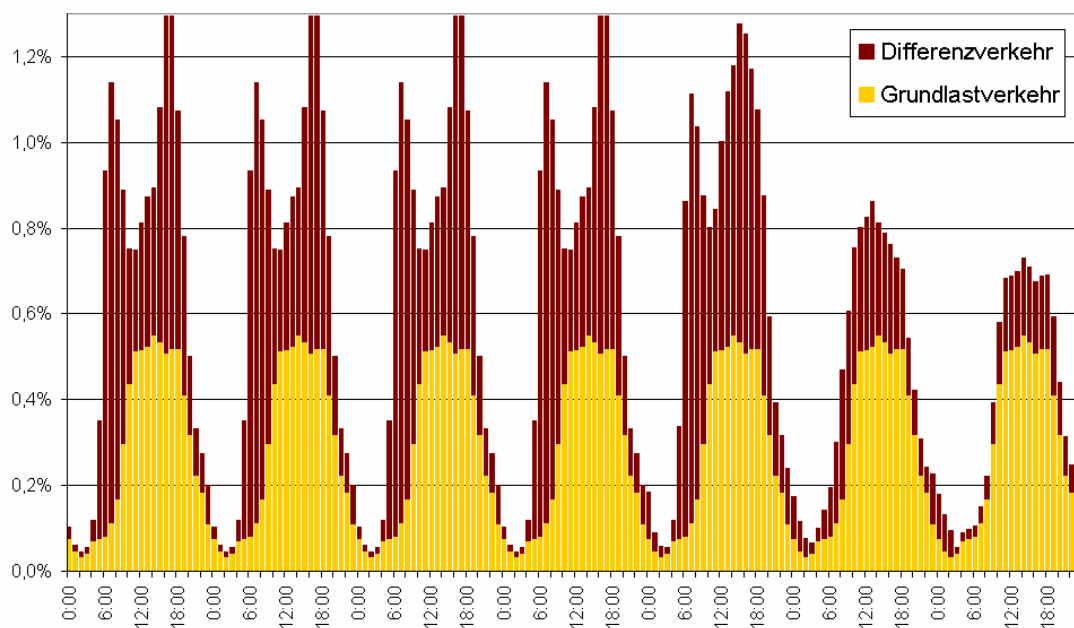


Abbildung 7-3: Aufteilung des Wochengangs in Grundlast und Differenzverkehr

Da der Verkehr am Wochenende ausschließlich aus Privatverkehr besteht, entspricht auch der Differenzverkehr des Wochenendes dem Privatverkehr. In der Arbeitswoche wird der Differenzverkehr auf Geschäft und Pendler verteilt.

Dazu wird zunächst bestimmt, welcher Anteil des Differenzverkehrs dem Geschäftsverkehr entspricht. Es werden in /ViZ 06/ die Personen-km des motorisierten Individualverkehrs für die Wegzwecke Beruf und Ausbildung und Geschäft für das Jahr 2004 betrachtet. Demnach besteht der Differenzverkehr zu 62 % aus Pendler- und zu 38 % aus Geschäftsverkehr. Es ist jedoch zu beachten, dass der Geschäftsverkehr nur während 74 Stunden pro Woche vorhanden ist: Montag bis Donnerstag von 05:00 bis 20:00 Uhr und Freitag von 05:00 bis 19:00 Uhr. Es entfallen also 38 % des Verkehrs während der Arbeitswoche auf diese Geschäftszeiten. Der Verkehr wird auf die Intervalle gleichverteilt, so dass in jeder der 74 Stunden ein Geschäftsverkehr vorhanden ist, der 0,23 % des Wochenverkehrs entspricht. Der restliche Differenzverkehr entspricht dann dem Pendlerverkehr.

Beim Freitag muss berücksichtigt werden, dass ein erhöhter Freizeitverkehr vorhanden ist. Der Geschäftsverkehr, der in der Kernwoche zwischen 19:00 und 20:00 Uhr auftritt, entspricht dann dem Privatverkehr.

Der Wochengang mit der Aufteilung in die drei Gruppen ist in **Abbildung 7-4** dargestellt.

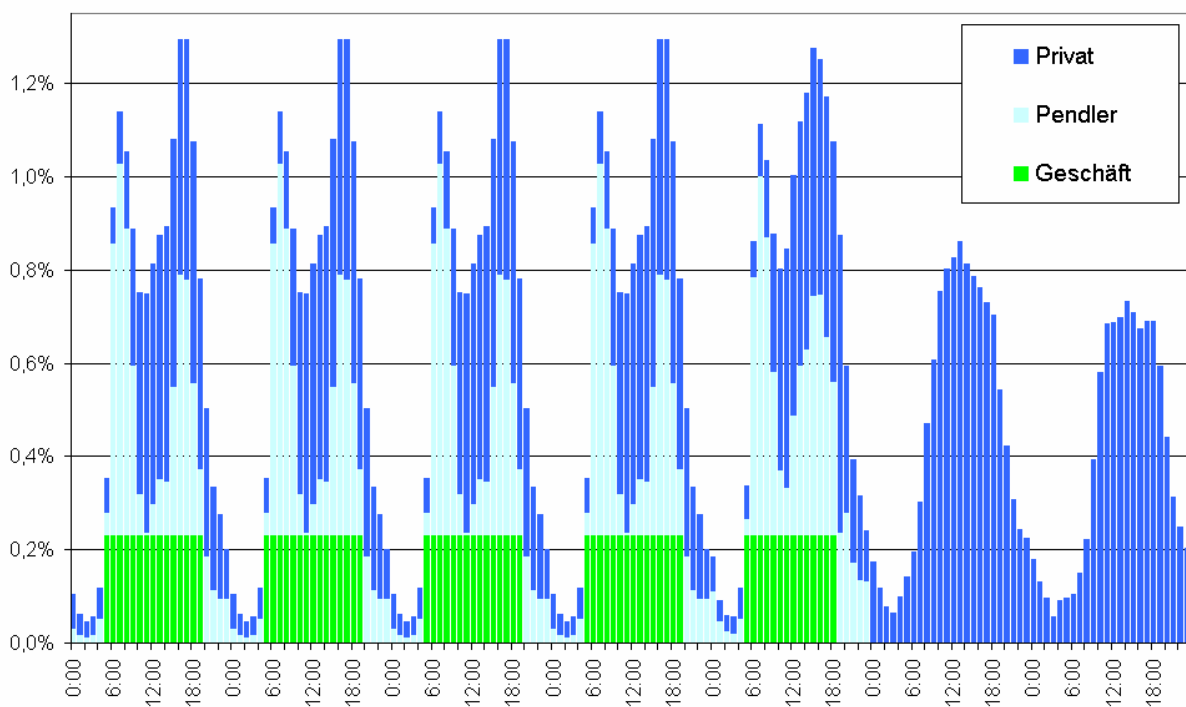


Abbildung 7-4: Aufteilung des Wochengangs in Geschäfts-, Pendler- und Privatverkehr

Wie bei der Bestimmung des technischen Potenzials soll auch hier eine Aufteilung in die sechs Nutzungsklassen vorgenommen werden. Dazu wird der Pendlerverkehr auf die vier Entfernungsklassen verteilt. Die Ergebnisse des technischen Potenzials werden hierfür herangezogen. Es wird Anzahl der Pkw zugrunde gelegt, die Tabelle 6-1 zu entnehmen ist. Aus dieser lässt sich bestimmen, welcher Anteil des Verkehrs von einer Entfernungsklasse verursacht wird. Dabei wird die Anzahl der Pkw und nicht die von

ihnen zurückgelegten Kilometer berücksichtigt, da, wie bereits in 4.2 erwähnt, die Zählung in einem Intervall bedeutet, dass der Pkw die Fahrt angetreten hat.

