



# Bachelorarbeit

## Auswirkungen der Elektromobilität auf die Niederspannungsnetze. Eine praxisorientierte Betrachtung.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Böker

Korreferent: Dipl.-Ing. Hardy Chabowski

Autor: Martin Antonius Göbel (Matrikel-Nr. 576025)

Oberdarfelder Str. 18 48720 Rosendahl



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Rosendahl, den 10. März 2011

---

Martin Antonius Göbel

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Böker von der Fachhochschule Münster für die Betreuung dieser Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei der RWE Deutschland AG für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit, diese Bachelorarbeit mit einer praxisrelevanten Thematik durchzuführen. Stellvertretend für die RWE Deutschland AG und RWE Westfalen-Weser-Ems Netzservice GmbH danke ich meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Hardy Chabowski, der mir zu jeder Zeit bei offenen Fragen beratend zur Seite stand.

Der ABB AG mit meinem Ansprechpartner Herrn Manfred Mathis bin ich für die Bereitstellung der NEPLAN-Netzberechnungssoftware zu Dank verpflichtet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2. Status Quo Elektromobilität</b>	<b>9</b>
2.1 Der Elektromotor	11
2.2 Speichertechnik	14
2.3 Fördermaßnahmen für Elektromobilität weltweit	17
2.3.1 Deutschland	17
2.3.2 USA	19
2.3.3 China	20
2.3.4 Mitsubishi i-MieV	20
2.3.5 Opel Ampera	21
2.3.6 Tesla Roadster	21
<b>3. Entwicklungspotentiale und Chancen für die Elektromobilität</b>	<b>23</b>
<b>4. Elektrische Energieversorgung und Netzbetrieb</b>	<b>27</b>
4.1 Pflichten der Netzbetreiber	29
4.2 Das Ortsnetz Kortüms Esch	29
<b>5. Untersuchung der Auswirkungen der Elektromobilität auf das NS-Netz</b>	<b>31</b>
5.1 NEPLAN	32
5.2 Die Gleichzeitigkeit als ein relevantes Element der Lastflussberechnung	37
5.3 Die elektrische Leistung für den Ladevorgang	40
5.4 Deutung des Mobilitätsverhaltens	41
<b>6. Auswertung</b>	<b>44</b>
6.1 Szenario 2020 <sub>1</sub>	44
6.2 Szenario 2020 <sub>2</sub>	46
6.3 Szenario 2030	48
6.4 Szenario 2050	51
<b>7. Zusammenfassung</b>	<b>54</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>56</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>60</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AC	alternating current (Wechselstrom)
Ah	Amperestunden
B	magnetische Flussdichte
C	Kapazität
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
DC	direct current (Gleichstrom)
E	Energie
$f$	Frequenz
h	Stunden
I	Strom
k	Anzahl Knoten im Netzwerk
$k_c$	Bedarfskoeffizient
$k_g$	Gleichzeitigkeitsgrad
kVA	Kilovoltampere
kvar	Kilovoltampere Reaktiv
kWh	Kilowattstunde
M	Drehmoment
$M_k$	Kippmoment
$M_m$	Mittleres Drehmoment
$m$	Masse
m	Meter
MWh	Megawattstunden
n	Drehfrequenz
NS	Niederspannung
p	Druck
Q	Blindleistung
R	Ohmscher Widerstand
S	Scheinleistung
sec	Sekunden
t	Zeit
U	Spannung
$U_n$	Nennspannung
V	Volt
W	Watt
Wh	Wattstunde
X	Reaktanz
Y	Scheinleitwert
Z	Impedanz
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$\Omega$	Ohm
$\eta$	Wirkungsgrad

## 1. Einleitung

Der Beginn des Zeitalters der Elektromobilität im Jahre 1881 ist gleichzeitig auch als Anfang ständiger Innovationen zu verstehen.

Nachdem Werner von Siemens im Jahre 1866 das dynamoelektrische Prinzip entwickelte und Camille A. Faure sowie Volkmar im Jahr 1881 den ersten Blei-Blei-Akkumulator vorstellten, machte Gustave Trouve noch im selben Jahr seine Probefahrt auf seinem Elektro-Dreiradwagen durch Paris [1]. Doch die Kapazität der Akkumulatoren war sehr gering. Ferdinand Porsche hatte die Idee, den elektrischen Strom im Fahrzeug mit Hilfe eines Generators zu erzeugen, der durch einen Benzinmotor angetrieben wurde. Der Generator übertrug den Strom an den Elektromotor und machte die schwere Batterie überflüssig. Mit dem Porsche „Type-mixte“ war im Jahr 1901 ein neues Antriebskonzept, der Hybridantrieb, geboren. In Amerika setzte Henry Ford aber auf den Verbrennungsmotor und leitete die Wende in der Automobilentwicklung ein. Während des zweiten Weltkriegs von 1939-1945 und der Ölkrise im Jahr 1973 war das Elektroauto aufgrund von hohen Ölpreisen und der Abhängigkeit von Ölimporten eine interessante Alternative [1].

Im letzten Jahrzehnt wurden die öffentliche Diskussion und die Wahrnehmung der erdölgetriebenen Mobilität intensiv bestimmt durch das Bewusstsein für den Klimawandel. Zudem führen schwankende und tendenziell steigende Erdölpreise, das Wissen um immer knapper werdende Ölreserven und das politisch motivierte Streben nach größerer Unabhängigkeit von Erdöl exportierenden Staaten zu einer breiten Akzeptanz für alternative Fortbewegung. In den Industrienationen, deren Mobilität lange Zeit wie selbstverständlich auf Erdöl basierte, kommt es zu einem gesellschaftlichen Wandel, der traditionelle Strukturen infrage stellt. Es wird verständlich, dass die individuelle Mobilität effizienter und emissionsfrei werden muss. Hier zeigen Elektromotoren deutliche Vorteile. Reicht ihr Wirkungsgrad an die 100 % heran, kommen Diesel- auf 40 % und Benzinmotoren auf gerade einmal 30 % dieses Wertes [2].

Allein durch die Optimierung der Diesel- und Benzinmotoren kann die Automobilbranche die nationalstaatlichen und europaweiten Verpflichtungen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion nicht erfüllen [3 S. 973]. Es kommt zu einem Paradigmenwechsel und die Automobilindustrie steht vor grundlegenden Veränderungen. Die traditionellen Wertschöpfungsketten werden sich verschieben und neue Marktteilnehmer werden die Mobilität als Geschäftsfeld erkennen. Insbesondere werden die Energieversorgungsunternehmen zum Anbieter des „Treibstoffs“ für eine zunehmend mobilere Gesellschaft werden [4 S. 93].

Ein entscheidender Vorteil der Elektromobilität liegt im Vergleich z.B. zum Wasserstoffauto in der bereits vorhandenen Infrastruktur. Die elektrische Energie, die für das Laden der Akkumulatoren des Fahrzeugs benötigt wird, kann aus dem bereits flächendeckend bestehenden Stromversorgungsnetz bezogen werden. Die Möglichkeit hierzu befindet sich in jedem herkömmlichen Haushalt in der Bundesrepublik Deutschland.

Als Wegbereiter dieses neuen Mobilitätskonzeptes stellt sich die RWE AG heraus, welche schon heute Produkte zum Umstieg auf die Elektromobilität anbietet. Zudem gründete RWE mit dem Automobilkonzern Daimler eine Kooperation, um mit Hilfe eines Pilotprojektes in Berlin das neue Mobilitätskonzept zu erproben. Hierzu errichtete die RWE in Berlin 500 Ladesäulen.

Weltweit wird die Elektromobilität mit Milliardenbeträgen gefördert. Selbst in Deutschland treibt die Politik die Entwicklung mit über einer halben Milliarde Euro an Fördermitteln voran. Es wird versucht, der Elektromobilität schnellstmöglich zum Durchbruch zu verhelfen und ihre Verbreitung zu unterstützen.

Aus Sicht der Netzbetreiber ergeben sich mit der aufkommenden Elektromobilität neue Fragestellungen. Die Elektrofahrzeuge, die ihre Energie aus dem Versorgungsnetz beziehen, stellen eine neue Verbrauchergruppe dar, für die bisher keine Erfahrungswerte vorliegen. Dennoch ist hier eine nähere Betrachtung dieser Veränderung notwendig.

Die Daten bzgl. der Energiemenge und vor allem die Leistung, die zur Ladung der Batterien verwendet wird, zeigen, dass insbesondere für eine hohe Durchdringung der Elektromobilität frühzeitige Untersuchungen im Hinblick auf die Auswirkungen dieser neuen Entnahmestellen durchgeführt werden sollten.

Es ist durchaus denkbar, dass durch die Umstellung der individuellen Mobilität ein Netzausbau nötig wird, der meist sehr aufwendig ist und hohe monetäre Mittel bindet. Weitere Folgen könnten sein, dass sich der übliche Tageslastgang in der Niederspannungsebene verschiebt. Es ist durchaus auch möglich, dass das Stromversorgungsnetz der Elektromobilität Grenzen aufzeigt, beispielsweise durch die Begrenzung der Ladeleistung.

Zunächst jedoch müssen Untersuchungen durchgeführt werden, die die möglichen Auswirkungen der Elektromobilität auf die Stromnetze zeigen. Anhand der Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen ergibt sich die Notwendigkeit, auf die durch die Elektromobilität aufkommende neue Belastungssituation zu reagieren.

In dieser Arbeit sollen genau diese Auswirkungen untersucht werden. Sie soll zeigen in welchem Maß das bestehende Niederspannungsnetz mit der in Zukunft aufkommenden Elektromobilität vereinbar ist. Des Weiteren soll sie zeigen, ob und in welchem Ausmaß Schwierigkeiten oder Probleme im Niederspannungsnetz zu erwarten sind. Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erlangen, wird eine praxisnahe Betrachtung durchgeführt, bei der die Gegebenheiten eines lokalen Beispielraums im Mittelpunkt stehen.

## 2. Status Quo Elektromobilität

Es ist nicht jedes Auto, das mit Hilfe eines Elektromotors angetrieben wird, korrekt als Elektrofahrzeug zu bezeichnen. Es gibt eine große Bandbreite an unterschiedlichen Antriebskonzepten, die einer genauen Differenzierung bedürfen. Automobile, die sich momentan schon fest im täglichen Straßenverkehr etabliert haben und zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden, sind meist als Hybridfahrzeuge zu kennzeichnen. Als erste Hybridfahrzeuge, die in Serie produziert wurden, gelten zum Beispiel der Toyota Prius, der seit dem Jahr 1997 nun schon in seiner dritten Generation gefertigt wird, und der seit 2005 verfügbare Voll-Hybrid SUV (Sports Utility Vehicle) Lexus RX400h. Für die deutschen Autobauer machte Audi den ersten Schritt in die Hybridtechnologie. In den Jahren 1986-1998 war der Audi Duo auf dem Markt erhältlich [5].

Hybridantriebe sind nach zwei unterschiedlichen Kriterien zu spezifizieren. Zunächst wird im Grad der Hybridisierung unterschieden und des Weiteren wird nach den Arbeitsprinzipien differenziert.

Für die unterschiedlichen Arbeitsprinzipien ergibt sich eine Einteilung in serielle Hybride, parallele Hybride und leistungsverzweigte, sogenannte Mischhybride. Bei parallelen Hybriden sind jegliche Motoren, also Verbrennungs- sowie Elektromotoren, gleichzeitig mit dem Antriebsstrang gekoppelt. Diese Anwendung bietet den Vorteil, dass durch das Zusammenwirken beide Antriebsmotoren kleiner ausfallen können als bei Versionen mit nur einer Antriebsart. Jede Fahrsituation lässt sich mit einer Veränderung der Antriebsart optimieren. So ist es z.B. möglich, bei langsamer Fahrt nur einen und bei Nachfragespitzen beide Motoren zu nutzen. Das Prinzip paralleler Hybride eignet sich vor allem für größere und schwere Fahrzeuge. Sinnvoll ist eine Unterstützung des Verbrennungsmotors während des Beschleunigungsvorgangs, da in dem Moment der Energiebedarf des Fahrzeugs am höchsten ist. Bei diesem Vorgang spricht man vom „Boosten“. Als nachteilig stellt sich heraus, dass ein erhöhter Materialaufwand nötig ist, da mehrere Getriebe, Kupplungen und Freiläufe gebraucht werden.

In seriellen Hybriden sind der Verbrennungs- und Elektromotor hintereinander geschaltet. Das Fahrzeug wird im Gegensatz zum parallelen Hybrid nur durch den Elektromotor angetrieben. Der Verbrennungsmotor ist vom Antriebsstrang entkoppelt und dient ausschließlich zum Betrieb eines Generators. Dieser wiederum versorgt den Elektromotor mit Strom oder lädt die Batterie. Der Verbrennungsmotor kommt nur nach Bedarf zum Einsatz und ist vergleichsweise klein, sodass Schadstoff- und Lärmemissionen reduziert werden können. Der Verbrennungsmotor dient im Prinzip als Möglichkeit, die zurücklegbare Reichweite des Fahrzeugs zu verlängern und wird üblicherweise als Range Extender bezeichnet. Spätestens wenn der Ladestand der Batterie ein kritisches Level erreicht, springt der Verbrennungsmotor an und ermöglicht die Weiterfahrt.

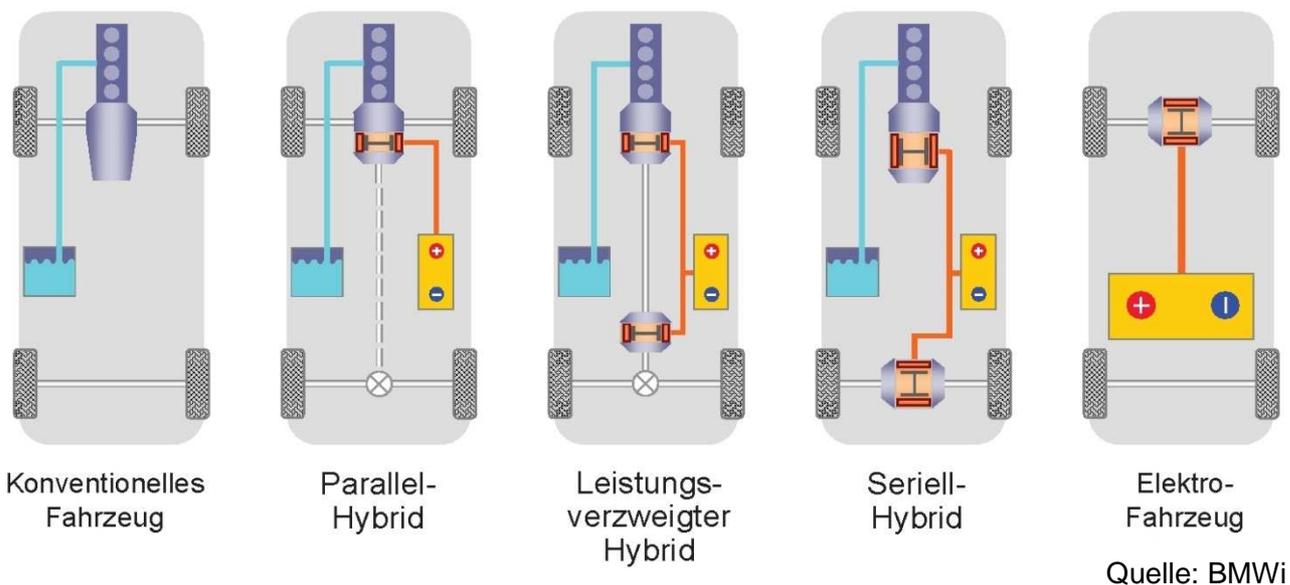
Ein leistungsverzweigter oder ein Mischhybrid kombiniert die Antriebsarten eines seriellen und parallelen Hybrides. Abhängig vom Fahrzustand lädt der Verbrennungsmotor über einen Generator den elektrischen Speicher und treibt den Elektromotor an oder er ist mechanisch mit der Antriebswelle gekoppelt und unterstützt den Antrieb. Über eine Kupplung kann zwischen den beiden Betriebsarten umgeschaltet werden [6].

Je nach Anteil des elektrischen Antriebs am Vortrieb des Fahrzeugs wird nach den drei Kategorien Micro-, Mild- und Vollhybrid unterschieden. Ein Fahrzeug mit einem microhybriden Anteil des Vortriebs wird ausschließlich durch einen Verbrennungsmotor

angetrieben. Es verfügt nicht über einen separaten Elektroantrieb, weshalb eine Bezeichnung als Hybridfahrzeug, welches über mindestens zwei Antriebsquellen verfügen sollte, nur bedingt zutrifft. Allerdings verfügen diese Konzepte über elektronische Zusatzmaschinen, welche einen Beitrag zum Kraftstoffsparen leisten. Zu nennen ist hier vor allem die Start-Stopp-Automatik, die das Anlassen des Motors rein elektrisch regelt und bei der die nötige Energie meist durch Rekuperation (Energierückführung der Bremsenergie) gewonnen wird.

Bei Mildhybriden greift ein Elektromotor, der auch beim Starten unterstützt, im Beschleunigungsvorgang ein.

Insgesamt hat innerhalb der Gruppe der Kombiantriebe das Vollhybrid-Konzept das größte Sparpotential [7]. Bei Überlandfahrten sind mehr als 20% und bei innerstädtischem Verkehr bis zu 40% Einsparung möglich. Zudem ist der Vollhybrid in der Lage, ausschließlich elektrisch zu fahren.



**Abbildung 2-1 Übersicht über die unterschiedlichen Hybridantriebskonzepte**

Doch die für diese Arbeit interessanteste Hybridklasse stellt die Klasse der Plug-In-Hybride dar. Bei diesen wird der Energiespeicher im Gegensatz zu anderen Hybriden separat über das Anschließen an das Stromnetz geladen und nicht mehr ausschließlich über einen Verbrennungsmotor geregelt. Am Beispiel des Opel Ampera lassen sich die Details eines Plug-In-Hybriden anschaulich verdeutlichen. Der Opel Ampera vereint einen 110 kW-starken Elektromotor mit einem Vierzylinder-Ottomotor, der auch in Corsa-Modellen eingesetzt wird und aus 1,4 l Hubraum ca. 50kW Leistung erzeugt. Der Verbrennungsmotor im Ampera ist nicht direkt mit dem Antrieb des Fahrzeugs verbunden, sondern dient ausschließlich zum Antrieb eines Generators, der bei Bedarf elektrische Energie in die Batterie einspeist. Benzin wird so zur sekundären Energiequelle, da der Verbrennungsmotor nur dann seinen Betrieb aufnimmt, wenn die gespeicherte Energie in der Batterie nahezu verbraucht ist. Eine schematische Übersicht zu diesem Antriebskonzept ist in der Darstellung vier der Abbildung 2-1 dargestellt. Die Batteriekapazität ist im Vergleich zu reinen elektrisch angetriebenen Autos meist geringer. So fasst die Lithium-Ionen-Batterie des Ampera 16 kWh an elektrischer Energie, mit der das Fahrzeug ca. 60 km weit fahren kann. Diese Wegstrecke deckt nahezu 80 % aller im Alltag gefahrenen Strecken ab [8]. Geht die Fahrt über die 60 km

hinaus, kommt der Range-Extender zum Einsatz und ermöglicht es, eine Strecke bis zu 500 km zurückzulegen.

## 2.1 Der Elektromotor

Die Automobilbranche befindet sich im Zuge der Entwicklung von Hybrid und Elektrofahrzeugen in der Orientierungsphase. Die Diskussion um die jeweils geeigneten System- und Antriebselektromotoren offenbart die mangelnde Erfahrung mit jenen Komponenten.

Die Elektromotoren, die das Herzstück einer neuen Automobilgeneration bilden werden, funktionieren nach folgendem Grundprinzip: Eingesetzt werden Drehstrommaschinen, die mit Dreiphasenwechselstrom, dem sog. Drehstrom, angetrieben werden. Bei dieser Stromart wird der E-Motor über drei getrennte Leiter mit Strom versorgt. Die Leiter führen eine periodisch wechselnde Spannung mit identischer Frequenz, deren Phasen aber gegenseitig um  $120^\circ$  verschoben sind. Das Funktionsprinzip basiert auf drei elektromagnetischen Spulen, die im Kreis um einen Rotor angeordnet sind (siehe Abbildung 2-2). Die drei elektromagnetischen Spulen werden jeweils durch zwei Leiterphasen des Drehstroms gespeist und erzeugen ein Magnetfeld. Die drei Spulenfelder sind analog zu dem Spannungsverlauf zueinander um eine Drittelfase versetzt. Durch die kreisförmige Anordnung der einzelnen Spulen ergibt sich aus den Spulenmagnetfeldern summiert ein zeitlich konstant großes Magnetfeld, welches seine Richtung mit der Frequenz und der Periodenwiederholung des Dreiphasenwechselstroms gleichbleibend ändert. Die Frequenz des Drehstroms gibt die Geschwindigkeit in der Drehung des Magnetfeldes vor. An dem Rotor, der aus magnetischem Material besteht und der sich auf der mittig angeordneten Achse im Magnetfeld befindet, wird ein Drehmoment erzeugt und so gedreht.

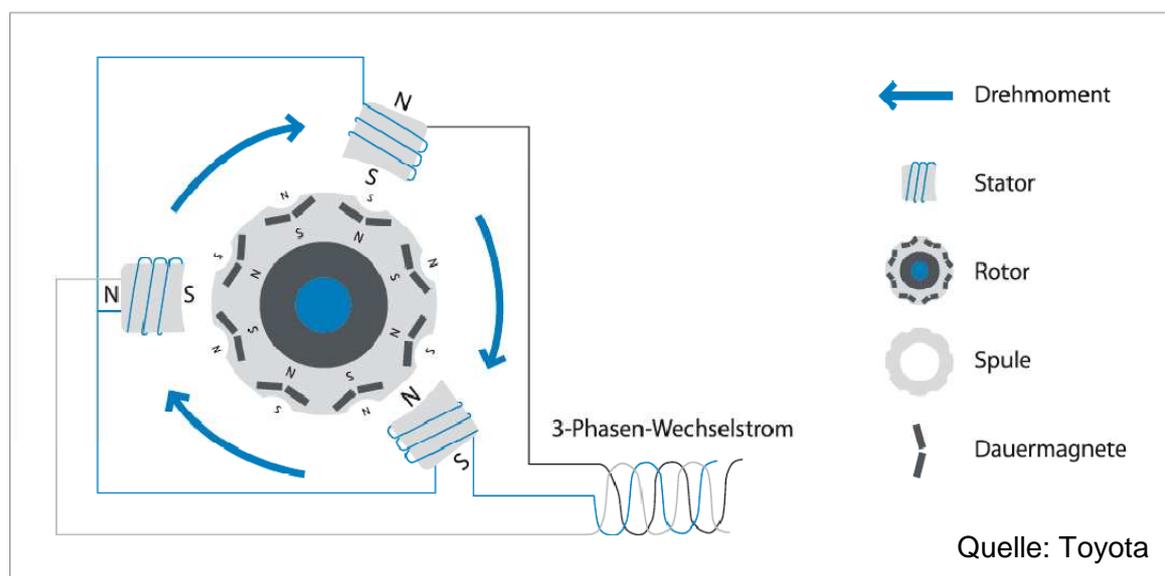


Abbildung 2-2 Der Elektromotor

Um den für Fahrzeuge unterschiedlichen Bewegungssituationen gerecht zu werden, werden die Motoren mit Frequenzumrichtern betrieben, deren Elektronik aus dem Drehstrom Gleichstrom und daraus wieder Drehstrom mit variabler Frequenz macht.

Somit sind eine variable Umlaufgeschwindigkeit des Drehstroms und damit eine veränderbare Rotorgeschwindigkeit möglich.

Bei elektrischen Maschinen bestehen fundamentale Zusammenhänge zwischen Leistungsdichte und Materialkosten und zum anderen zwischen Drehmomentdichte und Eigensicherheit. Bei der Suche nach einer passenden Antriebsmaschine für ein bestimmtes Fahrzeug liegt die Schwierigkeit in der Abwägung dieser Polaritäten. Elektromotoren und thermische Verbrennungsmotoren lassen allerdings bestimmte Zusammenhänge erkennen [6].

Das mittlere Drehmoment  $M_m$  einer Kolbenmaschine errechnet sich aus dem Mitteldruck  $p_e$  multipliziert mit dem Hubraum  $V_h$ :

**Formel 1**

$$M_m = V_h * p_e$$

Bei einem Elektromotor bildet der Rotor oder besser das Zylindervolumen im Stator, in dem er sich dreht, eine Art Hubraum, das Luftspaltvolumen. Das Vektorprodukt aus Luftspaltflussdichte und Strom entspricht hier dem Mitteldruck.

**Formel 2**

$$M_k = \frac{m_1 * U_1^2}{2\omega_d * \left( R_{1Cu} * \sqrt{R_{1Cu}^2 + X_\sigma^2} \right)}$$

Die Luftspaltflussdichte, die in der Einheit Tesla [T] gemessen wird, ist zwar unabhängig vom Motortyp und von der geometrischen Anordnung, aber zum großen Teil von der Materialeigenschaft des weichmagnetischen Stators, der die Wicklungen trägt. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren, bei denen der Mitteldruck durch Aufladung erhöht werden kann, ist es bei elektrischen Maschinen nur möglich, durch eine verbesserte Wärmeabfuhr den Stromfluss in den Wicklungen zu erhöhen. Die Stromwärmeverluste steigen quadratisch mit dem Strom, das Drehmoment aber bestenfalls linear. Das zeigt, dass eine Veränderung in Richtung mehr Luftspaltvolumen, vergleichbar mit dem Hubraum, eindeutig sinnvoller ist. Mit konventionellen Kühlmethode und klassischen Radialflussmaschinen betragen die thermischen Dauerdrehmomente 30-40 Nm/l aktivem Rotorvolumen, im Kurzzeitbetrieb sind aber deutlich über 100Nm/l möglich.

Kolbenmaschinen sind durch physikalische Gesetzmäßigkeiten in ihrem Betrieb an Grenzen gebunden. So lässt die tribologische Grenze, ein Maß für Reibungs- und Verschleißbedingungen, eine maximale Kolbengeschwindigkeit von 25m/s zu. Bei elektronischen Motoren sind keine Grenzen durch einander anliegende Systeme vorgegeben. Dennoch laufen auch diese nicht verlustfrei. Durch das fortlaufende Ummagnetisieren der weichmagnetischen Stoffe kommt es zu inneren Verlusten.

Wenn Materialien ummagnetisiert werden, wird Energie für die Neuausrichtung der inneren Elementarstrukturen benötigt. Diese Bewegung der weissen Bezirke verursacht Wärme im Metall und führt damit zu Hystereseverlusten. Die sich ergebenden Hystereseverluste nehmen mit der magnetischen Flussdichte quadratisch und mit der Frequenz linear zu. Um diese Verluste zu reduzieren, ist ein Einsatz von komplexen Legierungen und thermisch nachbehandelten Metallen möglich.

Des Weiteren wird durch das Ummagnetisieren eine Spannung im Eisen induziert und es fließen Wirbelströme. Die induzierte Spannung  $U_{ind}$  ist abhängig von der

Querschnittsfläche der magnetischen Flussdichte und der Frequenz. Die Wirbelstromverluste  $P_{Vw}$  nehmen mit der induzierten Spannung quadratisch zu.

**Formel 3**

$$U_{\text{ind}} = - \iint_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} * d\vec{A}$$

**Formel 4**

$$P_{Vw} = \frac{U_{\text{ind}}^2}{R}$$

Die Wirbelstromverluste lassen sich merklich reduzieren. Durch eine Unterteilung der Eisenfläche durch elektrisch voneinander isolierte Bleche wird in den einzelnen Segmenten durch die verringerte Fläche eine geringere Spannung induziert und der Ohmsche Widerstand für den Wirbelstrom wird größer.

Um weitere Eisenverluste zu reduzieren, ist eine Senkung des spezifischen Leitwertes des Materials sinnvoll. Alle aufgeführten Maßnahmen verteuern die eingesetzten Materialien und steigern die Komplexität der Fertigung.

Jedem Elektromotor kann eine maximal beherrschbare Frequenz zugeordnet werden. Die Wirbelstromverluste steigen quadratisch mit der Frequenz und der Amplitude des Flusses. Die Hystereseverluste steigen linear mit der Frequenz und ebenfalls quadratisch mit dem maximalen Fluss. Bei einer begrenzten Möglichkeit der Kühlung wird vor allem die eingesetzte Blechqualität zum entscheidenden Begrenzungsfaktor für Eisenverluste.

Die Motoren für Elektrofahrzeuge unterscheiden sich von jenen, die in der Industrie eingesetzt werden. Die industriell genutzten Motoren verwenden überwiegend Bleche mit einer Qualität von 0,5 mm Dicke. Bei einer Frequenz von 80 Hz können so aus 30 kg aktiver Motormasse ca. 10 kW Dauerleistung erzielt werden. Durch den Einsatz von deutlich besseren Materialien und einer Blechstärke von 0,35 mm in den Motoren im Automobilbereich sind mit Frequenzen von 250 Hz aus 30 kg aktiver Motormasse rund 45 kW dauerhaft möglich. Bei einer weiteren Verringerung der Blechdicke kann die spezifische Leistung der Motoren noch deutlich gesteigert werden [9].

Äußerst interessant im Hinblick auf die fahrdynamischen Eigenschaften eines Automobils ist die Möglichkeit, Elektromotoren für kurze Zeiträume mit Spitzenleistungen zu betreiben. Diese liegen stets um den Faktor 2-3 über der Nennleistung.

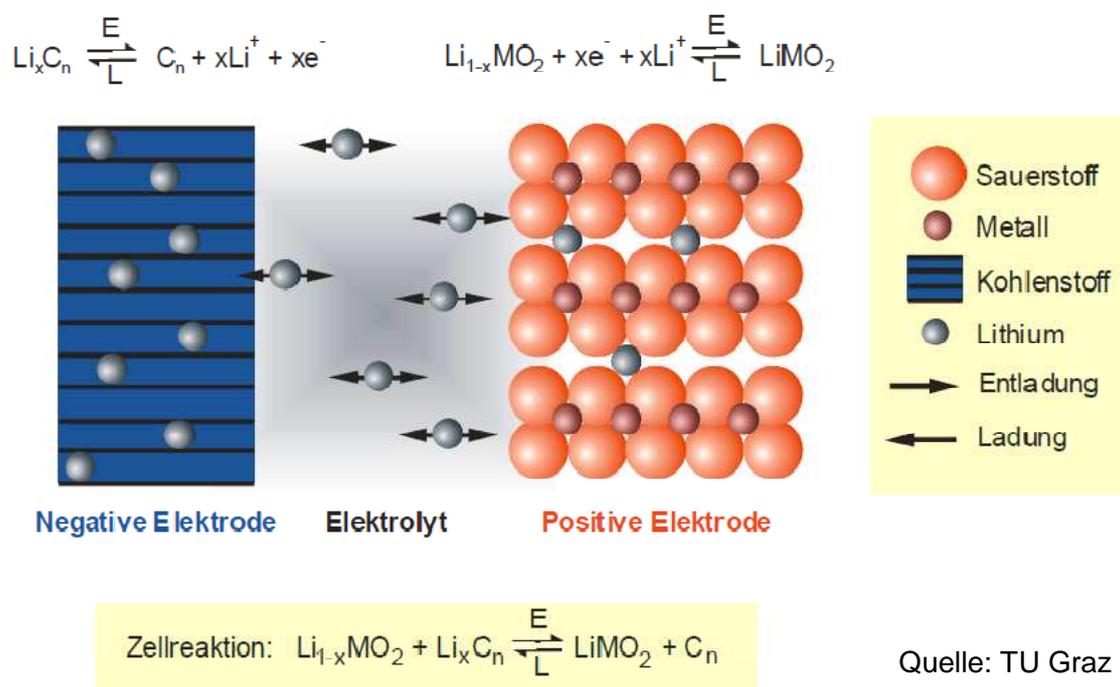
Welche Art von Elektromotor für ein bestimmtes Fahrzeug am besten geeignet ist, kommt auf den jeweiligen Einsatzzweck an. Zum jetzigen Zeitpunkt finden in Elektrofahrzeugen unterschiedlichste Motorenkonzepte Verwendung. Sowohl Asynchronmaschinen, Hybridsynchronmaschinen als auch stromerregte Synchronmaschinen bieten jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Welcher Maschinentyp sich hier durchsetzen wird, bleibt abzuwarten.

Zusammenfassend lassen sich einige Vorteile eines elektrischen Antriebs herausstellen. Einer der größten Vorteile ist sicherlich die gegenüber dem Verbrennungsmotor deutlich verbesserte Umweltverträglichkeit, die sich vor allem in den nicht vorhandenen Geräusch- und Schadstoffemissionen widerspiegeln. Weitere Stärken liegen im guten Ansprechverhalten und in hohen Wirkungsgraden. Otto- und Dieselmotoren arbeiten je nach Betriebspunkt mit niedrigen Wirkungsgraden von 30-40 %. Bei Elektromotoren liegt das Verhältnis von aufgenommener und abgegebener Energie sehr viel näher aneinander: Wirkungsgrade von ca. 90% sind die Regel [6].

## 2.2 Speichertechnik

Die Speichertechnik spielt bei Elektrofahrzeugen eine entscheidende Rolle und wird den Erfolg elektrisch betriebener Fahrzeuge maßgeblich mit beeinflussen. Sehr vereinfacht funktionieren Batterien nach folgendem Prinzip:

In der Batterie befinden sich zwei Stoffe, die miteinander reagieren können. Um eine sofortige Reaktion (Explosion) zu verhindern, werden die Stoffe voneinander isoliert. Über die beiden Pole der Batterie können die Elektronen die Isolation überwinden. Durch einen Ionenleiter wird im Innern der Batterie der Stromkreis geschlossen. Die Elektroden der beiden Stoffe werden von einem Lösungsmittel umgeben, dem Elektrolyt. Der Elektrolyt ermöglicht die elektrochemische Reaktion und den nutzbaren Elektronenstrom. Einen detaillierteren Einblick in die Funktionsweise und die Reaktionsschemata einer Lithium-Ionen-Batterie zeigt die Abbildung 2-3.



**Abbildung 2-3** Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie

Bei herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor finden hauptsächlich Bleibatterien Verwendung, welche für Elektrofahrzeuge wegen der geringen Energiedichte aber nur begrenzt geeignet sind. Im Vergleich zu anderen Energiespeichern sind sie äußerst schwer. Um die Energie einer Kilowattstunde zu

speichern, muss ein Gewicht von 40 kg kalkuliert werden. Bei Lithium-Ionen-Batterien reichen weniger als 10 kg Masse aus, um die gleiche Energiemenge zu transportieren. Bei modernen Elektromobilen ist die Reichweite, bedingt durch die Batteriekapazität, noch deutlich eingeschränkt. Dennoch macht das Gewicht des Energiespeichers oft bis zu 30 % des Gesamtgewichts des Fahrzeugs aus [10].

Die Speichertechnik in einem elektronisch angetriebenen Fahrzeug muss sehr hohen Anforderungen gerecht werden. Inwiefern eine bestimmte Speichertechnik für ein Auto geeignet ist, wird vor allem durch die drei äußerst wichtigen Eigenschaften Energiedichte, Leistungsdichte und Lebensdauer beurteilt.

Die Energiedichte einer Batterie ist ein Maß für die Effizienz der Energiespeicherung. Sie gibt an, wie viel elektrische Energie pro Masse gespeichert werden kann. In Abhängigkeit der Reichweite kann so auf das Gewicht der Batterie geschlossen werden. Je höher die Energiedichte einer Batterie beträgt, desto mehr erhöht sich die Reichweite pro kg Batteriegewicht. Herkömmliche Bleiakkumulatoren erreichen ca. 30 Wh/kg. Lithium-Ionen-Akkumulatoren kommen auf Werte von 140 Wh/kg. Die Wissenschaft ist sich einig, dass für einen massentauglichen Alltagsbetrieb die Energiedichte weiter verbessert werden muss. Unter Berücksichtigung der hohen Effizienz eines Elektroantriebs mit Energierückgewinnung durch Rekuperation sollten bereits 500 Wh/kg ausreichen, um mit der Reichweitenleistung eines Verbrennungsmotors zu konkurrieren [11]. In der Forschung geht man von potentiell erreichbaren Werten von über 1000 Wh/kg aus [12].

Eine Batterie mit einer guten Energiedichte muss nicht gleichzeitig eine hohe Leistungsdichte aufweisen. Die Leistungsdichte oder auch Massenleistungsdichte einer Batterie ist ein Maß für Leistungsabgabe, bezogen auf die Masse oder das Volumen. Bei dem Antrieb eines Fahrzeugs ist die Leistungsdichte entscheidend für eine gute Beschleunigung und Geschwindigkeit. Besonders für Hybridfahrzeuge ist eine hohe Leistungsdichte wichtig, um Energie von dem Verbrennungsmotor aufzunehmen. Auch für die Rekuperation und den „Boost“-Betrieb ist ein günstiges Verhältnis der Leistungsauf- und -abgabe von Vorteil.

Insbesondere beeinflusst die Leistungsdichte der Batterie entscheidend die Ladezeiten.

Die Lebensdauer einer Batterie wird bestimmt durch ihre Zyklenfestigkeit. Eine Batterie muss über viele Ladezyklen hinweg ohne Kapazitätsverluste arbeiten. „Aktuell käufliche Akkus erreichen rund 1000 Ladezyklen.“ [12] Dieses Ergebnis der 1000 Ladezyklen basiert auf einem Testverfahren mit kompletter Be- und Entladung. Es ist allerdings anzunehmen, dass eine derartige Tiefladung bei einem Elektromobil nur sehr selten vorkommen wird. Die tatsächliche Lebensdauer wird daher vermutlich deutlich höher ausfallen. Für Automobilanwendungen werden jedoch mindestens 4000 Ladezyklen angestrebt [12].

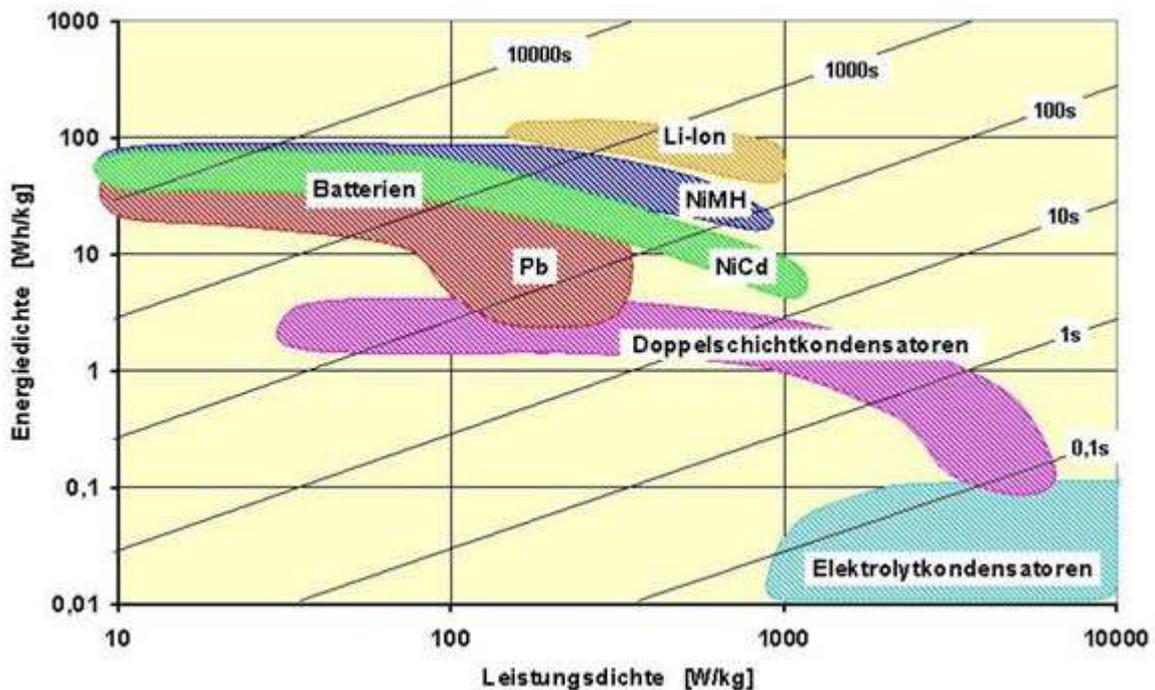
Der Lithium-Ionen-Batterie wird die größte Chance zur Massenfertigung eingeräumt. Diese Speichertechnik vereint einige positive Eigenschaften wie eine hohe Energie- und Leistungsdichte, lange Lebensdauer und vergleichbar gute Temperaturbeständigkeit. Bekannt wurden Lithium-Ionen durch die breite Anwendung in portablen elektronischen Geräten wie Laptops und Mobiltelefonen. So bilden im Tesla Roadster zum Beispiel mehr als 6000 Mobiltelefonakkumulatoren den Stromspeicher. Für die bisherige Nutzung als portabler Energiespeicher wurden die Akkus nahezu ausschließlich für die Eigenschaft höherer Energiedichte optimiert. Andere Eigenschaften wie Lebensdauer der Zellen, Sicherheit oder Preis waren subsidiär.

Bei Elektrofahrzeugen machen die Batterien einen großen Teil der Gesamtkosten aus. Dieser hohe Preis ist nicht allein auf die verarbeiteten Materialien wie Lithiumsalze,

geringe Anteile an Kobalt oder Mangan, Kohlenstoff und organische Lösungsmittel zurückzuführen. Es ist wahrscheinlich, dass aufgrund von bisherigen Kleinserienfertigungen hohe Entwicklungskosten auf die Batterien entfallen. Neueste Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass in den nächsten Jahrzehnten nicht mit einer Versorgungslücke oder Knappheit der Lithium-Reserven zu rechnen ist (z.B. [13]).

Langfristig setzt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt auf die „atmende Batterie“ [12]. Dies ist ein Lithium-Luft-System mit dem Lithium als Leichtmetall und dem Sauerstoff aus der Luft. Denkbar wäre so eine extrem leichte Batterie.

Neben den Lithium-Ionen-Batterien gehören folgende Akkumulatoren zu den gängigen Speichersystemen: Blei- (Pb), Nickel-Cadium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH), Natrium-Nickel-Chlorid-Akkumulatoren (NaNiCl). Eine Gegenüberstellung der Eigenschaften Energie- und Leistungsdichte der aufgelisteten Akkumulatoren bietet Abbildung 2-4.