Um die Aufteilung der drei Gruppen in die Aufteilung der sechs Nutzungsklassen zu überführen, werden die Pendler den vier Entfernungsklassen zugeordnet. Dazu werden die Ergebnisse der Ermittlung des technischen Potenzials herangezogen. Aus Tabelle 6-1 wird die Verteilung der Pendler in die Entfernungsklassen bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-1** dargestellt. Mit 40 % legen die meisten Fahrzeuge eine Strecke von weniger als 10 km zurück. 38 % der Pendler bewältigen eine Entfernung zwischen 10 und 25 km, 15 % eine zwischen 25 und 50 km. Lediglich 6% der Fahrzeuge müssen weiter als 50 km pendeln.

Tabelle 7-1: *Anteile der Pendler-Pkw an den Entfernungsklassen*

Entfernungsklasse	Anteil der Pendlerfahrzeuge
Bis 10 km	40 %
10 bis 25 km	38 %
25 bis 50 km	15 %
Mehr als 50 km	6 %

Wird der Pendlerverkehr der Arbeitswoche mit diesen Anteilen aufgeteilt, so ergibt sich der Arbeitswochengang für Pendler in **Abbildung 7-5**.

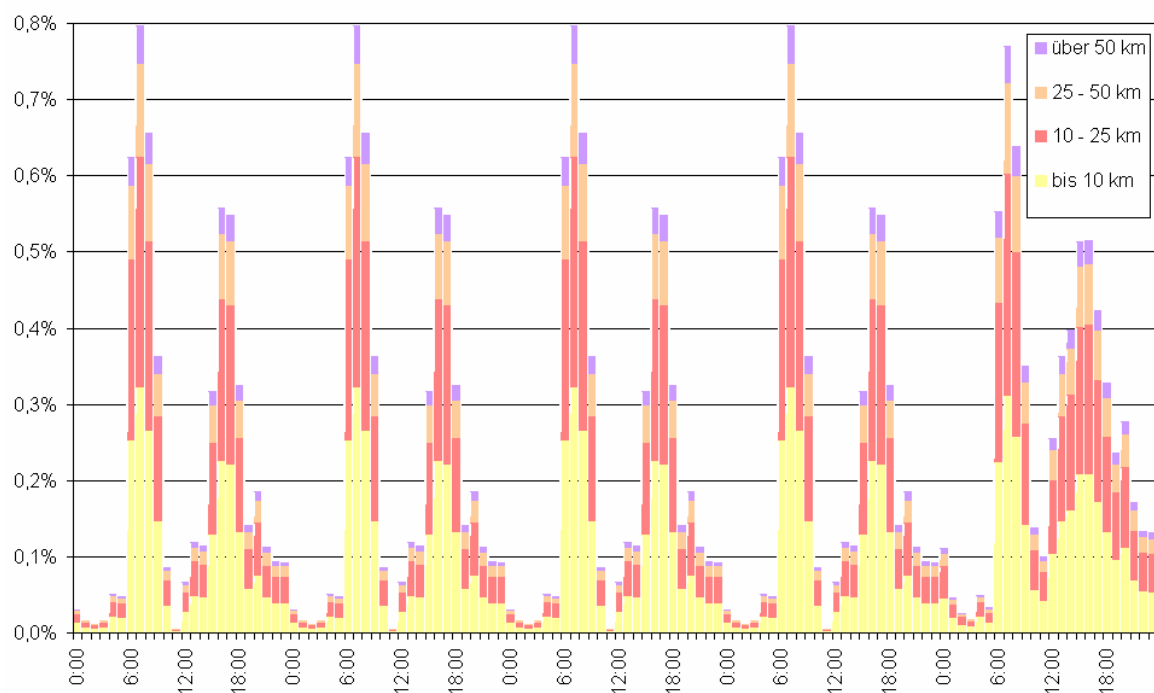


Abbildung 7-5: *Aufteilung des Pendlerverkehrs auf die vier Entfernungsklassen*

Da es sich bei den Angaben um Anteile am Wochenverkehr handelt, ist es notwendig, diese in Kilometerangaben zu überführen. Dazu werden erneut die Ergebnisse aus 6.1 herangezogen. Die substituierten Jahresfahrleistungen der einzelnen Nutzungsklassen

werden für beide Szenarien zunächst in Wochenfahrleistungen umgerechnet, die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-2** zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass bei den Pendlerklassen nur die klassenbezogene Nutzung bedacht wird. Die Fremdnutzung wird nicht bei den Pendler-, sondern bei den Privatfahrzeugen berücksichtigt, da diese Kilometer für private Zwecke zurückgelegt werden. Die Wochenfahrleistung wird in den Wochengang überführt, so dass bekannt ist, wie viele Kilometer in einer Stunde zurückgelegt werden.

Tabelle 7-2: *Jahres- und Wochenfahrleistung der elektrisch substituierten Pkw für beide Szenarien und die sechs Nutzungsklassen*

Nutzungsklasse	pessimistisches Szenario		optimistisches Szenario	
	Jahresfahrleistung in Mrd. km	Wochenfahrleistung in Mrd. km	Jahresfahrleistung in Mrd. km	Wochenfahrleistung in Mrd. km
Geschäft	10,93	0,21	32,78	0,63
Pendler, bis 10 km	0	0	1,45	0,028
Pendler, 10-25 km	2,45	0,027	14,28	0,27
Pendler, 25- 50 km	2,88	0,046	24,21	0,46
Pendler, über 50 km	0	0	10,12	0,19
Privat	0	0	44,61	0,86
Summe	14,78	0,28	127,44	2,44

Für die Erstellung eines Lastgangs ist die Aufteilung in Stundenintervalle zu ungenau. Deshalb soll ein Stundenintervall in zwölf 5-Minuten-Intervalle überführt werden. Der Verkehr einer Stunde wird auf die Intervalle gleichverteilt.

Aufgrund der unterschiedlichen elektrisch substituierten Jahresfahrleistungen liegen den weiteren Berechnungen für die Szenarien unterschiedliche Wochengänge zu Grunde. Der Wochengang für das pessimistische Szenario ist in **Abbildung 7-6** dargestellt, der für das optimistische in **Abbildung 7-7**.