**Abbildung 2-4** Energiedichte verschiedener elektrochemischer Energiespeicher (z.B. Pb, NiCd...) als Funktion der Leistungsdichte

Denkbar ist auch eine Kombination zweier Speichersysteme, um verschiedene Eigenschaften zu kombinieren. Interessant ist beispielsweise eine Kombination der chemischen Bestandteile von Doppelschichtkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien. Diese Zusammensetzung vereint die Vorteile des Kondensators, schnell Energie auf- und abzugeben und demonstriert die hohe Kapazität des Lithium-Ionen Speichers [14].

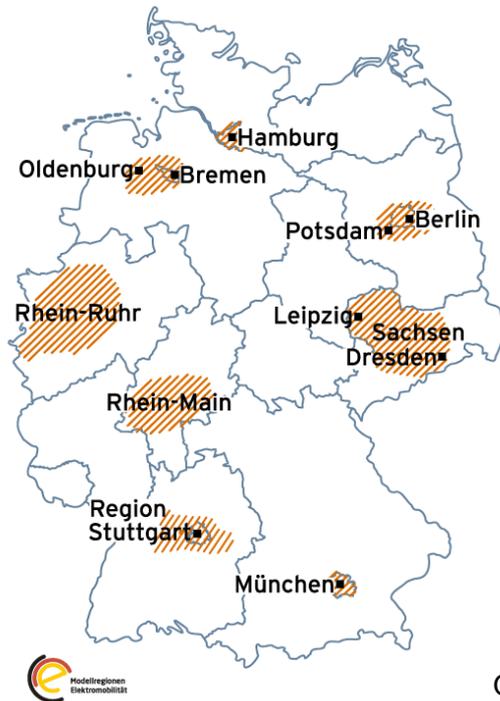
## 2.3 Fördermaßnahmen für Elektromobilität weltweit

Der Elektroauto-Index EVI (Electric Vehicle Index) wird von der Unternehmensberatung McKinsey für das deutsche Wirtschaftsmagazin der Wirtschaftswoche erstellt. Der EVI ist der weltweit erste seiner Art und bewertet, wie weit ein Staat bei der Elektromobilität fortgeschritten ist. Es werden die Bemühungen und die Unterstützungen eines Staates wie Förderungen oder Subventionen in Beziehung gesetzt zu den gesteckten Zielen. Insgesamt werden die Staaten nach neun Kriterien bewertet. Diese Kriterien umfassen sowohl den Markt für Elektroautos als auch die jeweiligen Produktionszahlen in dem Land. Im Folgenden werden diese Gegebenheiten für ausgewählte Staaten herausgestellt.

### 2.3.1 Deutschland

Die Deutsche Bundesregierung hat das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2020 zum Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität zu werden. Angestrebt wird eine Zahl von 1 Mio. Elektroautos [15]. Konkret nennt die Bundesregierung diese Zahl im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ aus dem Jahr 2009. Beschlossen wurde zudem eine Förderung im Rahmen des Konjunkturprogramms II in Höhe von knapp 615 Mio. Euro. Mitte 2010 wurde die „Nationale Entwicklungsplattform Elektromobilität“ gegründet. 115 der 615 Mio. Euro werden für praxisnahe Forschung im Verbund von Industrie und Wissenschaft verwendet. Hierzu wurden in Deutschlandweit acht Modellregionen ausgewählt, deren Verteilung in Abbildung 2-5 dargestellt wird. Die Modellregionen unterscheiden sich untereinander durch die Erarbeitung inhomogener Fragestellungen. Es wird so versucht, möglichst differente Erkenntnisse zu gewinnen.

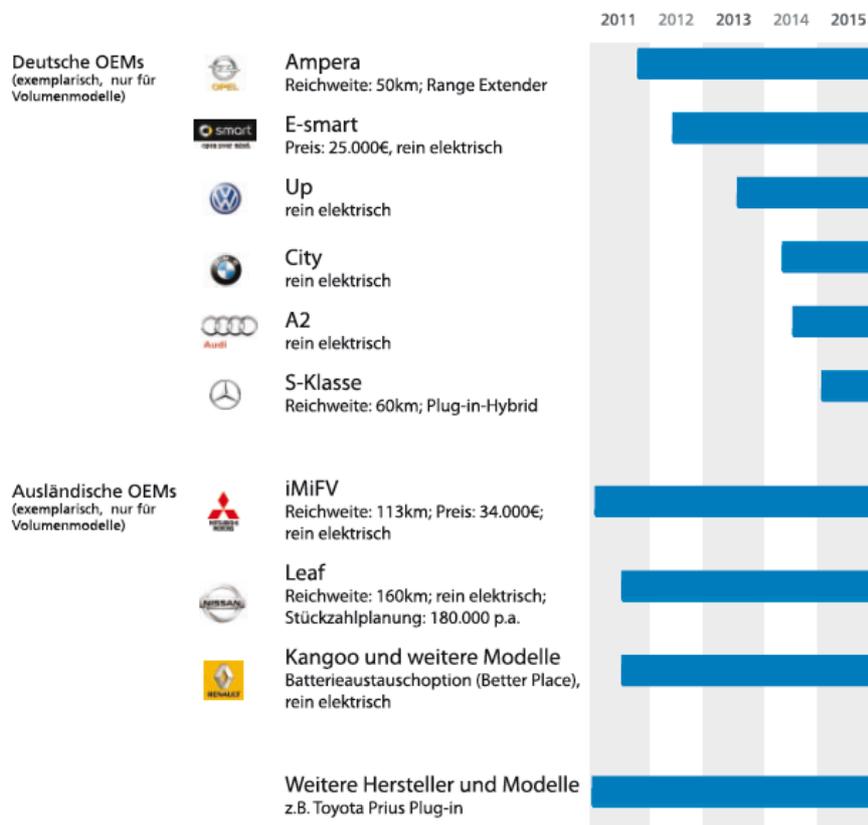
Seit 2009 sind im Großraum Berlin über 100 Elektrofahrzeuge der Marke Smart und Mercedes-Benz unterwegs. Das Pilotprojekt „e-mobility Berlin“ ist ein Gemeinschaftsprojekt von RWE und der Daimler AG. Angeboten wird ein „Full-Service-Mietmodell“, mit dem der Kunde eine Smart fortwo electric drive im Komplettpaket mit einer RWE-Ladefahrerbox für Zuhause enthält. Für 18 Monate wird kostenlos Strom aus regenerativen Quellen zur Verfügung gestellt. Überdies errichtet RWE in Berlin 500 öffentliche Ladepunkte [16]. Das Ziel dieser Modellregion ist die Untersuchung und Erprobung der Integration von Elektromobilität im öffentlichen Verkehr, in Tourismus, in Wohnungsdienstleistungen und in der City-Logistik [17].



Quelle: BMVBS

**Abbildung 2-5 Die 8 Modellregionen im Überblick**

Kaufprämien oder Subventionen zum Kauf eines Elektroautos lehnt die Bundesregierung bisher strikt ab. Begründet wird diese Haltung mit dem Argument, dass eine solche Förderung vor allem ausländischen Herstellern zugutekommen würde. Tatsächlich ist es so, dass momentan kein deutscher Volumenhersteller ein seriengefertigtes Elektrofahrzeug auf dem Markt anbietet (vgl. Abbildung 2-6).



Quelle: BMU

**Abbildung 2-6 Markteintritt verschiedener Elektrofahrzeuge**

Das Potential für die Volkswirtschaft Deutschlands hinsichtlich der Elektromobilität, in der die Automobilwirtschaft tiefer als in jedem anderen Industrieland verankert ist, ist enorm. Dennoch kommen die etablierten Volumenhersteller im Bereich der Elektromobilität international unter Druck. „Keine andere Volkswirtschaft hat bei der Elektromobilität so viel zu gewinnen oder zu verlieren wie die deutsche“, meint Christian Malorny, Direktor und Autoexperte bei McKinsey [18].

Nach der neuesten Erhebung der EVI-Rangliste, die in Abbildung 2-7 vorliegt, belegt Deutschland den vierten Platz nach dem unangefochtenen Spitzenreiter USA gefolgt von Frankreich und Japan, wobei Japan in den letzten Monaten Deutschland auf den vierten Platz verdrängt hat. Es folgt China auf Platz fünf [18].

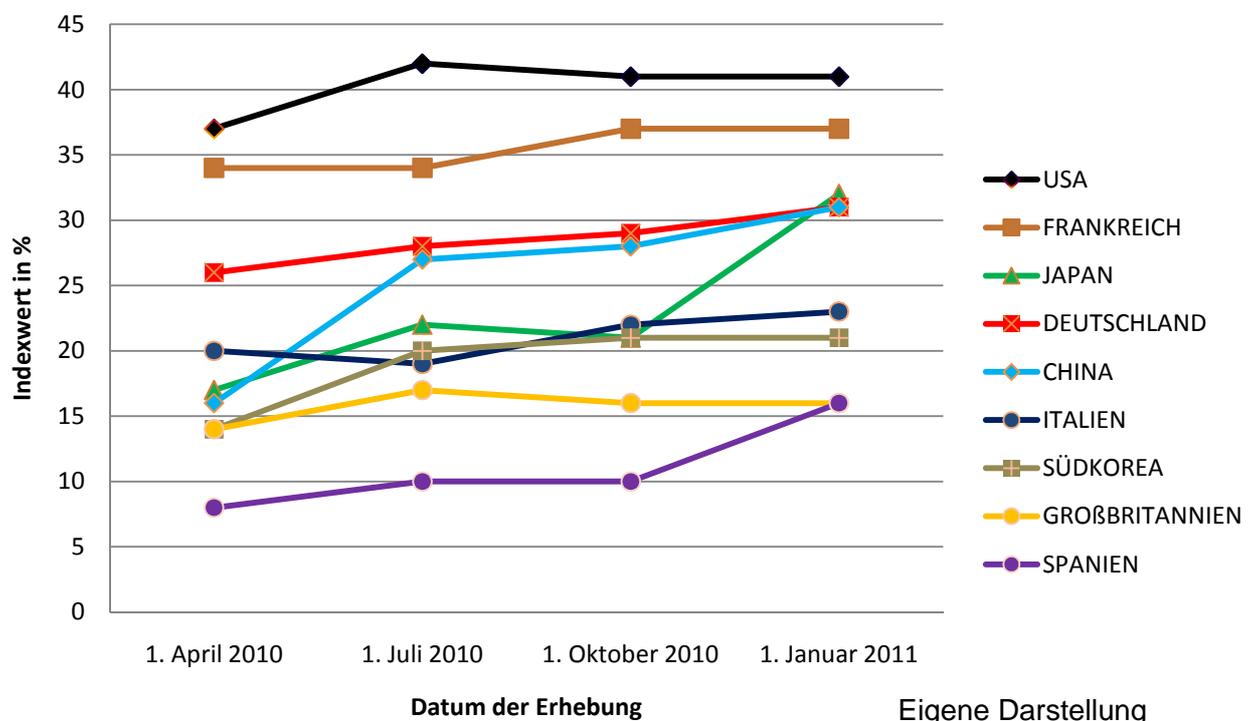


Abbildung 2-7 Electric Vehicel Index

### 2.3.2 USA

Die USA verfolgen die konsequente Strategie und den erklärten politischen Willen, die Elektromobilität zu fördern. Die Obama-Regierung hat das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2015 über 1 Mio. Elektroautos und Plug-In-Hybrids zu erreichen. Um dieses Ziel zu realisieren, hat die US-Regierung ein international beispielloses Investitionsprogramm gestartet und Förderungen, Kredite und Bürgschaften vergeben. Hierzu sollen 23 Mrd. Euro über die kommenden fünf Jahre zur Verfügung gestellt werden [6 S. 82]. Diese Summe entspricht mehr als dem Dreißigfachen dessen, was die Deutsche

Bundesregierung an Förderungen vergeben will. Der fünfjährige Entwicklungsplan gibt auch Ziele für die Batterieforschung an. Vorgesehen sind eine Verdopplung der Energiedichte, die Verdreifachung der Lebensdauer und eine Kostensenkung von 30 % bei Akkumulatoren. Darüber hinaus bilden Steuerbegünstigungen in Höhe von mind. 2.500 USD pro Elektrofahrzeug einen zusätzlichen Kaufanreiz für Endkunden. Der Automobilmarkt in den USA, der durch die Finanz- und Wirtschaftskrise stark belastet wurde, hat sich erholt und das Land hat sich eine Spitzenposition in der Elektromobilität erarbeitet.

### 2.3.3 China

Der chinesische Automarkt ist für die internationale Automobilindustrie äußerst interessant. Er wächst jährlich mit 12 % außerordentlich rasant. Prognosen zeigen, dass im Jahr 2030 mehr als 285 Mio. Fahrzeuge in dem ostasiatischen Staat fahren werden. Dies entspräche einem Weltmarktanteil von ca. 30 % und würde so die USA als größten Markt für Automobile ablösen. Angesichts dieser Umstände hat die chinesische Regierung das Ziel vorgegeben, im Bereich der Elektromobilität zum Technologieführer aufzusteigen. Hierzu stellt die Führung des Landes die weltweit zweithöchste Fördersumme zur Verfügung. Im Rahmen eines Fünf-Jahres-Plans werden 3,3 Mrd. Euro in Form von Förderungen, Krediten oder Bürgschaften vergeben. Als Zwischenziel sollen bis 2012 eine halbe Mio. Elektrofahrzeuge auf die Straßen gebracht werden [19].

In Bezug auf das gesteckte Ziel werden seit Juni 2010 in fünf Städten, darunter in Shanghai und Hangzhou, Anreizprogramme für Privatkunden angeboten. Der Kauf eines Elektroautos wird durchschnittlich mit knapp 5.000 Euro bezuschusst. Darüber hinaus wurden in 20 Städten Pilotprojekte ins Leben gerufen, in denen Elektrofahrzeuge im öffentlichen Bereich eingesetzt werden [20].

Inwiefern in China auch sozioökologische Faktoren eine Rolle spielen, zeigt ein Beispiel aus dem Jahr 1996. Von heute auf morgen wurden konventionell betriebene Roller in der Stadt Shanghai per Gesetz verboten. Mit diesem Verbot schuf man eine in der Stadt enorme Nachfrage und Verbreitung von Elektrorollern. Dies zeigt, wie konsequent die chinesische Führung die Weichen für eine Technologie stellen kann. Laut EVI liegt China derzeit gleich mit Deutschland

Im Folgenden sollen exemplarisch einige Elektrofahrzeuge veranschaulicht werden. Die ausgewählten Fahrzeuge stellen die in den Medien am häufigsten vorkommenden Modelle dar. Es sind zudem die ersten auf dem deutschen Automobilmarkt erhältlichen Modelle.

### 2.3.4 Mitsubishi i-MieV

Der i-MieV ist ein Kleinwagen des japanischen Autoherstellers Mitsubishi Motors. Am 05. Juni 2010 begann die Serienproduktion in Japan und ist seit Dezember letzten Jahres auch in Europa erhältlich. Jährlich werden in Japan 2.000 und ab 2013 bis zu 30.000 i-MieV produziert. Angetrieben wird der i-MieV von einem permanentmagnetischen Synchronmotor, der eine Leistung von 47 kW und ein Drehmoment von 180Nm bereitstellt. Die nötige Energie wird in einer Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 16 kWh zwischengespeichert. Diese Energiemenge soll für eine Strecke von 150 km und einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h reichen [21].

### 2.3.5 Opel Ampera

Der Opel Ampera ist das erste Fahrzeug eines deutschen Massenherstellers, das primär durch elektrische Energie angetrieben wird. Wie schon erwähnt, ist der Ampera ein Plug-In-Hybrid. Er kombiniert einen 110 kW starken Elektromotor mit einem als Range-Extender fungierenden 1,4 l-Ottomotor. Die 16 kWh fassende Lithium-Ionen-Batterie soll genügen, um eine 60 km lange Strecke zurückzulegen. Erreicht die Batterie einen kritischen Ladestand, verhilft der Range-Extender zu einer verlängerten Fahrt bis zu 500km. Die Höchstgeschwindigkeit des Ampera beträgt 160 km/h, wird mit einem Preis ab 42.900 Euro zu kaufen sein [22].

### 2.3.6 Tesla Roadster

Der Tesla Roadster ist ein zweisitziger Elektrosportwagen des Unternehmens Tesla Motors. Die Kleinserienproduktion begann am 17. März 2008 im englischen Hethel. Der Tesla Roadster ist eines der spektakulärsten Elektroautos weltweit. Er weist zum Beispiel im Hinblick auf die Beschleunigung Werte auf, die mit anderen Supersportwagen vergleichbar sind. Die Beschleunigung des Roadsters basiert auf einem starken Elektromotor. Diese 4-polige Asynchronmaschine stellt aus dem Stand heraus eine Kraft von 380 Nm bereit und leistet bis zu 189 kW. Diese Antriebsleistung in Kombination mit einem Gesamtgewicht des Fahrzeugs von nur 1240 kg macht es dem Tesla Roadster möglich, in nur knapp 4 sec von 0 auf 100 km/h zu beschleunigen. Das zeigt, dass ein Elektroauto schon jetzt fähig ist, mit Supersportwagen wie einem Porsche 911 GT3, Audi R8 und sogar einem Ferrari F 430 Spider durchaus mithalten kann. Dennoch ist der Elektrosportwagen in seinen Fahreigenschaften begrenzt. So wird die Höchstgeschwindigkeit elektronisch auf 201 km/h begrenzt. Des Weiteren ist die mögliche Gesamtstrecke durch die Fahrweise und die Menge der gespeicherten elektrischen Energie eingegrenzt. Durchschnittlich kommt der Roadster auf eine Reichweite von 365 km, die aber je nach Fahrweise zwischen 200-501 km schwankt [23].



Abbildung 2-8 Tesla Roadster

Quelle: RWE

Der Energiespeicher des Tesla Roadsters besteht aus 6.831 Zellen herkömmlicher Lithium-Ionen-Akkumulatoren, wie sie auch in Notebooks verwendet werden. Insgesamt kommt so eine Kapazität von 56 kWh zustande. Das gesamte Paket der 6.831 Zellen kommt auf ein Gewicht von 450 kg und ist zusammen als Batterieblock im Heck des Fahrzeugs verbaut.

Nachdem der Roadster erstmalig auf dem nordamerikanischen Markt verkauft wurde, ist er seit Mai 2009 auch in Europa erhältlich, wobei der Basispreis 117.810 Euro beträgt [24].

### 3. Entwicklungspotentiale und Chancen für die Elektromobilität

Das Potential für die Elektromobilität ist gewaltig. Vor dem Hintergrund weltweiter Entwicklungen wie zunehmender Mobilitätsbedürfnisse, steigender Energiekosten und der Pflicht zur Einhaltung internationaler Klimaabkommen rückt das Elektroauto als Fortbewegungsmittel der Zukunft immer weiter in den Vordergrund.

Lange Zeit galt die verbreitete Meinung, Elektrofahrzeuge seien für die breite Masse der Bevölkerung und deren Anspruch an Mobilität nicht brauchbar. Es sei weder möglich, schnell zu fahren, noch lange Strecken zurück zu legen. Dass diese Ansicht überholt ist, zeigt spätestens der vorgestellte Tesla Roadster mit den enormen Beschleunigungswerten und einer Reichweite von über 300 km [24].

Weitere Überlegungen zeigen, dass sich die Automobilbranche einem Wechsel unterziehen muss. Momentan fahren auf der Erde ungefähr 500 Mio. Autos. Diese Anzahl könnte sich bis zum Jahr 2030 um das 4,5-fache auf 2,3 Mrd. steigen. Legt man diese Zahlen zugrunde, würde der Autoverkehr von 1995-2030 rund 60 Mrd. t Erdöl verbrauchen. Das entspräche der Hälfte der weltweit bekannten Erdölreserven [25]. Weitere Beachtung ist vor allem dem chinesischen Automobilmarkt zu widmen. Dieser wächst jährlich rasant mit mehr als 12%. Bei einem anhaltend gleichen Wachstum würde China Prognosen zufolge die USA im Jahr 2030 als größten Automarkt der Welt ablösen und so einen Weltmarktanteil von 30% erlangen. Hätte China im Autobesitz eine ähnliche Rate wie die USA, so wären pro Tag ca. 88 Mio. Barrel Öl nötig, um diese Nachfrage zu bedienen. Diese Menge an Öl übertrifft die derzeitige weltweite Produktion [26].

Diese Überlegungen zeigen, dass es ein einfaches „Weiter so“ in der Automobilindustrie nicht geben kann. Das Elektroauto scheint für viele Problemstellungen die Lösung zu sein. Doch handelt es sich vielleicht um einen von Medien und dem Marketing aufgebauten Hype zu handeln? Eine zeitlich begrenzte Modeerscheinung also?

Nicht nur die hohen finanziellen Anstrengungen, die die Regierungen in allen Industriestaaten der Welt zur Förderung und Subventionierung der Elektromobilität aufwenden, zeigen, wie ernsthaft die kommende Technologie unterstützt wird. Neben den Regierungen rechnen auch die Automobilindustrie und die international führenden Industriekonzerne damit, dass sich die Elektromobilität über kurz oder lang durchsetzen wird. Wie dynamisch sich diese Veränderung vollziehen wird, ist offen. Für den deutschen Markt liegen dennoch einige Prognosen vor.

Die deutsche Fahrzeugflotte erneuert sich im Schnitt alle 15 Jahre. Bei etwa 45 Mio. Fahrzeugen werden so jährlich bis zu 3 Mio. ersetzt [27]. Theoretisch besteht so die Möglichkeit eines schnellen Technikwandels hin zu Elektrofahrzeugen. Wie schnell Elektroautos von der Bevölkerung angenommen werden, wird von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst.

Einer der entscheidendsten Faktoren ist zugleich einer der am schwersten zu kalkulierenden, der Ölpreis. Ein hohes Preisniveau für Erdöl beschleunigt die Entwicklung hin zu alternativen Antrieben und macht diese wirtschaftlich.

Eine wegweisende Rolle spielt die Politik. Diese muss für den technologischen Wandel die notwendigen Rahmenbedingungen schaffen.

Ein erster wichtiger Schritt ist mit der Bereitstellung der erwähnten 615 Mio. Euro zur Förderung der Elektromobilität bereits gemacht. Mit dem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ und der „Nationalen Plattform Elektromobilität“, formulierte die

Bundesregierung bereits zu erreichende Ziele und schuf Organe um geplante Maßnahmen zu koordinieren. Weitere denkbare Maßnahmen sind zum Beispiel die Bereitstellung von Kaufprämien und die Anpassung der KFZ-Steuer an die Verbrauchswerte eines Fahrzeugs. Übereinstimmend fordern die Vorsitzenden der deutschen Volumenhersteller und die Partei BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN eine finanzielle Unterstützung beim Kauf eines Elektroautos [28]. Auch eine KFZ-Besteuerung nach CO<sub>2</sub>-Werten würde die Anschaffung von Elektrofahrzeugen begünstigen. Hier sollte dann aber nicht pauschal der CO<sub>2</sub>-Wert des bundesweiten Strommixes zugrunde gelegt werden. Im Jahr 2009 stammte der durchschnittliche Strom zu 17,3% aus regenerativen Energieträgern, zu 24,9% aus Kernenergie und zu 57,8% aus Kraftwerken, die mit fossilen Energieträgern wie ÖL, Gas und vor allem mit Kohle befeuert wurden. Dieser Strommix verursachte bei der Herstellung im Durchschnitt 508 gCO<sub>2</sub>/kWh [29].

Ein elektrisch angetriebenes Auto mit einem Verbrauch von 20 kWh/100km würde zwar lokal emissionsfrei fahren, aber in der Summe 101,6 gCO<sub>2</sub>/km verursachen. Dies würde bedeuten, dass das Elektroauto ebenso viele CO<sub>2</sub>-Emissionen verschuldet wie ein herkömmlicher Wagen mit Ottomotor und einem Verbrauch von knapp 4 l/100km. Das volle Spektrum an Vorteilen entfaltet ein Elektrofahrzeug erst bei einer Ladung mit regenerativ erzeugtem Strom. Es wird so ein Verbrauch von 0 gCO<sub>2</sub>/100km erreicht. Positiver Nebeneffekt ist, dass die Nachfrage nach Energie aus regenerativen Quellen gesteigert wird.

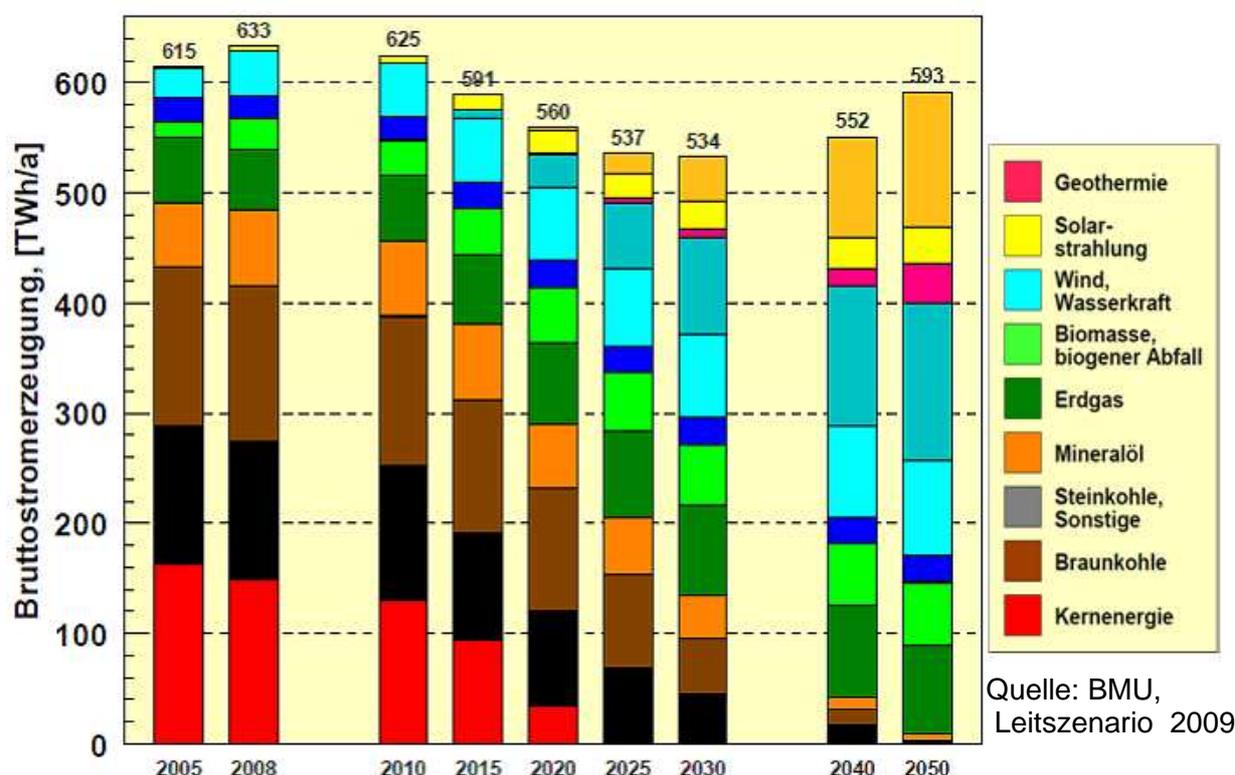


Abbildung 3-1 Überblick über die Bruttostromerzeugung in Deutschland

Begrenzend für ein starkes Wachstum der Elektromobilität kann auch die Verfügbarkeit von notwendigen Ressourcen sein. Die Automobilindustrie wird bei der Elektromobilität mit Materialien und Werkstoffen umgehen, die bisher nicht üblich waren. Lithium wurde im Kapitel „Speichertechnik“ bereits vorgestellt. Im Zusammenhang mit knappen Res-

sourcen in der Zukunft wird auch immer wieder Kobalt genannt. Die Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ [30] kommt zu dem Schluss, dass im Jahr 2030 allein für Akkumulatoren die 2-3-fache Menge der momentanen Jahresproduktion nötig sein wird. Weltweit gibt es zwar genügend Reserven des Materials, allerdings sind diese Vorkommen sehr konzentriert. Die größten bekannten Lagerstätten befinden sich in dem zentralafrikanischen Staat Kongo. Durch geopolitische Spannungen kann es so zu Versorgungsengpässen kommen.

Die genannten Faktoren machen es schwer, Prognosen bzgl. der Elektromobilität mit konkreten Zahlenwerten zu versehen. Der deutsche Markt ist hier noch sehr zurückhaltend. Bis Ende des ersten Halbjahres 2010 waren in Deutschland 1.642 Elektrofahrzeuge zugelassen. Dies ist sicherlich darauf zurückzuführen, dass Elektrofahrzeuge durch fehlende Kaufanreize im deutschen Markt aufgrund des noch höheren Kaufpreises wenig konkurrenzfähig waren/sind. Zudem wird der Markt von deutschen Volumenherstellern dominiert und diese führen noch keine Elektrofahrzeuge in ihrem Verkaufsportfolio, wie Abbildung 2-6 zeigt.

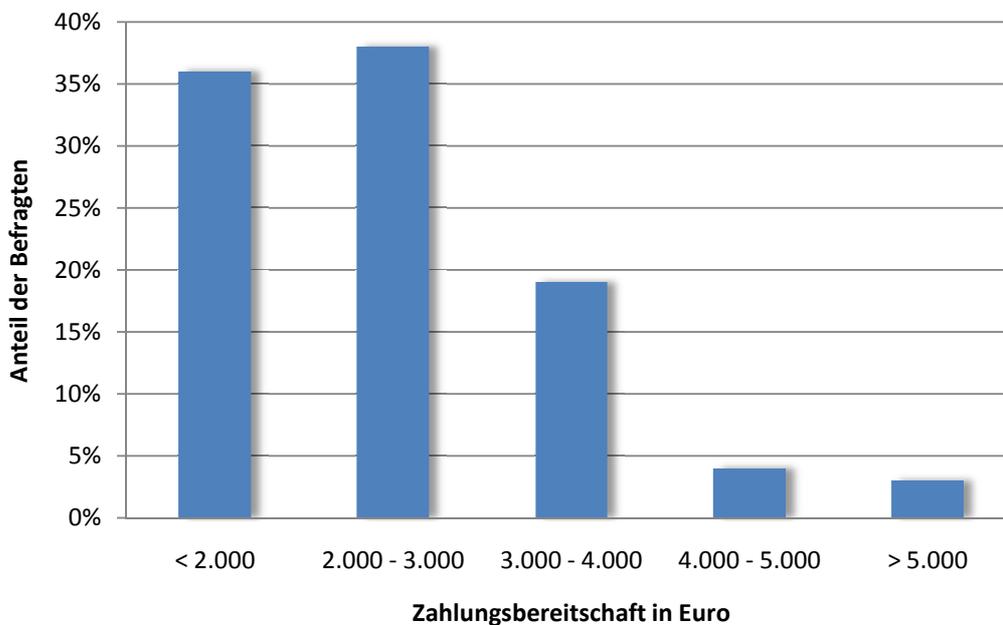
Doch trotz der aktuell zurückhaltenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen sind die Erwartungen an die Elektromobilität hoch. Die Bundesregierung erwartet eine Entwicklung von 1 Mio. Elektroautos im Jahr 2020 auf 10 Mio. in 2030. Deutschland soll zum Leitmarkt für Elektromobilität werden. Auch Bundeskanzlerin Angela Merkel bekennt sich zur Elektromobilität: „Insofern begrüße ich diese Initiative aus vollem Herzen und mit vollem Verstand und glaube, dass Elektromobilität ein Innovationsbereich sein könnte, der sich vielleicht schneller durchsetzt, als wir denken.“ [31] Die Prognosen und Ziele führender deutscher Industrieunternehmen übertreffen die der Bundesregierung beträchtlich. So rechnet die RWE AG für das Jahr 2020 mit 2,4 Mio. rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Zusätzlich kommen noch Plug-In-Hybride, also Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb und Range-Extender hinzu. Carolin Reichert gibt als Leiterin Neue Geschäfte bei RWE den Standpunkt des Konzern wider: „In 2015 erwarten wir allein in Westeuropa ca. 300.000 Nutzer in großen Städten. Danach werden die Preise von Elektroautos deutlich fallen und sich die Fahrzeuge auch in der Masse durchsetzen.“ Und weiter fasst sie zusammen: „Elektromobilität wird sich nachhaltig durchsetzen.“ Die Prognosen der RWE AG liegen deutlich über denen der Bundesregierung, aber unterhalb der Schätzungen anderer renommierter Unternehmen [6 S. 138].

Der Elektrokonzern Siemens, das nach Börsenwert wertvollste Unternehmen Deutschlands [32], rechnet für das Jahr 2020 bereits mit 4,5 Mio. Elektrofahrzeugen in Deutschland.

Dem Ergebnis einer Studie der Unternehmensberatung Roland Berger zur Folge erreichen Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 einen Anteil von 25% bei den deutschen Neuzulassungen [2 S. 41]. Legt man den Zahlenwert der Neuzulassungen von 2009 zugrunde, würden allein in 2020 etwa 950.000 Elektrofahrzeuge zugelassen [27].

Auch die Automobilindustrie und ihre Zulieferer haben die Entwicklung erkannt und sehen neue Chancen. Martin Winterkorn, Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG, Europas größtem Automobilhersteller, vertritt die Meinung: „Das alltagstaugliche, bezahlbare und sichere Elektroauto für alle ist machbar“ und er gibt den Weg vor: „Wir müssen das Elektroauto aus der Öko-Nische ins Massensegment führen.“ [33] Auch Dieter Zetsche, Vorstandsvorsitzender der Daimler AG, verfolgt die Ansicht, dass die Zukunft der Automobilindustrie der Elektromobilität gilt: „Das Monopol des Verbrennungsmotors geht zu Ende.“ [34] Ähnlich äußert sich auch der Chef des Zulieferkonzerns Continental: „Der Trend zur Nachhaltigkeit ist die treibende Kraft in der Automobilindustrie.“ [34]

Ähnlich wie die Industrie steht auch die deutsche Bevölkerung der Elektromobilität positiv gegenüber. So zeigt eine Studie des TÜV-Rheinlands, dass für gut jeden zweiten Bürger in der Bundesrepublik in den nächsten fünf Jahren der Kauf eines Elektroautos in Frage komme. Die Befragten gaben an, dass sie die Vorteile vor allem im Umweltschutz, der Unabhängigkeit von Öl und den geringen Betriebskosten sehen [35]. Wie weit die Zustimmung in der Bevölkerung geht, haben Roland Berger und TNS Infratest untersucht. Durch Umfragen wurde untersucht, welchen Mehrpreis der deutsche Kunde bereit sei, für ein Elektroauto zu zahlen; vergleiche dazu Abbildung 3-2. Abgesehen von 36 % der Befragten, die für ein Elektrofahrzeug einen Aufpreis von lediglich bis zu 2.000 Euro zahlen würden, sind die meisten Autofahrer bereit, einen höheren Betrag zu bezahlen. Demnach würde mehr als ein Drittel der Befragten, nämlich 38 %, Mehrkosten zwischen 2.000-3.000 Euro zahlen. Weitere 19% sind bereit, 3.000-4.000 Euro mehr aufzubringen. Zwischen 4.000-5.000 Euro zusätzlich bezahlen würden 4 % der Befragten, 3 % würden sogar mehr als 5.000 Euro für ein Elektroauto zusätzlich ausgeben [36].



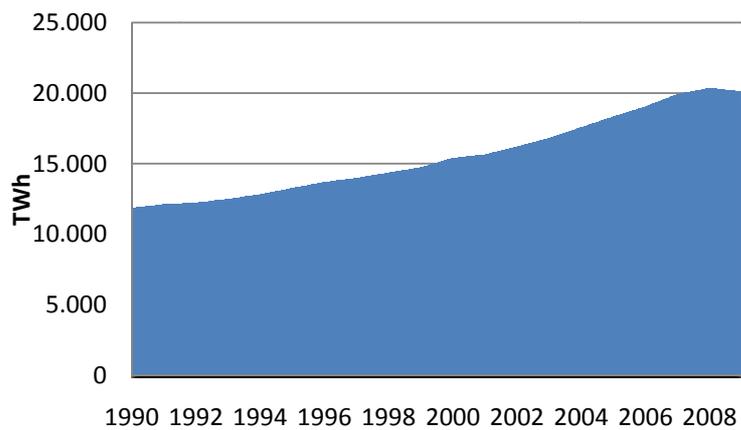
Eigene Darstellung

(Themenfrage: Wie viel Geld würden Sie für Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen zusätzlich ausgeben?)

**Abbildung 3-2** Mögliche Mehrausgaben für ein Elektrofahrzeug

## 4. Elektrische Energieversorgung und Netzbetrieb

Der Beginn der öffentlichen Elektrizitätsversorgung kann weltweit um 1880 datiert werden. Seitdem bildete die Elektrizitätsversorgung den Hauptmotor der industriellen Revolution und ist heute bei hoch automatisierten Arbeitsprozessen und der virtuellen Kommunikation in der Gesellschaft unverzichtbar. Man kann sie als das Rückgrat der hoch entwickelten technisch-wissenschaftlichen Zivilisation bezeichnen. Für den Großteil



Jahr

Quelle : BP

Quelle : BP

**Abbildung 4-1 Weltweite Elektrizitätserzeugung**

der deutschen Bevölkerung ist die Versorgung mit elektrischem Strom eine Selbstverständlichkeit. Dementsprechend sind die Ansprüche an die Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Versorgung sehr hoch. Das gilt auch für die Versorgungssicherheit in Deutschland. Ein Maß hierfür ist die durchschnittliche Nichtverfügbarkeit von elektrischer Energie im Jahr. Im Jahr 2009 lag dieser Wert bei 14,64 min und belegt ein hohes Zuverlässigkeitsniveau [37].

Der Erfolg der elektrischen Energie hängt damit zusammen, dass sie viele vorteilhafte Eigenschaften hat. Strom ist aus nahezu jeder Form von Primärenergie erzeugbar und sogar umweltfreundlich, sofern er regenerativ erzeugt und fachgemäß angewendet wird. Er ist problemlos und wirtschaftlich über große Distanzen transportierbar und leicht zu messen und zu steuern. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist, dass sich Elektrizität bequem und mit sehr gutem Wirkungsgrad in alle Nutzenergieformen umwandeln lässt und damit sehr vielseitig verwendbar ist [38].

Diese Eigenschaften zeigen, dass Energie in elektrischer Form weltweit an Bedeutung gewinnen und vermutlich die wichtigste Energieform bleiben wird. Allein im Zeitraum von 1990-2009 stieg die weltweit erzeugte elektrische Energie um mehr als 40% auf 20.093 TWh (vgl. Abbildung 4-1 und [39]).

Der Aufbau der elektrischen Energieversorgungsnetze hat sich seit ihrer Verbreitung deutlich verändert. Zu Beginn der Industrialisierung wurden Kraftwerke gebaut um ein bestimmtes Netz zu versorgen. Solche Netze, gibt es heute nur noch in sehr abgelegenen Regionen und werden als Inselnetze bezeichnet. Ihr Nachteil ist die hohe Abhängigkeit von dem einen Stromerzeuger. Fällt dieser aus, ist die gesamte Versorgung unterbrochen.

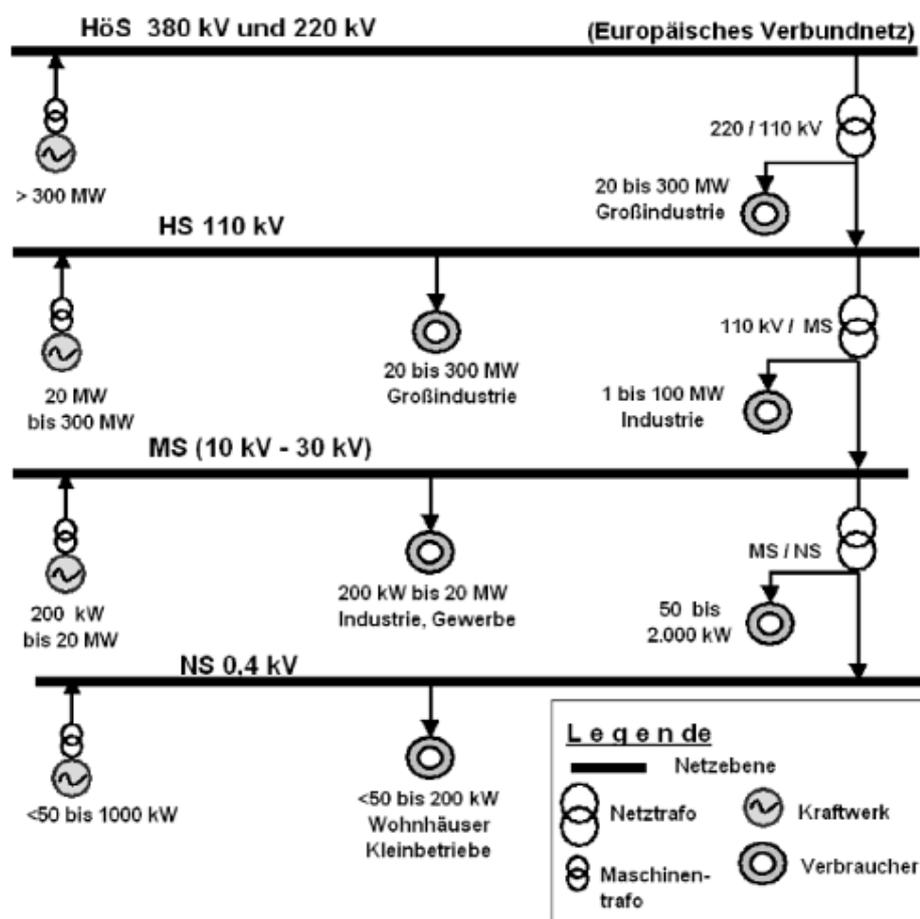
Das deutsche Energieversorgungsnetz ist als Verbundnetz aufgebaut. Das bedeutet, dass Kraftwerke über das gesamte Gebiet Deutschlands miteinander verbunden sind. Beim Ausfall eines Kraftwerks oder bei einem Verbrauchsanstieg wird die Versorgung zunächst durch die Erhöhung der Leistung der in Betrieb befindlichen Kraftwerke und danach durch den Einsatz von Spitzenlast- oder Reservekraftwerken sichergestellt.

Beim Transport des Stroms vom Kraftwerk zum Verbraucher treten Verluste auf. Z.B. fällt die Spannung durch den Ohmschen Widerstand entlang der Stromleitung ab. Ein Teil der eingespeisten elektrischen Leistung geht daher als Stromwärmeverluste an die Umgebung verloren. Die Verluste zeigen sich proportional zur Leitungslänge und quadratisch zur Stromstärke. Bei der Übertragung der gleichen elektrischen Leistung über eine Leitung fließt mit höherer Spannung ein proportional kleinerer Strom. Die Verlustarbeit nimmt dann quadratisch mit der verringerten Stromstärke ab.