Der Wochengang des pessimistischen Szenarios ist am Wochenende nicht vorhanden, da dieser Verkehr nur aus Privatverkehr besteht, welcher in diesem Szenario nicht substituiert wird. Deshalb setzt er sich für die Arbeitswoche aus den drei Nutzungsklassen zusammen, die überhaupt substituiert werden. Den größten Teil macht dabei der Geschäftsverkehr aus. Der Wochengang weist ein Maximum in den Morgenstunden auf, welches die 400.000 zurückgelegten Kilometer in einem Intervall knapp übersteigt.

Beim optimistischen Szenario ist stets Verkehr vorhanden. Dieser verteilt sich auf alle sechs Nutzungsklassen. Auch dieser Lastgang hat lediglich ein Maximum pro Tag in den Morgenstunden, hier werden dann jedoch etwas mehr als 3 Mio. km in einem Intervall zurückgelegt.

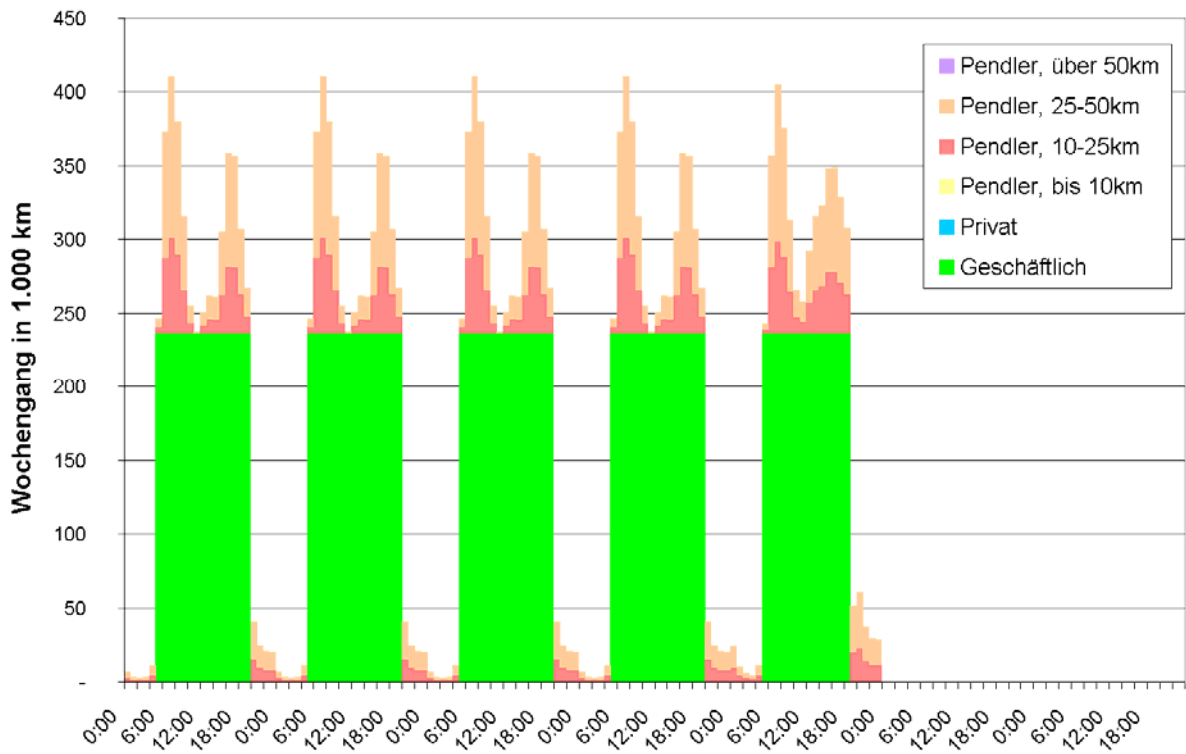


Abbildung 7-6: Wochengang des elektrisch substituierten Verkehrs im pessimistischen Szenario

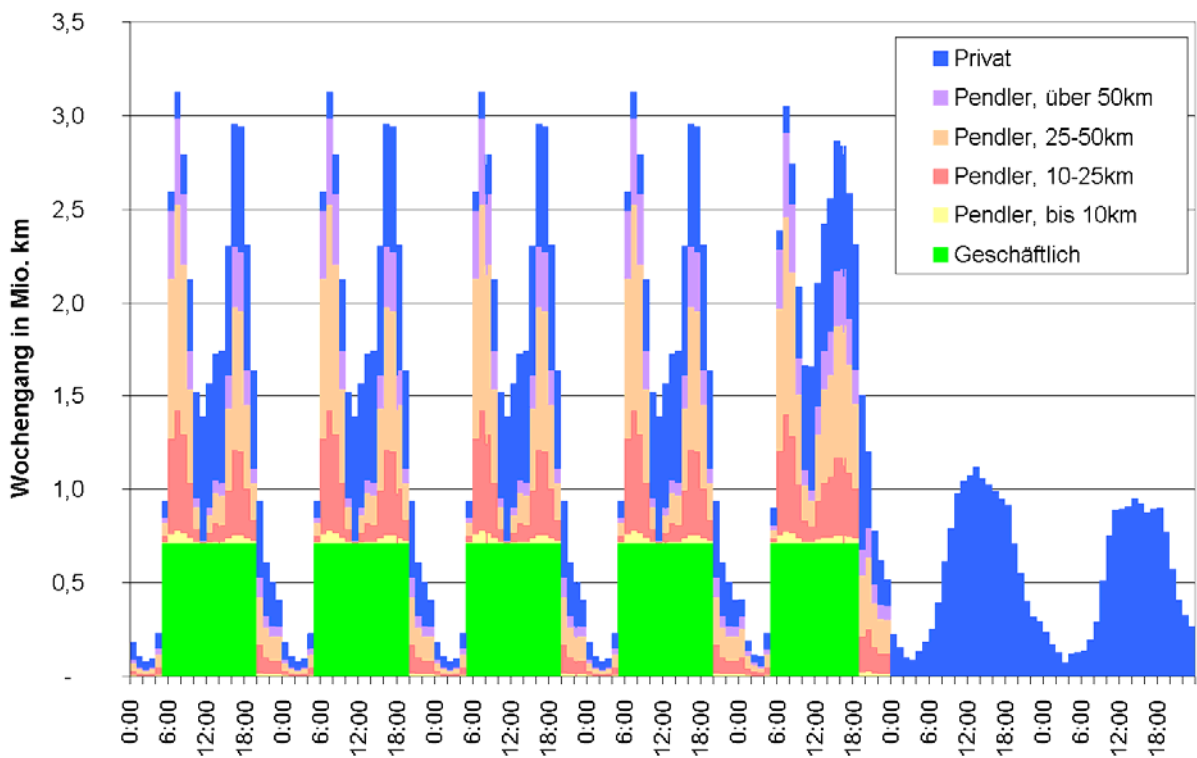


Abbildung 7-7: Wochengang des optimistischen Szenarios

7.2 Verbrauch

Mit Hilfe des Wochengangs und des durchschnittlichen Verbrauchs eines Elektrostraßenfahrzeuges nach Tabelle 3-1 lässt sich bestimmen, wie viel Energie in einem Intervall verbraucht wird. Er ist vom Verlauf her identisch zum Wochengang des Verkehrs, da in dieser Studie alle Fahrzeuge einen Verbrauch von 20 kWh auf 100 km aufweisen, unabhängig von der Nutzungsklasse.