Um elektrische Energie über weite Strecken verlustarm zu transportieren, werden diese auf hohe Spannungen transformiert. In Europa geschieht dies in der Höchstspannungsebene bis zu 380 kV. Bis zum Haushaltskunden im Verteilnetz wird die Spannung wieder heruntertransformiert und ist am Hausanschlusskasten mit 400V zwischen den Außenleitern bzw. 230 V zwischen einem Außen- und dem Neutralleiter verfügbar.

Das Übertragungs- und Verteilnetz besteht aus mehreren Netzebenen mit verschiedenen Betriebsspannungen. Im Allgemeinen wird zwischen den 4 Netzebenen unterschieden:

- Höchstspannungsnetz mit Spannungen von 220 kV und 380 kV
- Hochspannungsnetz mit Spannungen zwischen >60-110 kV
- Mittelspannungsnetz mit Spannungen von  $\geq 5$ - $\leq 60$  kV
- Niederspannungsnetz mit einer Spannung von 0,4 kV.



Quelle: [40]

Abbildung 4-2 Prinzipschaltbild des Verbundnetzes

Im Höchstspannungsnetz wird die elektrische Energie über weite Entfernungen und überregional von Großkraftwerken zu Umspannstationen in der Nähe von Ballungsräumen transportiert. In den Umspannstationen wird die Spannung auf die Hochspannung transformiert und von dort aus meist mit 110 kV weiter regional verteilt. In Umspannstationen, die mit 110 kV gespeist werden, wird die Spannung auf die Mittelspannungs-Netzebene, also i.d.R. auf 10-30 kV, transformiert. Von dort aus wird der Strom innerhalb von Stadt- oder Landbezirken verteilt. In Ortsnetzstationen wird die Mittelspannung auf 400 V transformiert. Hier in der Niederspannungsebene werden umliegende Häuser und Gewerbebetriebe insgesamt bis zu einem Leistungsbedarf von 630 kW versorgt [40].

## 4.1 Pflichten der Netzbetreiber

Nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) sind die Netzbetreiber dazu verpflichtet im Interesse der Allgemeinheit den Betrieb der Versorgungsnetze so zu gewährleisten, dass eine sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche Versorgung mit Elektrizität gegeben ist. Um die Qualität der Stromversorgung zu sichern, sind die Netzbetreiber dazu verpflichtet, folgende Systemdienstleistungen bereitzustellen [41]:

- Frequenzhaltung
- Spannungshaltung
- Betriebsführung
- Versorgungswiederherstellung nach Störungen.

Die Kosten, die den Netzbetreibern im Rahmen dieser Systemdienstleistungen entstehen, werden in Form von Netznutzungsentgelten den Kunden in Rechnung gestellt. Die Frequenzhaltung ist Aufgabe des Übertragungsnetzbetreibers in seiner Regelzone. Die übrigen Systemdienstleistungen liegen im Aufgabenbereich der Betreiber von Übertragungs- und Verteilnetzen [40].

## 4.2 Das Ortsnetz Kortüms Esch

In dieser Arbeit soll eine möglichst praxisnahe Betrachtung durchgeführt werden. Die Berechnungen und Simulationen, die in den folgenden Kapiteln durchgeführt werden, basieren auf den Daten aus dem Ortsnetz Kortüms Esch. Dieses Ortsnetz befindet sich in der Gemeinde Rosendahl-Darfeld, einer ländlich strukturierten Gemeinde im Kreis Coesfeld mit ca. 3000 Einwohnern. Die Gemeinde gehört zum Regierungsbezirk Münster, Bundesland Nordrhein-Westfalen [42].

Das Ortsgebiet ist ein mit der Zeit natürlich gewachsenes Gebiet. Es ist hauptsächlich gekennzeichnet durch Wohnbebauung. Die Bausubstanz ist unterschiedlich. Es sind sowohl Neubauten als auch ältere Gebäude zu finden, die vor dem zweiten Weltkrieg errichtet wurden.

In Abbildung 4-3 ist die Ortsnetzstation für das angesprochene Niederspannungsnetz abgebildet. In dieser Ortsnetzstation wird die elektrische Energie aus der Mittelspannung mit 10 kV auf 400 V transformiert. Der verbaute Transformator besitzt eine Kapazität von 400 kVA und nutzt als Isolierstoff bzw. Kühlmittel Mineralöl. An den vier abgehenden Versorgungsleitungen werden in dem Ortsnetz in der jetzigen Ausbaustufe 56 Hausanschlüsse an das Stromnetz angebunden.

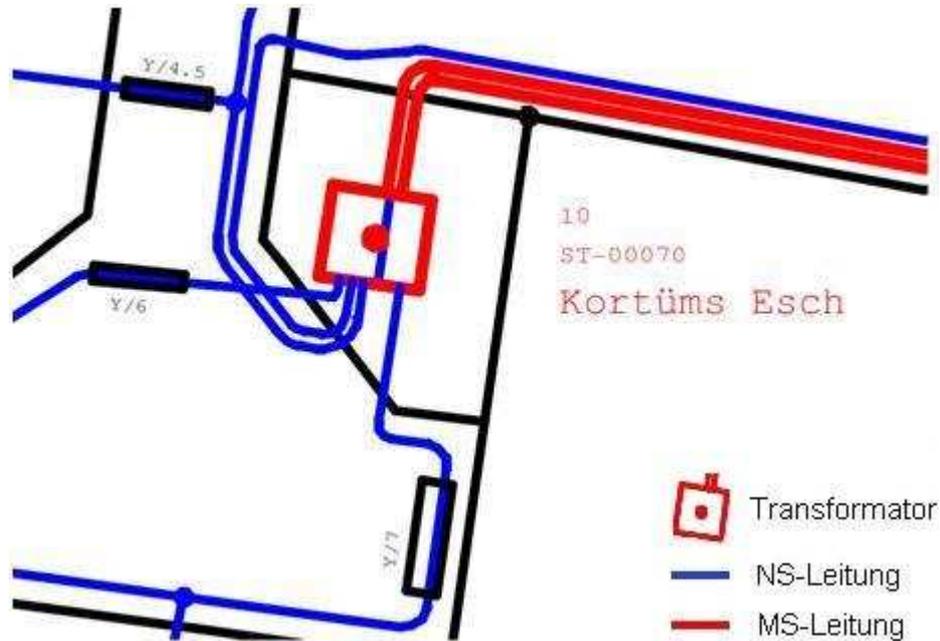


Abbildung 4-3 Die Ortsnetzstation Kortüms Esch

Quelle: RWE

Diese gewachsene Struktur zeigt sich auch in den verlegten Leitungen. Hauptsächlich werden Nackley- und VPE-Kabel, die als Leitermaterial Aluminium nutzen, verwendet. Auf einzelnen Strecken sind aber auch Erdkabel verlegt, deren Leitermaterial aus Kupfer besteht. Diese Art von Erdkabeln wird schon seit Jahrzehnten nicht mehr verbaut.

An der Ortsnetzstation wurde im Zeitraum vom 01.12.-08.12.2010 eine Leistungs- und Spannungsmessung durchgeführt. Diese Daten bilden die Grundlage für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen.

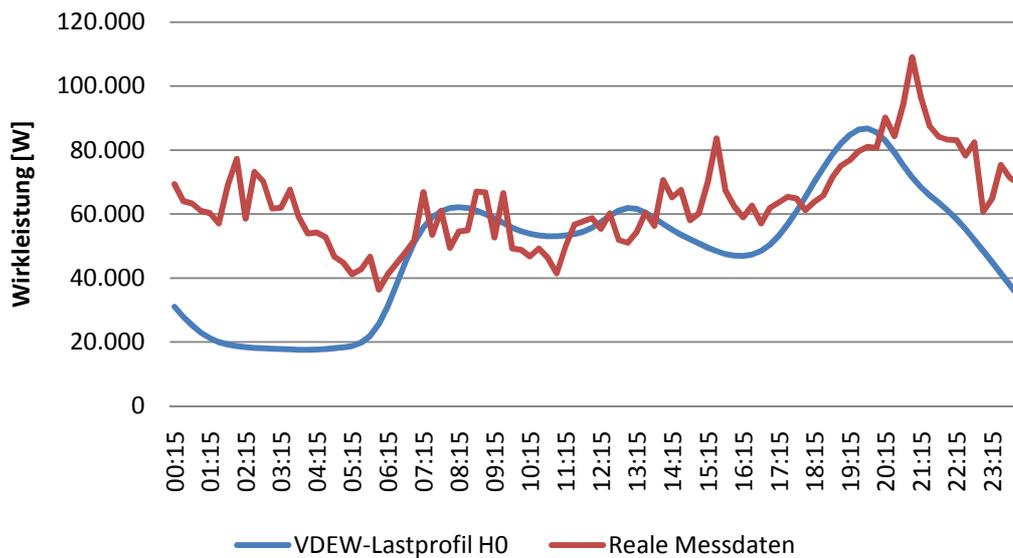
## 5. Untersuchung der Auswirkungen der Elektromobilität auf das NS-Netz

Wie bereits in den vorigen Kapiteln beschrieben, bietet die Elektromobilität viele Vorteile. Weltweit werden diesbezüglich Entwicklung und Forschung unter enormen Anstrengungen vorangetrieben. Diverse Prognosen aus Politik, Industrie und Wissenschaft zeigen, dass bereits im Jahr 2020 Elektroautos auf den Straßen Deutschlands keine Seltenheit mehr sein werden. Gleichzeitig mit der Veränderung der Mobilität wird sich auch die Infrastruktur der Energieverteilung verändern. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge werden nicht wie bisher üblich ihre Energie bei einem kurzen Stopp an der Tankstelle aufnehmen. Sie werden, zumindest während der Zeit der Batterieladung, Teil des öffentlichen Stromversorgungsnetzes und beziehen aus diesem die nötige Energie.

Ein wichtiges Ziel dieser Untersuchung ist herauszufinden, welche möglichen Auswirkungen das steigende Aufkommen der Elektromobilität auf die Verteilnetze in der Niederspannungsebene haben kann. Um eine möglichst praxisnahe Betrachtung durchzuführen, basiert das in den folgenden Untersuchungen zugrunde gelegte Niederspannungsnetz auf dem bereits beschriebenen Ortsnetz in Rosendahl-Darfeld, welches über die Ortsnetzstation Kortüms Esch versorgt wird. Die durchgeführte Messung zeigt, dass in der momentanen Ausbaustufe des angebundenen Netzes der installierte Transformator zu maximal 27,25 % belastet ist. Erfahrungswerte aus dem Netzbetrieb besagen allerdings, dass für ähnliche Gemeinden in der Regel Teilnetze in doppelter Größe existieren. Aufgrund dieser Erfahrungswerte werden die an die Ortsnetzstation Kortüms Esch angebundenen Verbraucher fiktiv dupliziert. Diese getroffene Annahme ist sinnvoll, um eine möglichst praxisnahe Betrachtung durchzuführen. Gleichzeitig behalten die gemessenen Werte in hohem Maße ihre Richtigkeit und geben die Möglichkeit, Berechnungen und Simulationen auf einer möglichst realen Basis durchzuführen.

Eine Möglichkeit, Berechnungen auch ohne vorliegende Messwerte durchzuführen, besteht darin, den angeschlossenen Verbrauchern die Eigenschaften eines Standardlastprofils zuzuweisen. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW: Fusion von 5 Einzelverbänden u. a. VDEW, Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.) bietet hierzu standardisierte Lastprofile an. Da in dem ausgewählten Niederspannungsnetz Haushalte den überwiegenden Verbrauchsanteil bilden, ist das Lastprofil H0 hier zu verwenden. Dieses Lastprofil ist repräsentativ für übliche Haushalte und solche mit elektrisch geringfügigem gewerblichem Bedarf [43].

In der Abbildung 5-1 sind das VDEW-Standardlastprofil H0 und die an der Ortsnetzstation gemessenen Werte gegenübergestellt. Es lassen sich deutlich Übereinstimmungen der beiden Lastverläufe erkennen. Charakteristisch zeigt das Standardlastprofil die Lastspitzen am Morgen gegen 08:00 Uhr, am Mittag um 13:00 Uhr und vor allem am Abend kurz vor 20:00 Uhr. Der Verlauf, basierend auf den gemessenen Werten, ist durchaus mit dem Standardlastprofil vergleichbar. In weiten Teilen verlaufen die Lasten simultan. Unterschiede lassen sich in einer Verschiebung der Lastspitzen erkennen. Die gemessenen Lastmaxima sind hier vom Mittag weiter in den Nachmittag auf 15:00 Uhr und in den Abendstunden um eine Stunde auf 21:00 Uhr verschoben.



**Abbildung 5-1 Darstellung der Lastprofile für einen Werktag**

Auffällig ist eine deutliche Abweichung der Lastverläufe in den Nachstunden. In der Zeit von 23:00-04:00 Uhr fällt beim Standardlastprofil die abgenommene Last des Verbrauchers auf ca. 20 % des maximalen Tageswertes. Die Messwerte zeigen hier ein unkonventionelles Verhalten und die Last bleibt auf einem konstant hohen Niveau von etwa 60 kW, wie er auch im Nachmittag zu sehen ist. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dies darauf zurückzuführen, dass in einigen der im Gebiet des Niederspannungsnetzes angeschlossenen Wohneinheiten elektrische Speicherheizungen in Betrieb sind. Diese sind in dem Standardlastprofil H0 nicht berücksichtigt. Eine elektrische Speicherheizung ist eine mit elektrischem Strom betriebene Heizung, bei der der Wärmespeicher in den Schwachlastzeiten des Versorgungsnetzes aufgeheizt wird. Dieser Heizungstyp war speziell in den 1950-1960er Jahren eine Alternative zu Kohle- und Ölöfen und durch das Angebot spezieller Nachtstromtarife in ihrer Wirtschaftlichkeit interessant. Das ausgewählte Ortsgebiet ist ein natürlich gewachsenes und stetig erweitertes Gebiet, das durchaus Bausubstanz aus den 1950er Jahren und aus davorliegender Zeit beinhaltet.

Der Vergleich der beiden vorgestellten Lastprofile lässt erkennen, dass reale Lastgänge durchaus von den Standardlastprofilen abweichen können. Dass für die folgenden Berechnungen und Simulationen reale Daten vorliegen, ist wegen der möglichst praxisnahen Untersuchung von wesentlichem Vorteil.

## 5.1 NEPLAN

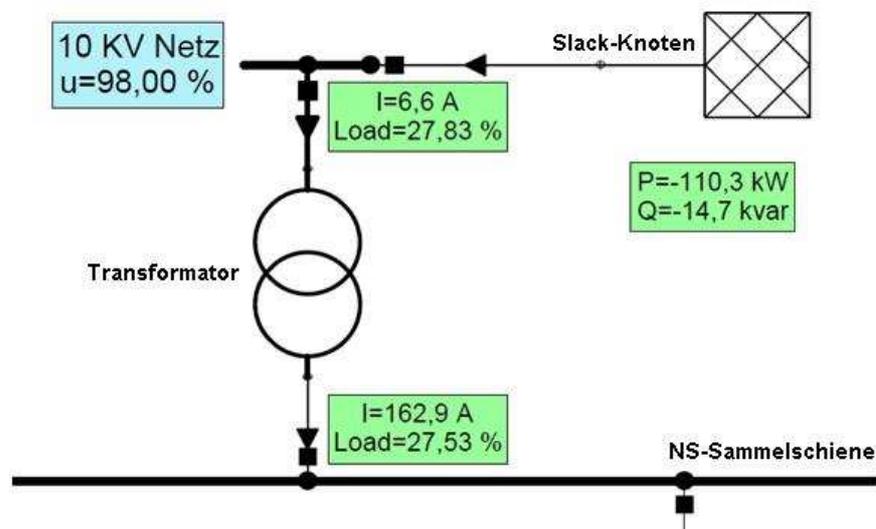
Aus den im Voraus ermittelten Lastzuständen lassen sich die Zeitpunkte, bei denen eine genauere Betrachtung sinnvoll erscheint, weiter untersuchen. Da zunächst nur die gesamte Leistung ermittelt wird, lässt sich aus diesen Werten lediglich auf die Betriebsbelastung des Transformators schließen. Dennoch ist diese Untersuchung essentiell und gibt einen Überblick darüber, wie sich der Lastverlauf des Niederspannungsnetzes, beeinflusst durch die zusätzliche elektrische Last, ändert. Um Belastungen und Betriebszustände der übrigen Netzelemente zu ermitteln, wird in dieser Arbeit auf die Software NEPLAN zurückgegriffen. Der Besitzer und Entwickler dieser

Software ist die BCP Busarello + Cott + Partner AG, die im Jahr 1988 in der Schweiz gegründet wurde und auf dem Gebiet der elektrischen Energieversorgung spezialisiert ist. Es ist eines der führenden Unternehmen im Netz-Software-Engineering [44].

NEPLAN ist ein professionelles System-Analyse-Tool und dient der Analyse, Planung, Optimierung und Verwaltung elektrischer Energieversorgungsnetze sowie Gas- und Wassernetze. NEPLAN wird bei Energieversorgungs-, Industrieunternehmen, Ingenieurbüros und Universitäten international in mehr als 80 Ländern verwendet.

In NEPLAN wird das zugrunde gelegte Niederspannungsnetz in schematischer Darstellung nachgebildet. Bei der Erstellung der Abbildung des Niederspannungsnetzes wurde explizit darauf geachtet, möglichst alle bekannten Parameter und Eigenschaften dieses Netzes mit zu übernehmen. Exemplarisch sind für die Niederspannungskabel die Leitungslängen, der Querschnitt und die weitere Spezifikationen wie Kabeltyp, Reaktanz und maximaler Bemessungsstrom hinterlegt. Abbildung 5-3 zeigt, wie das Ortsnetz in NEPLAN schematisch abgebildet ist.

Durch das möglichst genaue Hinterlegen der beschriebenen Eigenschaften zeigt eine durchgeführte Simulation, dass eine lediglich eine geringe Abweichung der errechneten Werte zu den Messwerten festzustellen ist. Verglichen wird der Betriebswert vom Donnerstag, dem 02. Dezember 2010, 20:50 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt wurde der maximale Wert für die abgenommene Wirkleistung gemessen. Festgehalten wurden 109,02 kW Wirkleistung (P) und 14 kvar Blindleistung (Q). Die Lastflussrechnung mit NEPLAN ergibt eine am Transformator abgenommene Leistung von 110,3 kW und 14,7 kvar (vgl. Abbildung 5-2). Dies zeigt, dass eine Abweichung der Werte unter 5 % gegeben ist. Aus den bereits dargelegten Gründen wird das Ortsnetz, das in seiner jetzigen Ausbaustufe 56 Hausanschlüsse beinhaltet, auf 112 Anschlüsse dupliziert.



**Abbildung 5-2 Schematische Darstellung der Ortsnetzstation in NEPLAN**

Es wird angenommen, dass der Sollwert der Spannung am Slackknoten zu 98 % des Nennwertes zur Verfügung steht. Hiermit werden die Verluste im Mittelspannungsnetz und bei der Transformation berücksichtigt.

Mit der NEPLAN-Vorlage besteht die Möglichkeit, Betriebszustände des Niederspannungsnetzes während eines Zeitpunktes zu simulieren. Insbesondere von Bedeutung sind die Ergebnisse für den Spannungsfall und die Auslastung der Netzelemente.