Weiterhin muss bestimmt werden, wie viel Energie für ein Fahrzeug nach Beendigung der Fahrt benötigt wird. Wie festgelegt wurde, soll das Fahrzeug nach der Fahrt wieder voll aufgeladen werden. Deshalb kann mit dem durchschnittlichen Verbrauch aus Tabelle 3-1 und der durchschnittlichen Weglänge je Nutzungsklasse nach Tabelle 4-2 der Energiebedarf pro Fahrt bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-3** zusammengefasst.

Geschäftlich genutzte Pkw legen eine durchschnittliche Strecke von 21 km zurück und verbrauchen für diese eine Energiemenge von 4,2 kWh. Privat genutzte Pkw legen im Schnitt 13 km pro Fahrt zurück und benötigen dafür 2,6 kWh. Bei Pendlern werden wieder die durchschnittlichen Entfernungen zum Arbeitsplatz den Berechnungen zu Grunde gelegt. Somit verbrauchen Pendler bis 10 km für eine Fahrt rund 0,8 kWh. Pkw der zweiten Entfernungsklasse benötigen durchschnittlich 2,8 kWh pro Fahrt. Die Entfernungsklasse, die den höchsten Substitutionsgrad aufweist, die Pendlerklasse von 25 bis 50 km, muss eine durchschnittliche Weglänge von 35 km zurücklegen, für die eine Energie von 7,0 kWh benötigt wird. Für die durchschnittliche Weglänge von 60 km der letzten Entfernungsklasse der Pendler werden im Mittel 12 kWh Energie benötigt.

Tabelle 7-3: *Energieverbrauch pro Fahrt*

Nutzungsklasse	durchschnittliche Weglänge	durchschnittliche Verbrauch	Verbrauch für die durchschnittliche Strecke
Geschäftlich	21 km	20 kWh / 100 km	4,2 kWh
Pendler, bis 10 km	4 km	20 kWh / 100 km	0,8 kWh
Pendler, 10 - 25 km	14 km	20 kWh / 100 km	2,8 kWh
Pendler, 25 - 50 km	35 km	20 kWh / 100 km	7,0 kWh
Pendler, über 50 km	60 km	20 kWh / 100 km	12 kWh
Privat	13 km	20 kWh / 100 km	2,6 kWh

7.3 Ladeleistung

In Tabelle 5-8 sind die Leistungen der Ladevorrichtung für die sechs Nutzungsklassen zusammengefasst. Mit Hilfe dieser kann bestimmt werden, wie lang ein Fahrzeug nach der Fahrt geladen werden muss. Um die Berechnungen zu vereinfachen wird festgelegt, dass ein Pkw nur ganze 5-Minuten-Intervalle geladen wird. Um das zu realisieren wird die Ladedauer auf volle 5 Minuten verlängert. Die Ladezeiten sind für die sechs Nutzungsklassen in **Tabelle 7-4** zusammengefasst. Damit die Energiemenge konstant bleibt, wird die Ladeleistung angepasst. Die Ladeleistung ist geringer als die Leistung der Ladevorrichtung und ist in ebenfalls für die Nutzungsklassen in Tabelle 7-4 zusammengefasst.

Geschäftlich genutzte Fahrzeuge haben mit 15 kW die größte Ladeleistung der sechs Nutzungsklassen. Um nach einer Fahrt den Verbrauch von 4,2 kWh Energie wieder aufzuladen, werden bei der angegebenen Ladeleistung 20 Minuten benötigt. Dies entspricht vier 5-Minuten-Intervallen. Die tatsächliche Ladeleistung beträgt deutlich weniger als die 15 kW der Vorrichtung, da der Ladevorgang bei dieser Leistung nur knapp 17 Minuten dauern würde. Aus diesem Grund ergibt sich eine tatsächliche Ladeleistung für den 20-minütigen Ladevorgang von 12,60 kW.

Private Pkw werden an die Haushaltssteckdose mit einer Leistung von 3 kW angeschlossen. Um den durchschnittlichen Verbrauch von 2,6 kWh pro Fahrt zu decken, muss ein Fahrzeug dieser Nutzungsklasse 55 Minuten, also elf 5-Minuten-Intervalle, geladen werden. Dabei wird eine durchschnittliche Ladeleistung von 2,84 kW verwendet.

Pendlerfahrzeuge der ersten Entfernungsklasse müssen für den Energieverbrauch von 0,8 kWh 20 Minuten geladen werden. Dies entspricht vier Intervallen. Da die eigentliche Ladezeit bei 3 kW jedoch nur 16 Minuten beträgt, werden diese Fahrzeuge mit einer durchschnittlichen Leistung von 2,40 kW geladen.

Die Fahrzeuge, die eine Strecke zwischen 10 und 25 km pendeln, verbrauchen hierfür eine Energie von 2,8 kWh, so dass sie dafür bei einer Leistung von 3 kW eine Stunde, oder zwölf Intervalle, geladen werden müssen. Auch hier ist die tatsächliche Ladeleistung somit niedriger als die angegebenen 3 kW, sie beträgt 2,80 kW.

Die Fahrzeuge, mit denen zwischen 25 und 50 km gependelt wird, werden mit einer Leistung von 5 kW geladen. Um den durchschnittlichen Verbrauch von 7,0 kWh zu decken, muss das Fahrzeug 85 Minuten oder 17 Intervalle an die Ladevorrichtung angeschlossen werden. Da die tatsächliche Ladedauer aber lediglich 84 Minuten beträgt, wird nicht mit einer Leistung von 5 sondern von 4,94 kW geladen.

Die letzte Pendlerentfernungsklasse mit einer Strecke von über 50 km verbraucht durchschnittlich 12 kWh pro Fahrt. Wird auch dieses Fahrzeug mit einer Leistung von 5 kW geladen, so dauert dieser Vorgang 145 Minuten oder 29 Intervalle. Die tatsächliche Leistung des Ladevorgangs beträgt 4,97 kW.