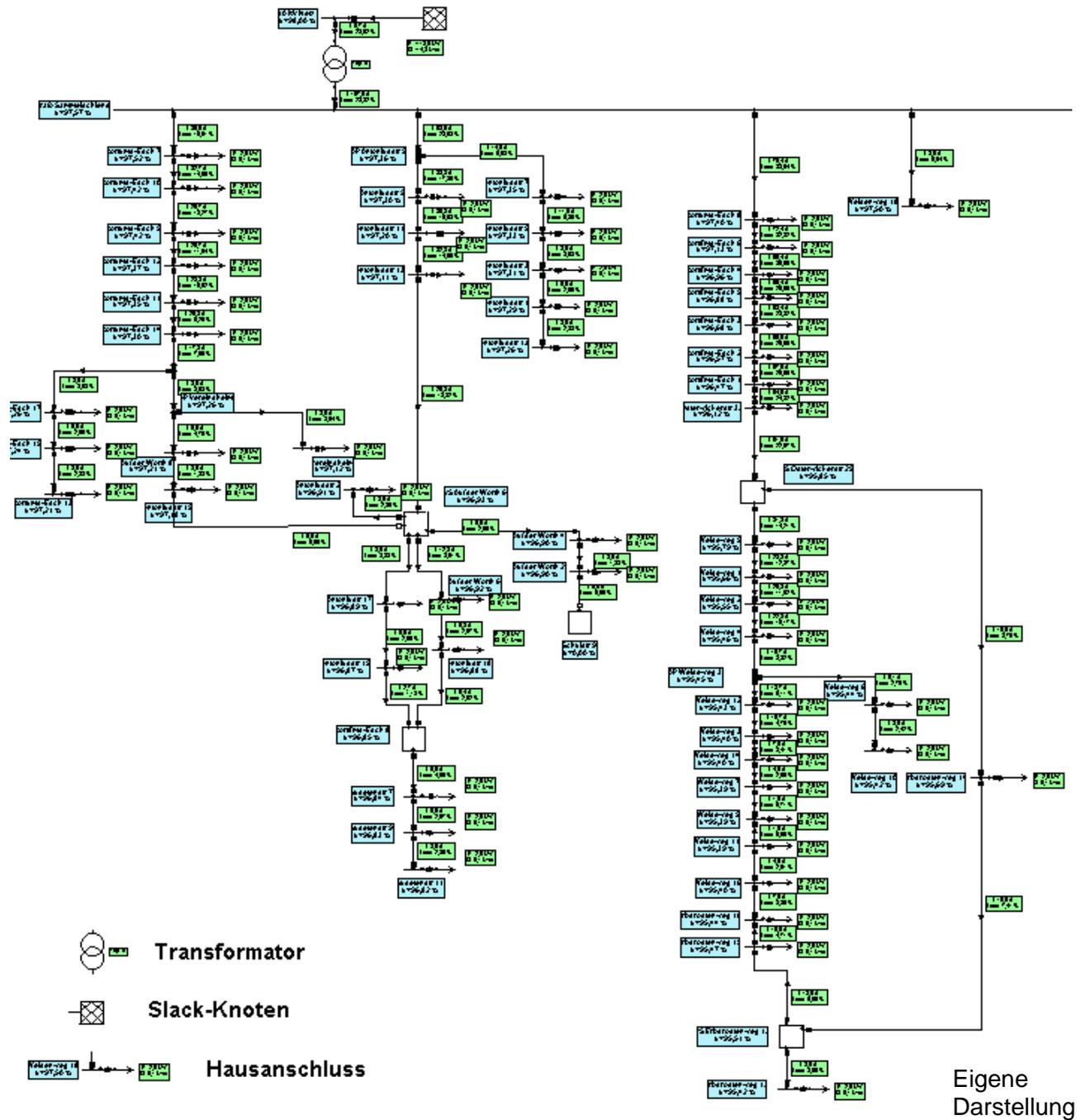


Abbildung 5-3 Schematische Darstellung des Ortsnetzes in NEPLAN

Die Lastflussberechnung mit NEPLAN erfolgt nach dem Newton-Raphson-Verfahren, welches nachfolgend beschreiben wird.

Zunächst definiert man entsprechend einem Zweigersatzschaltbild für den beliebigen Zweig (ik)

$$Y_{ik}^{(b)} = \text{Zweiglängsadmittanz}$$

$$Y_{ik}^{(o)} = \text{Zweigquersadmittanz}$$

Sämtliche vorkommenden Größen in Bezug auf die Lastflussberechnung sind komplex; auf das Unterstreichen der Variablen wird daher Einfachheit halber verzichtet. Für die Zweigströme gilt die Beziehung:

**Formel 5**

$$I_{ik} = Y_{ik}^{(b)} (U_i - U_k) + \frac{1}{2} Y_{ik}^{(o)} U_i = \left( Y_{ik}^{(b)} + \frac{1}{2} Y_{ik}^{(o)} \right) U_i - Y_{ik}^{(b)} U_k$$

Des Weiteren gilt für die Knotenpunktströme:

**Formel 6**

$$I_i = \sum_1^n I_{ik}$$

Kombiniert man nun diese Gleichungen, folgt:

**Formel 7**

$$I_i = U_i \sum_1^n \left( Y_{ik}^{(b)} + \frac{1}{2} Y_{ik}^{(o)} \right) - \sum_1^n Y_{ik}^{(b)} U_k$$

Durch die Einführung folgender Knotenpunktadmittanzen lässt sich diese Beziehung vereinfachen:

**Formel 8**

$$Y_{ii} = \sum_1^n \left( Y_{ik}^{(b)} + \frac{1}{2} Y_{ik}^{(o)} \right)$$

**Formel 9**

$$Y_{ik} = -Y_{ik}^{(b)} \quad \text{für } k \neq i$$

Es ergibt sich:

**Formel 10**

$$I_i = Y_{ii} U_i + \sum_1^n Y_{ik} U_k = \sum_{k=1}^n Y_{ik} U_k \quad , \quad i = 1 \dots n$$

oder in Matrixform:

**Formel 11**

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{nm} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ U_n \end{pmatrix}$$

Liegt ein Netz mit  $n$  Knotenpunkten vor, erhält man also eine  $(n \times n)$ -Matrix mit komplexen Koeffizienten. Durch diese Knotenpunktadmittanzmatrix wird das Netz vollständig beschrieben [38 S. 399].

Zur praktischen Auflösung des nichtlinearen Systems wird das Verfahren von Newton-Raphson angewandt. Dieses Verfahren geht von der folgenden Fehlergleichung für den Netzknoten  $i$  aus:

**Formel 12**

$$\Delta S_i = (P_i - j \cdot Q_i) - U_i \cdot \sum_1^n Y_{ik} U_k$$

Die komplexen Spannungen  $U_k$  sind so zu ermitteln, dass der Fehler  $\Delta S_i$  Null wird.  $P_i$  und  $Q_i$  stellen die Vorgabeleistung und die Vorgabeblindleistung dar.  $Y_{ik}$  sind die Elemente der Y-Matrix in der  $i$ -ten Zeile und der  $k$ -ten Kolonne. Durch die folgenden drei Schritte erfolgt die Lösung der obigen Fehlergleichung:

- Berechnung der Leistungsfehler aller Knoten mit Hilfe der Knotenspannungen:

**Formel 13**

$$\Delta S_i = S_{vor_i} - S_{ber_i}$$

- Berechnung der Spannungsänderungen aller Knoten mit Hilfe der Jacobi-Matrix (J):

**Formel 14**

$$\Delta U = J^{-1} \cdot \Delta S$$

- Berechnung der neuen Knotenspannungen:

**Formel 15**

$$U_{neu_i} = U_{alt_i} - \alpha \cdot \Delta U_i$$

Die drei Iterationsschritte werden so lange durchlaufen, bis das Abbruchkriterium

**Formel 16**

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n |\Delta S_i|$$

den zu erreichenden Wert unterschreitet [45].

Leitungen haben die Aufgabe, elektrische Energie möglichst unverändert in Größe und Qualität über kurze oder weite Strecken zu übertragen und zu verteilen. Eine Übertragung mit einer idealen Leitung würde die Leistung, Spannung und Phase des Stroms unverändert lassen. Eine reale Leitung bewirkt bei der üblichen Ohmsch-induktiven Belastung eine Abnahme des Spannungsbetrages (Spannungsfall), ein Nacheilen der Spannungsphase und ein Absorbieren der Wirk- und Blindleistung. Das zu untersuchende Ortsnetz ist als Strahlennetz mit einer schwachen Vermaschung und mit einer Einspeisung, dem Slackknoten, aufgebaut. Unter diesen Voraussetzungen gibt es

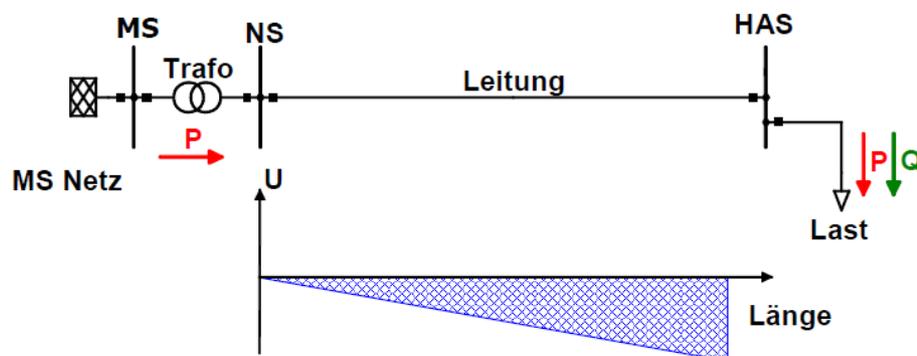
keine wesentlichen Unterschiede zwischen den oben beschriebenen Lastfluss-Verfahren. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass unsymmetrische Netze besser behandelt werden, da hier keine Knotenadmittanz-Matrizen aufgestellt werden.

Die Spannungsfallberechnung erfolgt folgendermaßen: Ausgehend vom Einspeiseknoten wird die insgesamt verbrauchte Wirk- und Blindleistung ermittelt. Mithilfe der Spannung am einspeisenden Knoten ( $U_{SI}$ ) und der gesamt verbrauchten Leistung kann die Spannung in einem bestimmten Knoten ( $U_{k1}$ ) berechnet werden:

Formel 17

$$U_{k1} = U_{SI} - Z_L \cdot \frac{S_1}{U_{SI}}$$

Die Variable  $Z_L$  steht für die Impedanz der Leitung. Die komplexe Leistung durch die Leitung vom Slackknoten zum betrachteten Knoten ist mit  $S_1$  beschrieben. Beispielhaft ist dies in Abbildung 5-4 beschrieben.



Quelle: TU München

Abbildung 5-4 Spannungsfall bei Übertragung von Elektrizität

## 5.2 Die Gleichzeitigkeit als ein relevantes Element der Lastflussberechnung

Der Gleichzeitigkeitsgrad der Ladezeiten von Elektrofahrzeugen ist für die Bestimmung der Lastverläufe und so für die Untersuchung der Auswirkungen auf das Verteilnetz von hoher Wichtigkeit. Eine genaue Betrachtung der Gleichzeitigkeitsfaktoren ist für diese Arbeit unausweichlich. Nachfolgend wird die Herangehensweise an diese Problematik beschrieben.

Die installierte Leistung ( $P_{inst}$ ) eines Abnehmers ist gleich seinem Anschlusswert und die installierte Leistung einer Abnehmergruppe ist gleich der Summe der Anschlusswerte aller Abnehmer der Gruppe:

Formel 18

$$P_{inst} = \sum_i P_{a_i}$$

Die installierte Leistung darf aber nicht ohne weiteres mit der Leistung der auch tatsächlich eingeschalteten Abnehmer gleichgesetzt werden. Das elektrische Energieversorgungssystem wäre mit Sicherheit hoch überlastet, wenn alle angeschlossenen Verbraucher gleichzeitig eingeschaltet wären. Das Verhältnis der maximalen zur installierten Leistung wird mit dem Bedarfskoeffizienten  $k_c$  beschrieben.

Formel 19

$$k_c = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inst}}} \leq 1$$

Der Gleichzeitigkeitsgrad  $k_g$  ist definiert als das Verhältnis zwischen der Summe der Einzelhöchstleistungen der Abnehmergruppe zur tatsächlichen maximalen Belastung.

Formel 20

$$k_g = \frac{P_{\max}}{\sum_i P_{\max_i}} < 1$$

Für gängige Abnehmergruppen sind Gleichzeitigkeitsgrade hinterlegt. Diese Werte sind durch empirische Untersuchungen bestimmt worden. Es ist allerdings zu beachten, dass sich diese Werte ändern können, wenn sich z.B. Verbrauchsgewohnheiten ändern. Dies ist beispielsweise durch eine Veränderung der Arbeitszeiten, der Ausstattung mit Elektrogeräten, der Nutzungsgewohnheiten oder durch neue Technologien in der Industrie möglich. Um Unsicherheiten in der Planung gering zu halten, ist eine ständige Aktualisierung der Werte notwendig.

Zusammenfassend gilt die Aussage, dass die Gleichzeitigkeit mit zunehmender Anzahl

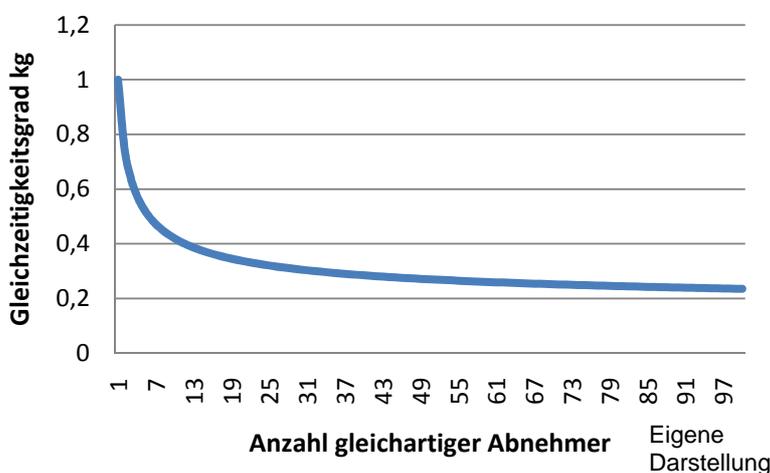


Abbildung 5-5 Verlauf des Gleichzeitigkeitsgrades  $k_g$

gleichartiger Verbraucher zunächst abnimmt und von einer bestimmten Anzahl an einen konstanten Wert, den sog. Sättigungswert, erreicht. Verdeutlicht wird dieser Verlauf in Abbildung 5-5. Bei dem dargestellten Beispiel wird deutlich, wie schnell sich der Gleichzeitigkeitsgrad verringert. Übertrifft die Verbrauchergruppe eine Anzahl von 20 Einheiten, verringert sich der Gleichzeitigkeitsgrad auf ein Drittel seines Anfangswertes. Der Gleichzeitigkeitsgrad strebt gegen den hier angenommenen Sättigungswert von 0,2.

Ist der Gleichzeitigkeitsgrad  $k_{g\infty}$  für eine genügend große Zahl gleichartiger Verbraucher bekannt, gilt für eine endliche Anzahl  $n$  dieser Verbraucher die empirisch gefundene Näherungsformel [46]:

**Formel 21**

$$k_g = k_{g\infty} + \frac{1 - k_{g\infty}}{\sqrt{n}}$$

Die Belastung der Elektrofahrzeuge auf das Energieversorgungsnetz erfolgt durch die Ladung der Akkumulatoren. Während der Ladezeit nimmt das Fahrzeug elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz auf und speichert diese.

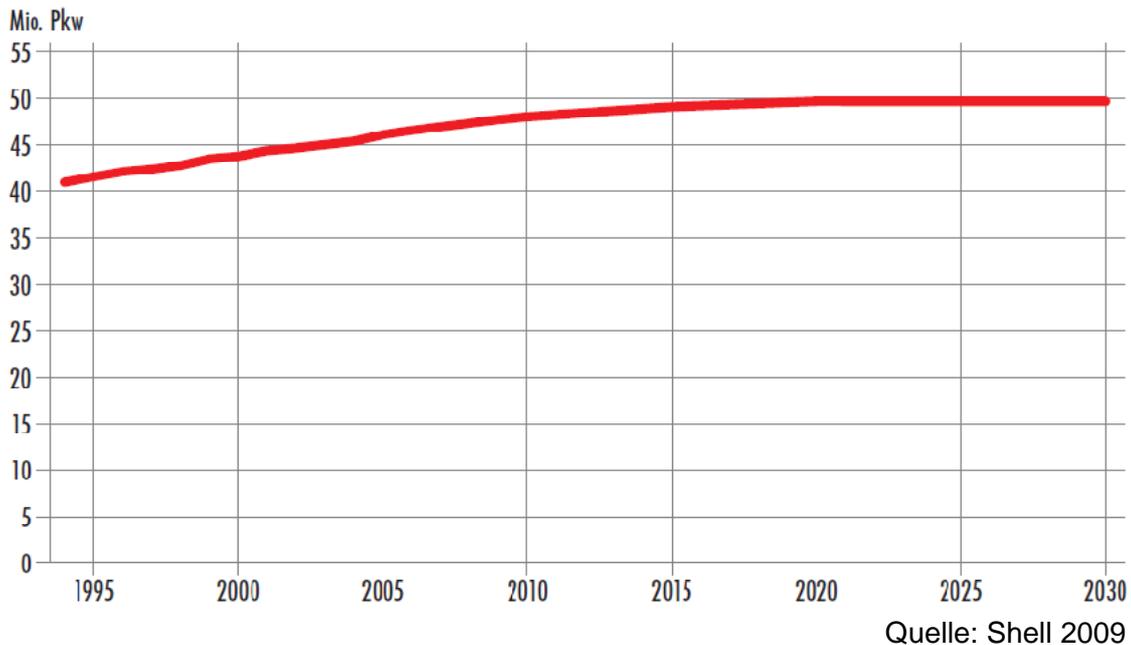
Aufgrund einer momentanen noch sehr geringen Verbreitung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist eine empirische Datenerhebung zum Ladeverhalten nicht möglich. Aus diesem Grund existieren zum jetzigen Zeitpunkt keine offiziellen Gleichzeitigkeitswerte für die Ladezeiten von Elektrofahrzeugen. Um in dieser Arbeit auf möglichst genaue und repräsentative Ergebnisse zu schließen, wird im Folgenden versucht, Gleichzeitigkeitsgrade der Ladezeiten zu bestimmen.

Die Gleichzeitigkeit der Batterieladung bei Elektrofahrzeugen wird durch die aufgelisteten Eigenschaften beeinflusst:

- die Durchdringung der Elektromobilität
- die zur Verfügung stehende Ladeleistung
- das Mobilitätsverhalten der Elektromobilitäts-Nutzergruppen.

Die Durchdringung der Elektromobilität beschreibt, wie weit sich Elektroautos im Verhältnis zu konventionellen Fahrzeugen verbreiten; konkrete Prognosen und Zahlenwerte wurden bereits im Kapitell „Entwicklungspotentiale und Chancen für die Elektromobilität“ beschrieben. Die dort beschriebenen Prognosen nennen Werte, die sich meist auf das komplette Bundesgebiet Deutschlands beziehen.

Zu berücksichtigen ist hier die Entwicklung des PKW-Bestandes in der Bundesrepublik. Dazu wird eine Studie der Shell Deutschland GmbH herangezogen. Bereits seit 1958 beobachtet Shell die Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs. Die zuletzt erschienene Version der Shell PKW-Szenarien-Studie, die die 25. Ausgabe darstellt, betont den engen Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsentwicklung und der PKW-Mobilität. Die Einwohnerzahl wird bis zum Jahr 2030 um ca. 3,7 Mio. auf 78,5 Mio. Einwohner zurückgehen. Gleichzeitig schreitet der demografische Wandel der Gesellschaft weiter voran: Der Anteil der über 65-Jährigen wird von heute 20 % auf 28 % steigen und der Anteil der unter 20-Jährigen wird von 19 % auf 16 % sinken. Das Ergebnis der Studie ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Der gesamte PKW-Bestand wird von heute 47 Mio. Fahrzeugen auf 49,5 Mio. im Jahr 2030 steigen [47].



**Abbildung 5-6 Shell PKW-Szenarien im Zeitraum von 1995 - 2030**

Wenn hypothetisch für das Jahr 2030 die Zahl von 10 Mio. Elektrofahrzeugen prognostiziert wird, ist es möglich, diesen Wert zu dem ausgewählten Ortsgebiet in Rosendahl-Darfeld Ortsgebiet in Beziehung zu bringen und auf die Anzahl der Elektrofahrzeuge zu schließen.

### 5.3 Die elektrische Leistung für den Ladevorgang

Gleichermaßen wichtig für die Bestimmung des Gleichzeitigkeitsfaktors ist hier die zum Laden zur Verfügung stehende elektrische Leistung. Das wird anschaulich bei der Betrachtung eines simplen Beispiels. Will man eine Batterie mit einer Kapazität von 30 kWh vollständig und ohne Verluste laden, stehen dazu verschiedene Systeme mit unterschiedlicher installierter Leistung zur Verfügung. Ist ein geeignetes Stecksystem vorhanden, ist es ohne technischen Aufwand möglich die Batterie über die übliche Hausanschlussbuchse zu laden. Dies würde bedeuten, man lädt die Batterie über einen 1~ Wechselstrom mit einer effektiven Spannung von 230 V und üblicherweise 16 A Sicherung. Die Spannung, multipliziert mit der Stromstärke und einem Leistungsfaktor von eins ( $\cos\varphi = 1$ ), ergibt die Leistung von 3,68 kW. Um die ideale Batterie zu laden, wären mehr als acht Stunden nötig. Wahrscheinlicher ist die Anwendung einer Ladung mit 3~ Wechselstrom bzw. Drehstrom. Bei der gleichen Absicherung von 16 A steht hier eine Leistung von 11,1 kW zur Verfügung. Eine vollständige Ladung wäre so in einer Zeit von weniger als drei Stunden möglich. Erhöht man den Bemessungsstrom auf 32 A, ergibt sich eine Leistung zu 22,2 kW. In weniger als 90 min. wäre die Batterie geladen. Die Ladezeit lässt sich weiter reduzieren auf ca. 41 min. mit einer Leistung von 43,6 kW und 63 A. Reale Messwerte zeigen eine leichte Abweichung. Um eine Batterie auf 100 % Kapazität zu laden, wird eine elektrische Mehrarbeit nötig. Es gibt Verluste beim Ladevorgang, die z.B. durch die Temperatur bei der Ladung oder das Alter der Batterie beeinflusst werden [48].

Es ist unverkennbar, dass bei geringeren Ladeleistungen die benötigte Zeit für einen Ladevorgang steigt und proportional dazu auch der Gleichzeitigkeitsgrad wächst.