Tabelle 7-4: *Ladedauer und tatsächliche Ladeleistung*

Nutzungsklasse	durchschnittlicher Verbrauch pro Fahrt	Leistung der Ladevorrichtung	Ladedauer	Anzahl der 5-Minuten-Intervalle	tatsächliche Ladeleistung
Geschäftlich	4,2 kWh	15 kW	20 min	4	12,60 kW
Pendler, bis 10 km	0,8 kWh	3 kW	20 min	4	2,40 kW
Pendler, 10 - 25 km	2,8 kWh	3 kW	60 min	12	2,80 kW
Pendler, 25 - 50 km	7,0 kWh	5 kW	85 min	17	4,94 kW
Pendler, über 50 km	12 kWh	5 kW	145 min	29	4,97 kW
Privat	2,6 kWh	3 kW	55 min	11	2,84 kW

7.4 Ladelastgang

In einem Intervall werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Startintervallen geladen. Die Anzahl der Intervalle, von denen Fahrzeuge in einem Intervall geladen werden, entspricht der Ladedauer in 5-Minuten-Intervallen. Aus den Wochengängen für die

beiden Szenarien, der Ladedauer und -leistung ergibt sich der Ladelastgang für Elektrostraßenfahrzeuge.

In dieser Studie wird lediglich die ungesteuerte Beladung der Fahrzeuge betrachtet. Die Fahrzeuge werden unmittelbar nach Beendigung der Fahrt beladen. Dabei beträgt der Ladezustand des Fahrzeuges stets 100 %, unabhängig davon, ob die Energie für die nächste Fahrt benötigt wird oder nicht.

Abbildung 7-8 zeigt eine Gegenüberstellung der Lastgänge der beiden Szenarien. Beim pessimistischen Szenario wird Energie für das Laden der Elektrofahrzeuge nur in der Arbeitswoche nachgefragt. Die nachgefragte Leistung übersteigt 1 GW aber aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen nicht. Der Großteil der nachgefragten Leistung entfällt auf die geschäftlich genutzten Pkw, da sie den größten Anteil der substituierten Verkehrsleistung aufweisen. Dieser Verkehr ist jedoch nur von morgens bis abends vorhanden. Er verursacht auch den „Knick“ jeden Morgen um 05:30, da dann Fahrzeuge, die ihre Fahrt um 05:00 Uhr angetreten haben, geladen werden. Der Verlauf des Ladelastgangs ähnelt dem Verlauf des Wochengangs des Verkehrs, die Spitzen, verursacht durch den Pendlerverkehr, der vor allem in den Morgen- und Abendstunden auftritt, sind lediglich zeitlich versetzt. Zwar verbraucht der Pkw während der Fahrt Energie, diese wird jedoch erst nach Beendigung der Fahrt dem Fahrzeug zugeführt.

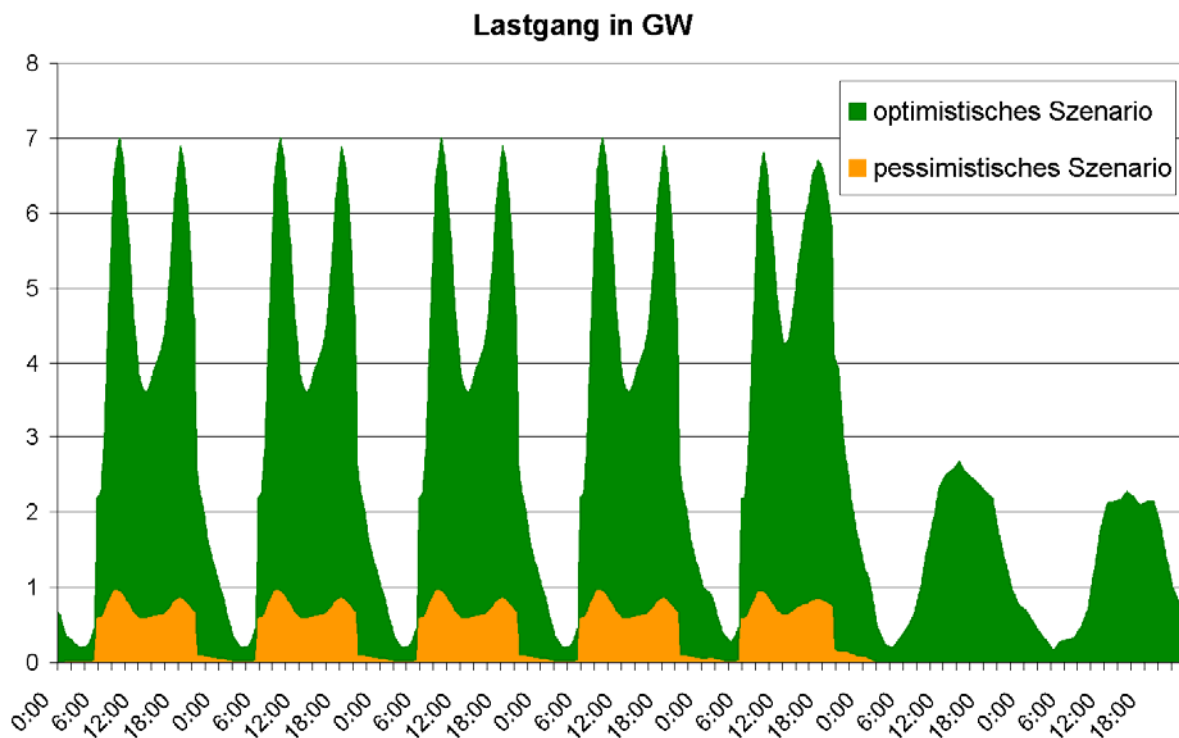


Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der Ladelastgänge im Wochenverlauf der beiden Szenarien

Beim optimistischen Lastgang ist die Spitzenleistung deutlich größer. Dies hat seine Ursache in der größeren Anzahl der substituierten Pkw und dem daraus resultierenden deutlich höheren Verbrauch von elektrischer Energie. In der Kernwoche reichen die Lastspitzen am Morgen und Abend, wenn die größten Pendlerströme auftreten, bis an

die 7 GW heran. Die Höhe der Spitzen unterscheidet sich dabei kaum. Das Minimum im Tagesverlauf liegt bei ca. 13:00 Uhr. Freitags fallen die Lastspitzen niedriger aus. Dafür fällt das Minimum deutlich schwächer aus, die nachgefragte Leistung ist dort um ca. 1 GW höher.

Am Wochenende ist der Lastgang deutlich niedriger und hat sein Maximum samstags bei 2,5 GW und sonntags bei ca. 2,2 GW. Dies liegt zum einen daran, dass der Verkehr am Wochenende deutlich niedriger ist und zum anderen daran, dass er lediglich aus Privatverkehr besteht. Da private Fahrzeuge eine geringe durchschnittliche Weglänge und somit einen geringen Energiebedarf pro Fahrt aufweisen, ist der Lastgang am Wochenende deutlich niedriger als in der Arbeitswoche.

Auch der Lastgang des optimistischen Szenarios weist um 05:30 Uhr einen „Knick“ auf, der allerdings schwächer als im zuvor betrachteten Szenario ausfällt. Dieser wird ebenfalls durch das Einsetzen des Geschäftsverkehrs verursacht.