## 5.4 Deutung des Mobilitätsverhaltens

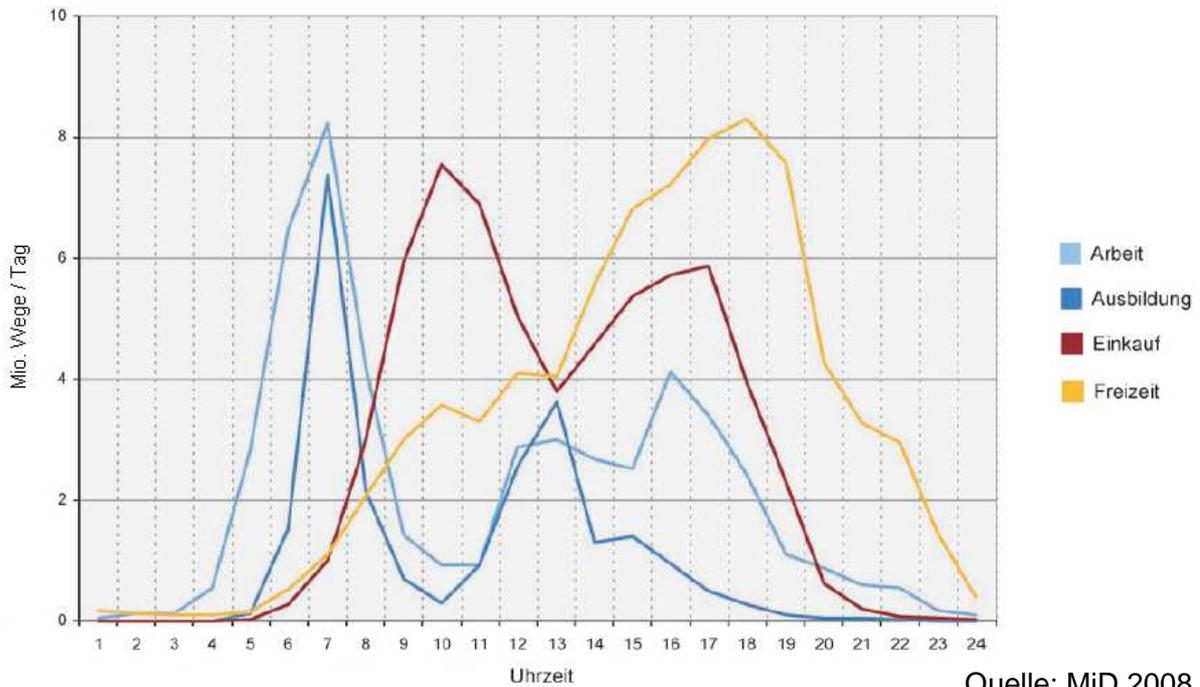
Eine weitere, äußerst wichtige, allerdings weniger exakt bestimmbare Eigenschaft ist das Ladeverhalten der Nutzer. Um diese Verhaltensweisen näher zu definieren, ist es zunächst notwendig, die potentiellen Nutzergruppen zu charakterisieren. Während der Verbreitungsphase sind Elektrofahrzeuge hoch innovative Produkte. Bei solchen neuen und innovativen Produkten besteht bei potentiellen Kunden auf Anhieb keine Motivation zum Kauf. Innovationen verlangen den Käufern meist eine Verhaltensänderung und Abkehr von Gewohnheiten ab. Aus diesem Grund besteht oft Skepsis gegenüber dem tatsächlichen Nutzen von Neuerungen [49 S. 451]. „Frühadopter“ sind die ersten Kunden, die die neuartigen Produkte kaufen. Sie sind innovationsfreudiger als der Großteil der Kunden. Sie sind meist technisch versiert und schätzen die Details des neuen Produktes. Sie sind meist jünger als der Durchschnitt der Kunden und verfügen über ein durchschnittliches bis überdurchschnittliches Einkommen [50 S. 47].

Transformiert man diese Eigenschaften auf mögliche frühe Nutzergruppen der Elektromobilität, so kommen vor allem Berufspendler als „Frühadopter“ in Frage. Auch im Hinblick auf die zunächst noch durch die Akkumulatorkapazität begründete, eingeschränkte Reichweite des Elektrofahrzeugs zeigt es bei strukturierten Fahrgewohnheiten des Nutzers seine Stärken. Die Berechnungen in dieser Arbeit basieren insgesamt auf einem hohen Anteil an Berufspendlern unter den Nutzern der Elektromobilität. Der konkrete Anteil wird jedoch vor jeder Simulation spezifisch betrachtet.

Nach dieser Eingrenzung ist es nötig, das Pendlerverhalten in Deutschland genauer zu betrachten; hierzu kann man der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD 2008) weitere Informationen entnehmen.

Diese Studie stellt eine Fortsetzung von Verkehrserhebungen, die seit den 1970er Jahren durchgeführt wurden, dar. Befragt wurden Privathaushalte mit dem Ziel, repräsentative Daten zum Alltagsverkehr der Bevölkerung zu erhalten. In den Jahren 1976, 1982 und 1989 wurden im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums Verkehrserhebungen in Westdeutschland (KONTIV) durchgeführt. Mit der Studie „Mobilität in Deutschland 2002“ knüpfte die erste gesamtdeutsche Verkehrsstudie an die KONTIV-Erhebungen an. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vergab den Auftrag über die Studie MiD 2008 an das Infas-Institut für angewandte Sozialwissenschaften in Bonn und an das DLR-Institut für Verkehrsforschung in Berlin. Zusätzlich zu den Daten aus der Studie MiD 2002 wurden in einer bundesweiten Erhebung die Angaben von 25.922 Haushalten und 60.713 Personen zu 193.290 Wegen, 34.601 Fahrzeugen und 36.182 Reisen erfasst. Darüber hinaus wurden 24.201 Aufstockungsstichproben realisiert [4].

Aus Abbildung 5-7 lassen sich wichtige Erkenntnisse zum Pendlerverhalten und zu anderen Wegzwecken ableiten. Dargestellt sind die Startzeiten an Werktagen beispielsweise für den Wegzweck „Arbeit“. Insgesamt zeigen sich die Spitzen des Verkehrsaufkommens sehr ausgeprägt in den Morgenstunden gegen 07:00 Uhr und im späten Nachmittag zwischen 15:00-18:00 Uhr. Die höchste Wegezähl fällt in der Zeit zwischen 16:00-17:00 Uhr an. Die abgebildeten Startzeiten in Kombination mit der durchschnittlichen Wegedauer von ca. einer halben Stunde [4 S. 148] geben einen guten Überblick über die potentiellen Ankunftszeiten Zuhause.



Quelle: MiD 2008

### Abbildung 5-7 Startzeiten der Wege nach Wegezwecken von Montag bis Freitag

Die durchschnittliche Fahrtstrecke bei regelmäßigen beruflichen Wegen beträgt für den Stichtag ca. 80 km. Es sei angenommen, dass ein Elektrofahrzeug 20 kWh/100km verbraucht. Hinzu kommt an Wintertagen ein zusätzlicher Verbrauch durch beispielsweise Scheibenheizung oder Wärmezeugung. Für die folgenden Berechnungen wird ein Basisenergiebedarf von 20 kWh/100km angenommen.

Ferner sei betont, dass sämtliche Berechnungen und Simulationen auf dem Prinzip des „Ankommens und Ladens“ basieren. Direkt nach Ankunft wird das Elektrofahrzeug an eine Stromquelle angeschlossen und der Ladevorgang beginnt.

Zur Bestimmung der Gleichzeitigkeitsgrade sind alle nötigen Informationen herausgestellt. Am Beispiel von 10 Fahrzeugen und einer Ladeleistung von 3,7 kW soll das angewandte Verfahren zur Bestimmung der Gleichzeitigkeit der Batterieladung erörtert werden.

Um den Startpunkt und die Dauer der Ladung darzustellen, wird eine Matrix erzeugt. Diese bildet in jeder Spalte eine Stunde des Tages und in jeder Zeile ein Fahrzeug ab. Es ergibt sich eine 24 x 10 Matrix. Um den Startpunkt der Ladung zu setzen, muss für jedes abgebildete Fahrzeug ein fiktives Nutzerprofil hinterlegt werden. Aus oben genannten Gründen würde das bedeuten, dass 8 der 10 Autos Pendlern mit dem Wegzweck „Arbeit“ zugeordnet werden. Die Ladezeit würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen 16:00-20:00 Uhr beginnen, 2 der 10 Fahrzeuge wurden anderen Wegzwecken zugeordnet. Die Ladedauer würde im verlustfreien System und bei 3,6 kW Leistung 5,4 Stunden andauern. Real ist mit einer elektrischen Mehrarbeit zu rechnen, sodass es sinnvoll ist, die Zeit auf 6 Stunden aufzurunden [48]. Beispielhaft würde so für Fahrzeug 1 der Startpunkt der Ladung auf 18:00 Uhr gesetzt und in der Matrix würden die folgenden 6 Stunden als Ladezeit markiert. Dem Fahrzeug 2 würde ein Ladestart um 16:00 Uhr mit der entsprechenden Zeitmarkierung zugeordnet. Nach dieser Art und Weise sind für jedes der 10 Fahrzeuge die Ladezeiten in der Matrix zu markieren. Aus der Summe der in einer Spalte markierten Zellen, dividiert durch die Anzahl der Fahrzeuge, ergibt sich der Gleichzeitigkeitsgrad. Diese Methode hat den

Vorteil, dass für jeden Tag 24 Gleichzeitigkeitswerte ermittelt werden. So zeichnen sich Zeiträume des Tages mit der Tendenz zu erhöhten Gleichzeitigkeiten ab.

Noch vor einer genauen Berechnung der Gleichzeitigkeitsgrade sollte man die Abbildungen 5-1 und 5-7 gegenüberstellen. Es zeigt sich nämlich, dass Elektroautos dann laden werden, wenn der Tageslastgang sein Maximum erreicht. Diese Überlagerung wird zu einem Anstieg der maximalen Last führen.

In Abbildung 5-8 sind die Ergebnisse der Gleichzeitigkeitsgrad-Untersuchung abgebildet; dabei wird die Gleichzeitigkeit in Abhängigkeit von der Ladeleistung und der Anzahl der Verbraucher aufgetragen.

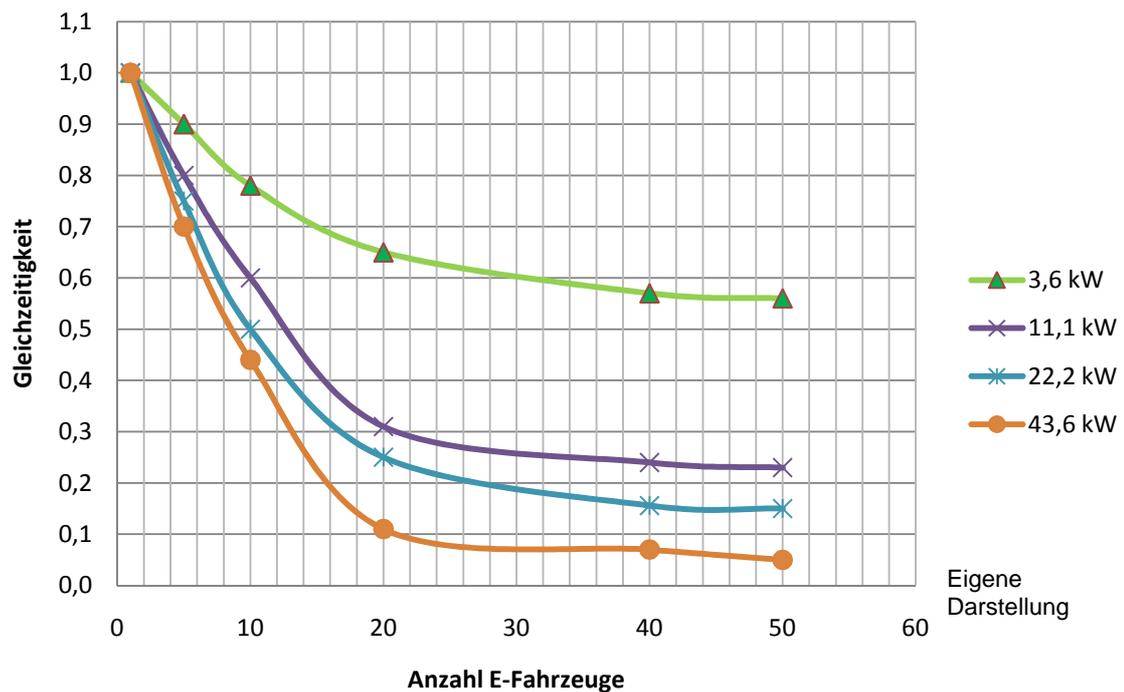


Abbildung 5-8 Gleichzeitigkeitswerte

## 6. Auswertung

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die nötigen Kriterien und Themen für eine tiefere Betrachtung erörtert. Auf dieser Grundlage werden in diesem Kapitel explizierte Berechnungen und Simulationen zukünftiger Szenarien durchgeführt, die in dieser Untersuchung als Szenario 2020<sub>1</sub>, Szenario 2020<sub>2</sub>, Szenario 2030 und Szenario 2050 vorgestellt werden.

Bereits beschrieben wurden Prognosen zur Verbreitung der Elektromobilität. Für das Jahr 2020 zeigt sich eine deutliche Spanne bzgl. der erwarteten Anzahl an Elektrofahrzeugen. Genannt werden hier Zahlen von 1 Mio., wie es die Deutsche Bundesregierung als Ziel ausgibt, bis zu 4,5 Mio. Fahrzeugen, die der Industriekonzern Siemens erwartet. Um dieser Unsicherheit gerecht zu werden, wird das Jahr 2020 in zwei unterschiedlichen Szenarien untersucht.

- Szenario 2020<sub>1</sub> basiert auf der Prognose der Bundesregierung mit 1 Mio. Elektrofahrzeugen in 2020.
- Szenario 2020<sub>2</sub> basiert auf der Vorhersage, dass im Jahr 2020 4,5 Mio. Elektroautos auf Deutschlands Straßen fahren werden.

Auch für die Zeit über 2020 hinaus liegen Werte vor. Die Bundesregierung geht in dem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ von 10 Mio. elektrisch angetriebener Fahrzeuge im Jahr 2030 aus [15]. So ergibt sich also eine weitere Überlegung.

- Szenario 2030 basiert auf Angaben der Bundesregierung von 10 Mio. Elektrofahrzeugen.

Auch für das Jahr 2050 soll ein Ausblick gewagt werden. Offizielle Zahlen für dieses Jahr, das noch knapp 40 Jahre vorausliegt, gibt es nicht. Dennoch bietet es sich im Rahmen dieser Arbeit an, eine Betrachtung zu wagen.

- Szenario 2050 basiert auf der Annahme, dass für das Jahr 2050 jedem Hausanschluss ein Elektrofahrzeug zugeordnet wird.

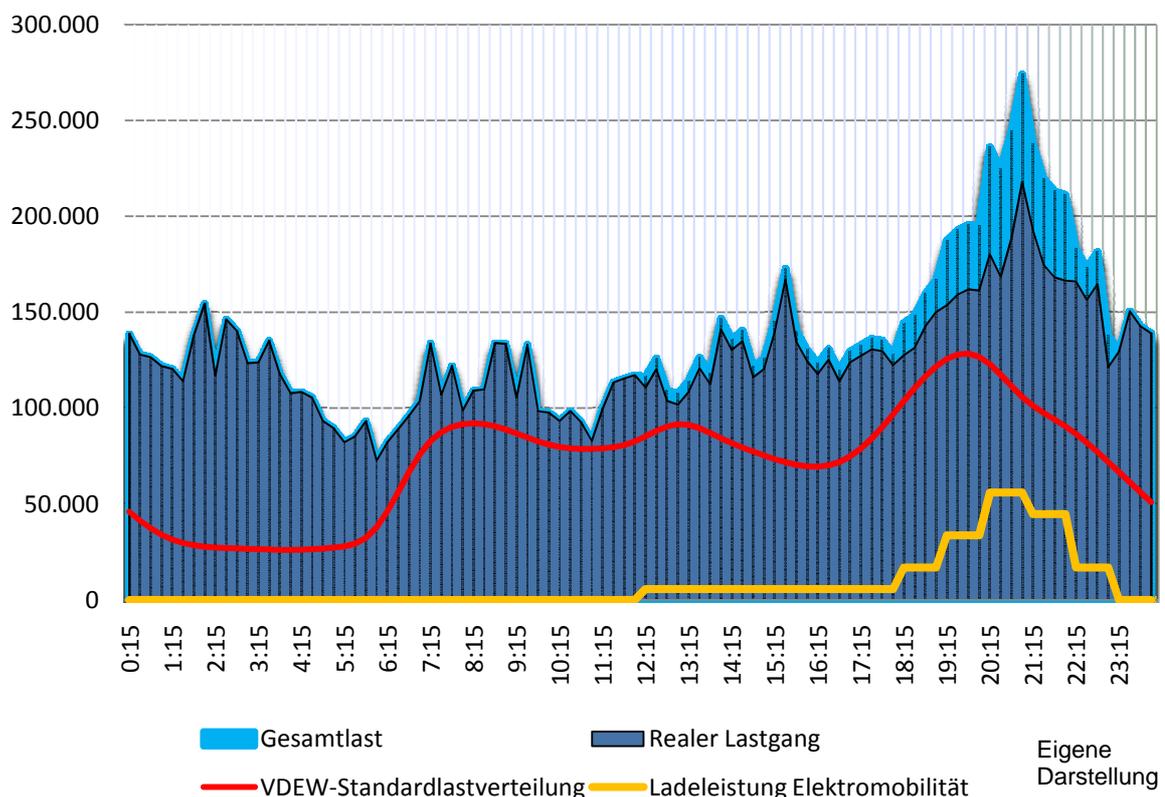
### 6.1 Szenario 2020<sub>1</sub>

Bei diesem Szenario ist die Verbreitung der Elektromobilität noch gering gegeben. Mit einem Verhältnis von 1 Mio. zu einem Gesamtbestand von ca. 49 Mio. Fahrzeugen (vgl. Abbildung 5-6) ist das Elektroauto noch ein Nischenprodukt. Für das betrachtete Ortsgebiet, in dem momentan den 112 Hausanschlüssen ca. 200 Fahrzeuge zugeordnet werden können, bedeutet dies ein Aufkommen von 5 Elektrofahrzeugen. Es wird angenommen, dass zur Ladung der Batterie ein 3~ Wechselstrom mit einer 16 A-Sicherung und somit eine Leistung von 11,1 kW zu Verfügung steht. Die durchschnittlich zurückgelegte Strecke wird 100 km am Stichtag nicht überschreiten. Die Ladung der Batterie auf 100 % der Kapazität ist so in weniger als drei Stunden möglich. Der Gleichzeitigkeitsgrad wird aufgrund der geringen Anzahl der Verbrauchergruppe nahe dem Faktor 1 liegen.

Um einen ersten Eindruck der Auswirkungen durch die Ladung der 5 Autos zu gewinnen wird ein Worst-Case-Szenario betrachtet. Das bedeutet, dass es zu einer Überlagerung von Extrempunkten kommt. Am gegebenen Beispiel würde dies bedeuten, dass am Stichtag zwischen 20:00-21:00Uhr, wenn das Ortsnetz gerade seine höchste Auslastung

erfährt, alle 5 Fahrzeuge gleichzeitig laden ( $k_g = 1$ ). Ferner bedeutet dies auch, dass die Verteilung der Fahrzeuge im Ortsnetz einen denkbar ungünstigen Zustand darstellt. Die 5 Fahrzeuge werden zusammen einem der 8 Leitungsabgänge des Transformators zugeordnet. Gewählt wird hier der Leitungszweig an dem sich die meisten Hausanschlüsse befinden. Die Last der Elektroautos wird konzentriert auf die Hausanschlüsse verteilt, die sich am Ende des Leitungszweiges befinden. Unter diesen Voraussetzungen werden die Berechnung des Lastgangs und die entsprechende Simulation mit NEPLAN durchgeführt (vgl. Kap. „NEPLAN“)

Abbildung 6-1 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung. Das zusätzliche Lastaufkommen durch die Elektromobilität bleibt moderat. Die benötigte Wirkleistung steigt gegen 21:00 Uhr von ca. 220 kW auf 274 kW. Diese Werte werden durch eine NEPLAN-Simulation bestätigt. Laut dieser Studie werden am Transformator eine Wirkleistung von 279,9 kW und eine Blindleistung von 35,9 kvar gemessen. Der Transformator bleibt auch bei der deutlich ausgeprägten Lastspitze unter 70 % Belastung. Auch alle weiteren betrachteten Grenzwerte werden eingehalten. Sowohl die Strombelastung der Leitungen - einzelne Leitungsabschnitte werden maximal mit 72,89 % belastet - als auch der Spannungsfall, der selbst in dem zusätzlich belasteten Leitungsstrang nicht unter 91 % beträgt, bleiben im Rahmen. Da mit dem Worst-Case-Szenario bereits der unvorteilhafteste Fall geprüft wurde, ist eine weitere Betrachtung nicht nötig.