Abbildung 7-8 ist des Weiteren zu entnehmen, dass die Lastspitzen im optimistischen Szenario viel deutlicher ausgeprägt sind. Dies hat seine Ursache darin, dass im pessimistischen Szenario hauptsächlich geschäftlich genutzte Fahrzeuge substituiert werden, die nicht den charakteristischen Verlauf mit den beiden Lastspitzen aufweisen. Lastspitzen werden lediglich von den anderen beiden substituierten Nutzungsklassen, die beide Pendlerklassen sind, angedeutet. Auch das Verhältnis der Leistungen ist in dieser Grafik gut ablesbar. Betrachtet man die Spitzen, so wird im optimistischen Szenario eine ungefähr achtmal so große Leistung nachgefragt wie im pessimistischen. In den Lasttälern zur Mittagszeit liegt dieser Faktor etwa bei sieben.

7.5 Gesamlastkurven

Es soll untersucht werden, welche Auswirkung der Ladelastgang auf das Lastprofil hat. Dazu wird eine Gesamlastkurve erstellt. Zur Ermittlung der Gesamlastkurve werden die benötigten Leistungen des Lastprofils und des Ladelastgangs aufsummiert. Es erfolgt eine Unterscheidung in die Szenarien.

Für Deutschland liegt kein Lastprofil vor. Deshalb wurde ein nach /FFE 07/ synthetisiertes Lastprofil einer Woche von Montag bis Sonntag im März betrachtet. Die deutschlandweit installierte Kraftwerksleistung betrug im Winter 2005/2006 insgesamt 119,4 GW. Da die Leistung aufgrund von nicht abrufbaren Leistungen, Ausfällen oder Revisionen nicht vollständig bereitgestellt werden kann, betrug die gesicherte Last lediglich 82,7 GW. Der bisher höchste Energiebedarf in Deutschland wurde im Dezember 2005 gemessen. Es wurde eine Leistung von 76,7 GW abgerufen. /VDN 07/

Das Lastprofil ist in 1h-Intervallen angegeben, der Ladelastgang hingegen in 5-min-Intervallen. Aus diesem Grund werden die 5-min-Intervalle in 1h-Intervalle angepasst, indem für eine Stunde der Mittelwert der zwölf Leistungswerte bestimmt wird. Der Mittelwert entspricht der durchschnittlichen Ladeleistung einer Stunde.

Zunächst wird das pessimistische Szenario betrachtet. Die Gesamlastkurve ist in **Abbildung 7-9** dargestellt.

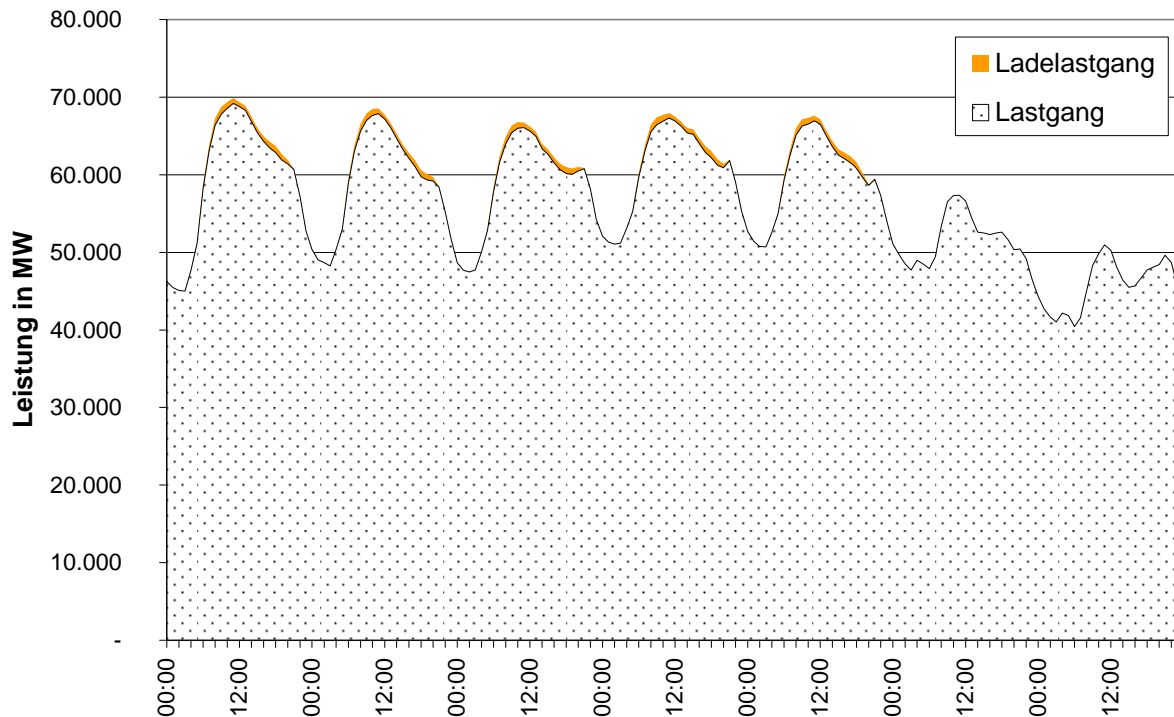


Abbildung 7-9: Gesamlastkurve des pessimistischen Szenarios

Die Ladelast des pessimistischen Szenarios hat kaum einen Einfluss auf die Gesamlastkurve. Da durch die geringe Anzahl an substituierten Pkw auch der Energiebedarf sehr gering ist, fällt die Ladelast kaum ins Gewicht. Der deutsche Kraftwerkspark kann die zusätzliche Last problemlos zur Verfügung stellen. Dies gilt auch, wenn die zusätzliche Last dann angefordert wird, wenn das Lastprofil den höchsten Leistungsbedarf aufweist. Auch mit der zusätzlichen Last durch die Elektrofahrzeuge des pessimistischen Szenarios ist die gesicherte Leistung groß genug. Die Leistung der Gesamlastkurve übersteigt die gesicherte Kapazität aller deutschen Kraftwerke von 82,7 GW nicht. Die Elektrofahrzeuge tragen im pessimistischen Szenario nur einen sehr geringen Teil zur Last bei.

Anders stellt sich dieser Zusammenhang für das optimistische Szenario dar. Die Gesamlastkurve ist in **Abbildung 7-10** dargestellt.

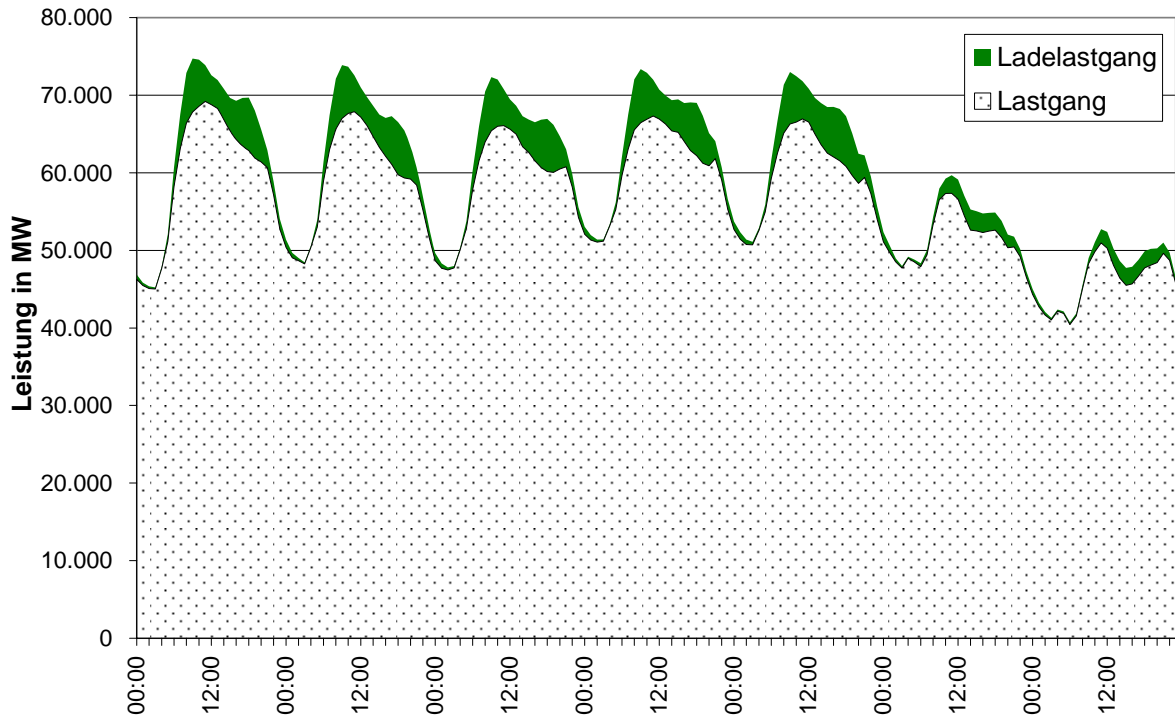


Abbildung 7-10: Gesamtlastkurve des optimistischen Szenarios

Im optimistischen Szenario trägt die Ladelast einen deutlich größeren Teil zur Gesamtlast bei. Zwar beträgt diese immer noch nur einen Bruchteil des Gesamtlastprofils, doch beträgt sie immerhin mit maximal ca. 7 GW etwa 10 % des Lastprofils. Auch im optimistischen Szenario kann die zusätzliche Leistung bereitgestellt werden, denn die gesicherte Last von 82,7 GW wird nicht überschritten. Tritt nun aber der Fall ein, dass die Last einen ähnlich hohen Wert wie im Dezember 2005 erreicht, so wird durch die zusätzliche Last, die durch die Ladung der Fahrzeuge auftritt, die gesicherte Last von 82,7 GW um 1 GW überschritten. Zudem trägt der Ladelastgang zu einer deutlichen Erhöhung der Maximallast bei, da sich die Zeiträume, in denen die höchsten Leistungen angefordert werden, in beiden Lastprofilen decken. Diese Lastverläufe gelten unter der Annahme „natürlicher“, d.h. ungesteuerter Ladevorgänge und verdeutlichen die Notwendigkeit eines zentralen Lastmanagements für ESF.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Handlungsempfehlungen

Technische Entwicklung

- Elektrofahrzeuge im Conversion-Design sollten nur für eine Übergangszeit in Erwägung gezogen werden, bis Elektrofahrzeuge im Purpose-Design in Serie gefertigt werden können. Langfristig stellen sie aufgrund des höheren spezifischen Verbrauchs keine ernst zu nehmende Alternative zu den konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren dar. Elektrofahrzeuge im Purpose-Design hingegen sind eine Alternative zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen.
- Ein wesentlicher Beitrag zum Durchbruch von ESF ist die Entwicklung von Energiespeichern, die auf die Anforderungen von ESF optimiert sind. Dies kann durch weitere intensive Forschungsarbeit erreicht werden. Extreme Entwicklungssprünge in der Speichertechnologie sind zwar nicht zu erwarten, allerdings ergibt sich kein wesentliches Marktpotenzial, wenn keine weitere Verbesserung der aktuellen Speichertechnik erzielt werden kann. Diese betrifft nicht nur die spezifische Energie- und Leistungsdichte der Speicher, sondern vor allem auch deren Sicherheit im mobilen Einsatz und die Lebensdauer.
- Ein ganz wesentlicher Nachteil von ESF ist die noch unzuverlässige Reichweitenabschätzung. Bis heute existieren keine serienreifen Verfahren, die die Abschätzung der Restenergiemenge im Speicher zuverlässig ermöglichen. Hier ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.
- Soll eine rasche Marktdurchdringung von ESF sowie evtl. auch in Plug-In-Hybridfahrzeugen möglich sein, so ist der Aufbau einer Tankstellen-Infrastruktur notwendig, die das schnelle Nachladen unterwegs ermöglichen. Eine breite Akzeptanz in der mobilen Bevölkerung ist nur durch Schnellladestationen zu erreichen, die im Notfall eine kurzfristige Reichweitenverlängerung ermöglichen. Sollte sich ein Fahrzeugkonzept etablieren, das auf Aufladung durch Batteriewechsel beruht, ist die Einrichtung von Batterie-Wechselstationen notwendig.

Förderinitiativen

- Politische Zielsetzungen sowie Gesetze und Regelungen, die die Einführung von ESF begünstigen (Steuervergünstigungen)
- Anfängliche Subventionen zur schnelleren Marktdurchdringung
- Interesse der Industrie wecken, als Leasingbetreiber von ESF zu agieren

Öffentlichkeitsarbeit

- Interesse am Hybridauto für ESF nutzen
- Vorteile gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen darlegen (geringere technische Probleme, schon heute realisierbar)

- Allgemeine Vorteile gegenüber verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen aufzeigen (geringerer Verbrauch)
- Nachteile offen diskutieren und relativieren (Reichweitenbeschränkung ist nicht wirklich problematisch) sowie Lösungen aufzeigen

8.2 Ausblick

Für weitere Untersuchungen werden folgende Punkte empfohlen:

Einbindung der Industrie

In einer weiteren Betrachtung der elektrizitätswirtschaftlichen Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen sollte eine differenzierte Betrachtung des spezifischen Verbrauchs bezüglich des Nutzungsprofils durchgeführt werden. So ist zu erwarten, dass ein Pkw, der vorwiegend für innerstädtische Fahrten verwendet wird, weniger Energie für die gleiche Strecke benötigt als ein Fahrzeug, das überwiegend für Überlandfahrten eingesetzt wird. Bei einem mit Verbrennungsmotor angetriebenem Fahrzeug ist der Verbrauch im Stadtverkehr im Gegensatz zum ESF höher als im Überlandverkehr. Die durch das rekuperative Bremsen zurückgewonnene Energie senkt den Verbrauch. Bei Überlandfahrten kommt es kaum zu einem Aufladen der Batterie. Hier ist der höhere Verbrauch im Wesentlichen auf den erhöhten Luftwiderstand aufgrund höherer Geschwindigkeiten zurückzuführen. Für jede Nutzungsklasse sollte daher ein Fahrprofil erstellt werden, anhand dessen der Verbrauch des Fahrzeuges für eine durchschnittliche Fahrt ermittelt wird. Mit einem nach Nutzungsklassen aufgeschlüsseltem Verbrauch lassen sich der Energiebedarf und vor allem der Ladelastgang besser und realitätsgetreuer wiedergeben. Dies sollte in Absprache mit Fahrzeug-Herstellern erfolgen.

Gesteuerte Beladung

Durch gesteuerte Ladevorgänge von ESF ist es möglich, wesentliche Anteile der durch ESF verursachten Lastanteile in Schwachlastzeiten zu verlagern. So ist problemlos möglich, dass Pendlerfahrzeuge die Ladung nach der Heimfahrt erst im nächtlichen Lasttal beginnen. Außerdem ist es durchaus denkbar, dass die Ladung zwischen Fahrt zur Arbeit und Fahrt von der Arbeit nach Hause nicht unbedingt in diesem Zeitfenster stattfinden muss, wenn die Restladung für die gesamte Heimreise ausreichend ist. Es gilt zu untersuchen, inwieweit solche gesteuerten Ladevorgänge technisch sowie energiewirtschaftlich zu implementieren sind. Dazu sind allerdings detaillierte Kenntnisse über die Verkehrslastgänge notwendig.

Regelleistung

Durch die Liberalisierung der Energiemärkte hat sich der noch junge Markt für Regelleistung entwickelt. Die aktuelle Erleichterung der Zugangsbedingungen sowie die vergleichsweise hohen Preise machen diesen Markt für jeden interessant, der über regelbare Kapazitäten verfügt. Hierbei ist insbesondere der Einsatz von Speichern attraktiv, da hier die Möglichkeit besteht positive und negative Regelleistung anzubieten. Pumpspeicherkraftwerke bieten bereits im großtechnischen Maßstab Regelleistung an. Eine mögliche große Anzahl von Batteriespeichern durch eine hohe

Marktdurchdringung von Elektrostraßenfahrzeugen könnte diese neue Form der Bereitstellung von Regelleistung mit diesen Batterien ermöglichen und somit einen weiteren Deckungsbeitrag liefern.

Umweltpolitischer Beitrag

Der Klimawandel wird in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Die von der Bundesregierung gesetzten Ziele zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Individualverkehr sind mit aktueller Technik und dem bestehenden Kraftwerkspark in Deutschland prinzipiell bereits heute zu erreichen. Es gilt zu untersuchen, welchen Gesamtbeitrag Elektrostraßenfahrzeuge an der CO₂-Reduktion leisten können.

9 Literaturverzeichnis

- /DGES 99/ Deutsche Gesellschaft für Straßenfahrzeuge: Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven; DGES Fachtagung in Karlsruhe, 1999
- /DGES 07/ Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge e.V.; Nachhaltige Mobilität – Hybrid und Brennstoffzellenantriebe; DGES-Fachtagung in Berlin 28. und 29. Juni 2007
- /DGS 07/ Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. Bundesverband Solare Mobilität e.V., Tomi Engel; Plug-In-Hybrids, Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr, 1. Auflage, 09/2007, Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-89963-327-6
- /DÜS 03/ Kordon- bzw. Pegelzählungen Düsseldorf 2003
- /FFE 97/ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. "Untersuchung eines Golf CitySTROMer“, M. Schwärzer, W. Schön, H. Bauer, R. Wabro. 1997
- /FFE 07/ Ganzheitliche dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie, November 2007
- /GRÜ 07/ http://www.gruene-bundestag.de/cms/publikationen/dokbin/187/187655.energie_2_0_die_gruenen_massnahmen_bis_2.pdf; Stand, 22.11.2007
- /HEA 4273/ <http://www.heise.de/autos/artikel/s/4273>; Stand 06.09.2007
- /HYB 07/ <http://www.hybrid-autos.info>; Stand 24.07.2007
- /ISEA 07/ <http://www.isea.rwth-aachen.de/isea2/forschung/batterien/technologie.php>; Stand 21.11.2007
- /IFE 07/ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, „Vorlesung Elektrische Straßenfahrzeuge“, Sommersemester 07.
- /LSV 05/ Landesbetrieb Straßen und Verkehr Rheinland- Pfalz, Bericht zum Ausbau der A 634 AD Mainz bis Schiersteiner Kreuz, Koblenz Dezember 2005
- /LIN 01/ Linden, David; Reddy, Thomas B.: Handbook of Batteries, McGraw-Hill, Third Edition, 2001
- /LEX 07/ http://www.lexus.de/Images/RX_prospekt_tcm238-497917.pdf; Stand 13.04.2007
- /LuAiD Tab/ Statistisches Bundesamt, Leben und Arbeiten in Deutschland, Tabellenanhang
- /LuAiD/ Statistisches Bundesamt, Leben und Arbeiten in Deutschland, Ergebnisse Mikrozensus 2004
- /MID 02/ Mobilität in Deutschland 2002, Tabellenband
- /PAN 06/ <http://www.panasonic.com/industrial/battery/>; Stand 20.06.2006

- /RUD 97/ Rudolph, M.; Wagner, U.: Begriffe der Versorgungswirtschaft Teil D Energie Heft 1: Energiewirtschaftliche Grundbegriffe, 1. Ausgabe 1997. VWEW-Verlag Frankfurt am Main, ISBN 3-8022-0528-6
- /TOY 07/ http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/index.aspx; Stand 13.04.2007
- /ViZ 06/ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Straßenentwicklung; Verkehr in Zahlen 2006/2007
- /VW 07/ Telefonat mit Volkswagen Konzernforschung, Dr. Hazelaar am 30.10.2007
- /VDN 07/ <http://vdn-archiv.bdew.de/hoechstlast.asp>; Stand 22.11.2007
- /WAL 95/ Prof. Wallentowitz, H., Bady, R., Renner, C..(1995). „Fahrwiderstände“ für das Elektroauto – können wir sie überwinden? Vortrag Haus der Technik: Elektrofahrzeuge. München, 17.10.1995. Veröffentlichung unter <http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/index-antrieb.php>; Stand 30.10.2007
- /WEN 99/ Dr. Heinz Wenzl, Batterietechnik, Optimierung der Anwendung – Betriebsführung – Systemintegration, expert verlag, 1999
- /WIB 03/ Perspektiven einer Wasserstoffenergiewirtschaft Teil 4, Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien, wiba, 03/2003
- /WIM 06/ http://www.wima.com/DE/article_supercap.htm, 13.07.2006