**Abbildung 6-1** Szenario 2020<sub>1</sub>

## 6.2 Szenario 2020<sub>2</sub>

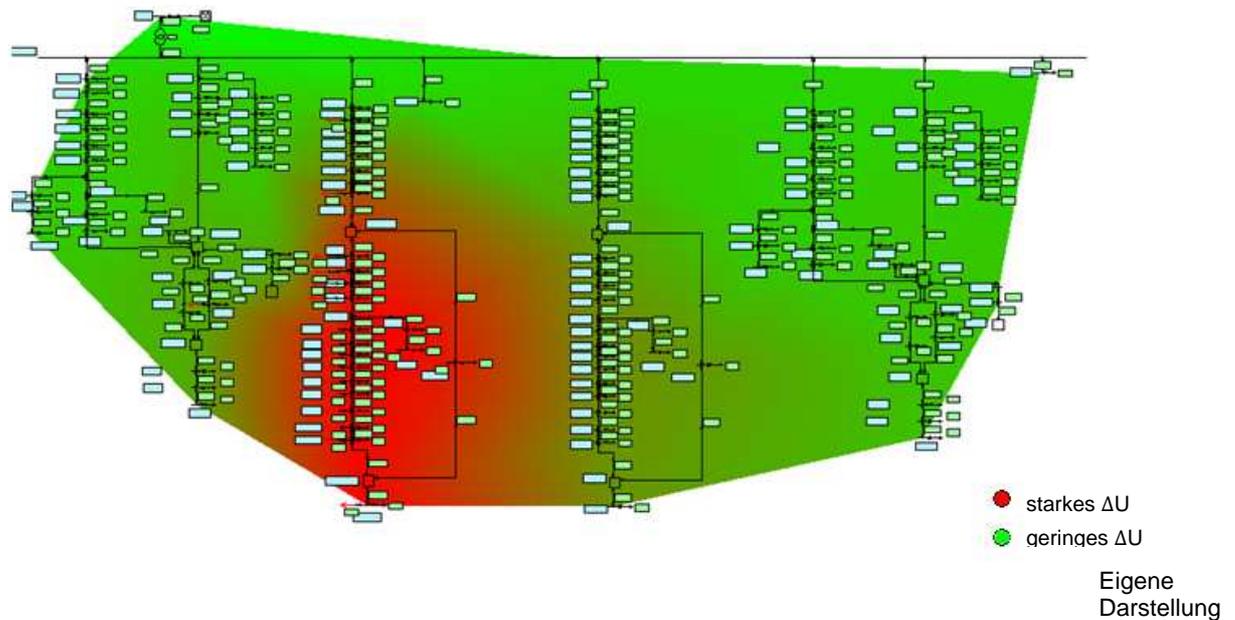
Das zweite Szenario für das Jahr 2020 unterscheidet sich in einigen Aspekten von dem erstgenannten. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass dieser Fall auf einer anderen Prognose bzgl. der Verbreitung der Elektromobilität beruht. Es wird die Prognose der Siemens AG zugrunde gelegt, die besagt, dass im Jahr 2020 bereits 4,5 Mio. Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren werden. Bezogen auf das Ortsgebiet entspricht dies 19 Fahrzeugen. Die Ladeleistung sei erneut angenommen mit 3~ Wechselstrom und einer Stromstärke von 16 A entsprechend einer Leistung von 11,1 kW. Wie in Abbildung 5-8 dargestellt, sinkt der Gleichzeitigkeitsgrad der Ladezeiten auf ca. 0,31. Das hängt vor allem damit zusammen, dass der Wegzweck sich weiter differenziert. Zwar wird weiterhin der Großteil der Elektroautos für regelmäßige berufliche Wege genutzt, doch je mehr sich die Elektromobilität verbreitet, desto mehr müssen auch die Wegzwecke „Einkauf“ und „Freizeit“ mit einbezogen werden.

Des Weiteren wird in diesem Szenario eine Ladesäule für Elektroautos mit einbezogen. Diese Ladesäulen bieten den Nutzern der Elektromobilität die Möglichkeit, die Batterie des Fahrzeugs an öffentlichen Orten oder überall dort, wo eine Ladesäule verfügbar ist, zu laden. Die RWE-Ladesäule wird über einen 3~ Stromanschluss an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Abgesichert ist die sog. Stromtankstelle mit 63 A. Sie bietet 2 Ladepunkte zur gleichzeitigen Ladung von zwei Fahrzeugen mit je 22,2 kW.

Auch in diesem Szenario ist es möglich, eine Worst-Case-Betrachtung durchzuführen. So werden die Ladepunkte auf Hausanschlüsse verteilt, die insgesamt an einem Leitungsstrang angeschlossen sind. Es wird der Leitungsstrang gewählt, an dem sich die meisten Hausanschlüsse befinden. Der zusätzliche Leistungsverbrauch für die Ladung von 18 Fahrzeugen wird diesem Strang zugeordnet. Ein Fahrzeug wird über eine Ladesäule mit Energie versorgt. Überdies wird von einem äußerst hohen Anteil von Pendlern ausgegangen, sodass der Gleichzeitigkeitsgrad auf einen Wert von 0,4 erhöht wird.

Das Ergebnis einer solchen Worst-Case-Simulation zeigt teilweise die Abbildung 6-2. Die rote Einfärbung um einen Leitungsstrang bezieht sich auf  $\Delta U$ . Es soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass an diesen Stellen im Netz die Spannung deutlich vom Nennwert abweicht. Doch trotz dieser einseitigen und konzentrierten Lastverteilung fällt laut der Simulation der Wert der Spannung nicht unter 90 %. Als Extremwert der Spannung zeigt sich eine Abweichung von 9,79 %, was damit innerhalb gesetzter Grenzen bleibt (vgl. DIN EN 50160).

Dieses Worst-Case-Szenario stellt eine Extremsituation dar, die in der Praxis vorkommen könnte, aber als äußerst unrealistisch einzustufen ist. Aus diesem Grund wird die Untersuchung um ein realistischeres Szenario erweitert.

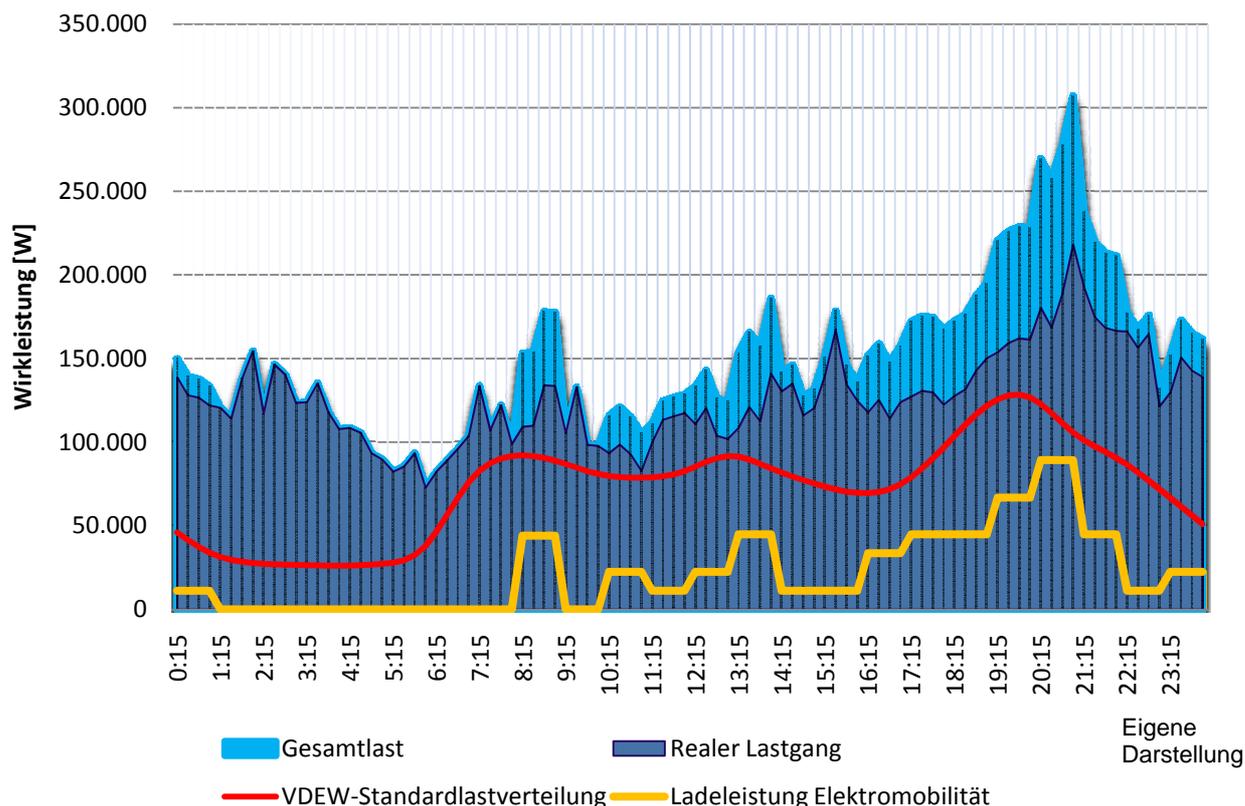


**Abbildung 6-2 Darstellung des Spannungsfalls im Ortsnetzgebiet**

In einem realistischen Szenario wird sich vor allem die Verteilung der Elektrofahrzeuge auf unterschiedliche Hausanschlüsse über das ganze Ortsnetz zeigen. Auch der Gleichzeitigkeitsgrad wird nach Abbildung 5-8 für jeden Leitungsstrang entsprechend der Anzahl der Fahrzeuge angepasst. Aufgrund dieser Überlegungen wurden weitere 5 Simulationen durchgeführt. Für jede dieser Simulationen wurden die 19 Elektrofahrzeuge per Zufall auf andere Hausanschlüsse im Netz verteilt.

Bei der Berechnung und den Simulationen dieses realistischeren Szenarios sollten die Ergebnisse, zumindest bezogen auf den Spannungsfall weniger starke Auswirkungen zeigen.

Dies ist auch der Fall. Durch die zufällige Verteilung der Fahrzeuge wird die Last der Ladevorgänge viel breiter auf das Ortsnetz verteilt. Der Spannungsfall ist im Gegensatz zur Worst-Case-Betrachtung deutlich geringer und mit einer maximalen Differenz von 7,5 % unproblematisch. In Abbildung 6-3, in der der Lastverlauf für das Szenario 2020<sub>2</sub> abgebildet ist, fällt im Gegensatz zum Szenario 2020<sub>1</sub> auf, dass sich die Ladezeiten nicht mehr ausschließlich auf die Abendstunden verteilen. Durch eine Differenzierung der Wegzwecke wird ein Auto beispielsweise nach dem Zweck „Einkaufen“ schon am frühen Nachmittag geladen. In den Morgenstunden ab ca. 08:00 Uhr zeigt sich ein klarer Bedarf an Ladeleistung, der in dem betrachteten Ortsnetz durch das Anschließen zweier Elektrofahrzeuge an die Ladesäule vor der Grundschule entsteht.



**Abbildung 6-3 Szenario 2020<sub>2</sub>**

Insgesamt ergibt sich die Wirkleistung zur Spitzenlast mit 307 kW. Die mit NEPLAN errechneten Werte sind 316 kW Wirkleistung und 32,6 kvar Blindleistung. Grundlegend wird verständlich, dass in diesem Szenario nur unter extremen und unrealistischen Bedingungen Grenzwertverletzungen auftreten.

### 6.3 Szenario 2030

Das Szenario für das Jahr 2030 basiert auf den Zielvorstellungen der Bundesregierung, die für dieses Jahr mit einer Zahl von 10 Mio. Elektrofahrzeugen rechnet. Formuliert wird diese Prognose im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ [15]. Wenn dieses Ziel erreicht wird, bedeutet das, dass in weniger als 20 Jahren jedes fünfte Fahrzeug elektrisch angetrieben wird. Wird dieses Verhältnis zugrunde gelegt, ergibt sich für das betrachtete Ortsgebiet eine Anzahl von 41 Elektrofahrzeugen.

Weiterhin sollen auch für das Jahr 2030 die Rahmenbedingungen der Untersuchung bestehen bleiben. Das bedeutet, dass beispielsweise die Daten und Tendenzen, die aus der Mobilitätsstudie „MiD 2008“ abgeleitet werden, wonach z.B. die durchschnittliche täglich zurückgelegte Wegstrecke 100 km nicht überstiegen werden soll, weiter Verwendung finden. Auch die bisher angewandten Daten bzgl. des Niederspannungsnetzes bilden weiterhin die Basis dieser Untersuchung.

In Hinblick auf die Infrastruktur zur Batterieladung wird angenommen, dass sich diese - verglichen mit dem vorherigen Szenario - verdoppelt. Wahrscheinlich ist die Verwendung



Quelle:  
RWE

Abbildung 6-4 RWE-  
Ladebox

einer Ladebox, wie sie z.B. in Abbildung 6-4 dargestellt ist. Die abgebildete „RWE AutoStrom Ladebox“ ist zur Wandmontage etwa in einer Garage oder an einer Außenwand vorgesehen. Diese Ladebox verfügt über einen Ladepunkt und stellt maximal eine Leistung von 22,2 kW zur Verfügung. Angeschlossen ist die Ladebox über einen Drehstrom bzw. einen 3~ Wechselstrom mit 32 A Absicherung [51]. Werden für eine Ladung der Batterie auf 100 % ihrer Kapazität 20 kWh elektrische Energie benötigt, ist der Ladevorgang in ca. einer Stunde abgeschlossen.

Es sei angenommen, dass im betrachteten Ortsnetz am Parkplatz der Grundschule 2 Ladesäulen mit insgesamt 4 Ladepunkten und je 22,2 kW-Leistung verfügbar sind.

Die Gleichzeitigkeit bei 41 Elektrofahrzeugen und einer Ladeleistung von 22,2 kW beträgt 0,15 ( $k_g=0,15$ ). Die Ergebnisse der Berechnung zeigt Abbildung 6-6. Bei Betrachtung des orangefarbenen Kurvenverlaufs, der die für die Ladevorgänge im Netz benötigte Leistung darstellt, fällt auf, dass das Verhältnis der Leistung in den Abendstunden sich zugunsten der Ladung am Morgen und Mittag verkleinert. Die benötigte Leistung am Morgen ab ca. 08:00 Uhr entsteht durch das Anschließen der Elektrofahrzeuge von Lehrpersonen an die Ladesäulen. Im frühen Nachmittag erfolgt die Ladung nach dem Wegzweck „Einkaufen“.

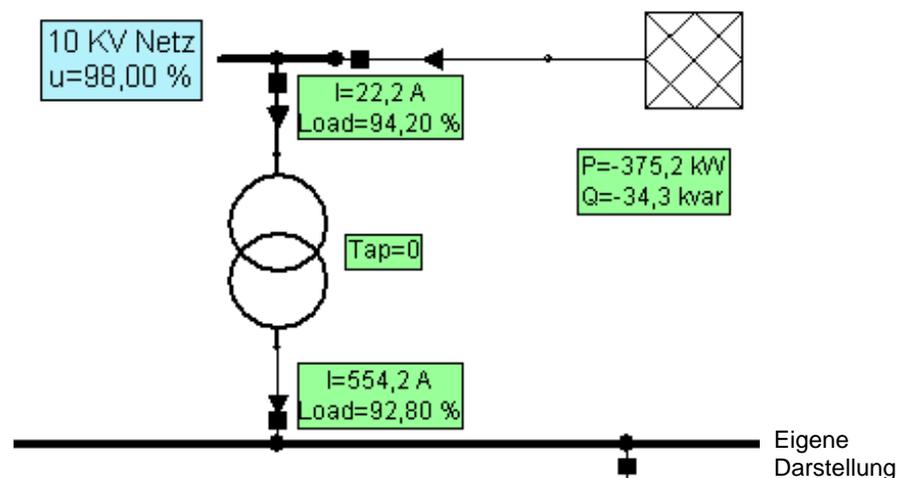


Abbildung 6-5 Schematische Darstellung der Ortsnetzstation in NEPLAN

Die Berechnung kommt auf eine maximale Wirkleistung von 363,5 kW. NEPLAN zeigt hier 375,2 kW und 34,3 kvar (vgl. Abbildung 6-5). Diese Leistungswerte bleiben in Bezug auf den Transformator innerhalb der Belastungsgrenzen. Dennoch steigen die Werte in Richtung der maximalen Kapazität. Die Strombelastung der Kabel erreicht in wenigen Teilabschnitten Höchstwerte von nahezu 100 %. Zu dem Zeitpunkt, an dem das Niederspannungsnetz seine höchste Auslastung erfährt, ist ein maximaler Spannungsfall auf 90,7 %  $U_n$  zu erkennen. Dies bedeutet, dass bei diesem Szenario einzelne

Überlastungen oder Grenzwertverletzungen zu erkennen sind. Insgesamt zeigt sich die Belastung des Niederspannungsnetzes in diesem Szenario als grenzwertig.

Das Szenario 2030 basiert auf den unveränderten Messwerten aus dem Niederspannungsnetz. Da es aber durchaus denkbar ist, dass sich innerhalb der nächsten 20 Jahre eine Veränderung dieser Werte zeigen kann, wird eine Variation des Szenarios betrachtet. Es sei angenommen, dass der Tageslastverbrauch in seiner Tendenz unverändert bleibt, aber der Leistungsbedarf um 10 % zunimmt. Unter diesen Voraussetzungen steigt die Belastung am Transformator kurzzeitig auf 409,2 kW und 37,2 kvar. Dies entspricht einer Belastung von deutlich über 100 %. Die Überlastung eines Transformators ist besonders wegen steigender innerer Verluste und damit einhergehend der Erhitzung des Elements problematisch. Hat ein Transformator gute Wärmeleitfähigkeiten, um diese Hitze abzuführen, ist eine kurzzeitige Überlastung ungefährlich. Der in der Ortsnetzstation Kortüms Esch verbaute Transformator nutzt als Wärmeübertrager Mineralöl. Diese Art von Transformatoren zeichnen sich durch eine große spezifische Wärme sowie durch gute Wärmeleitfähigkeiten aus und können die erzeugte Wärmemenge der Wicklungen und des Eisenkerns schnell abführen. Des Weiteren kann eine bedeutende Wärmemenge in der Kühlflüssigkeit gespeichert werden, was bei solch kurzzeitigen Überlastungen von großem Vorteil ist [52]. Auch ohne eine Veränderung der Verbrauchswerte war die Belastung weiterer Netzelemente grenzwertig. Diese Problematik verschärft sich und Grenzwertverletzungen bzgl. des Spannungsfalls und die Überlastung einzelner Leitungsabschnitte zeigen sich in mehreren Simulationsdurchläufen.

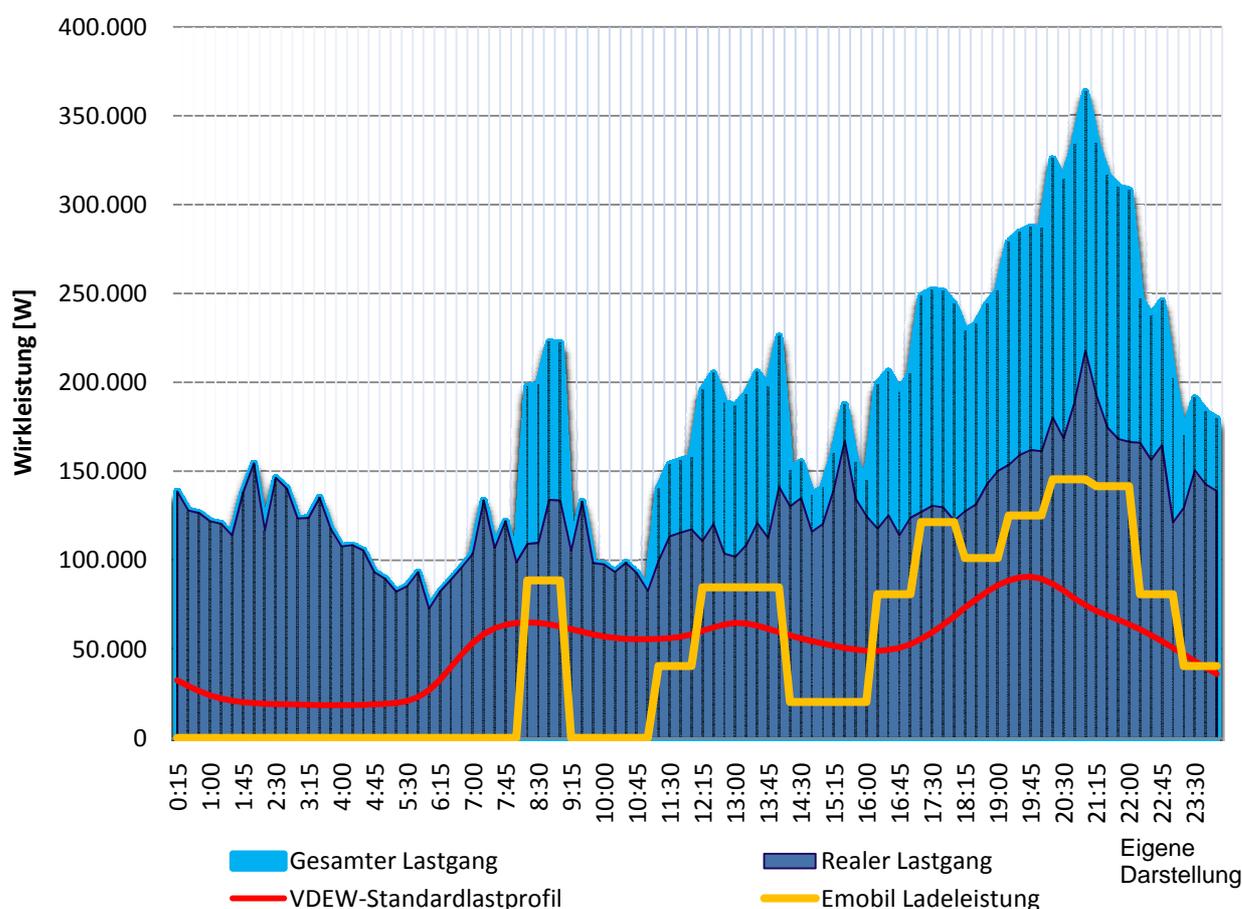


Abbildung 6-6 Szenario 2030

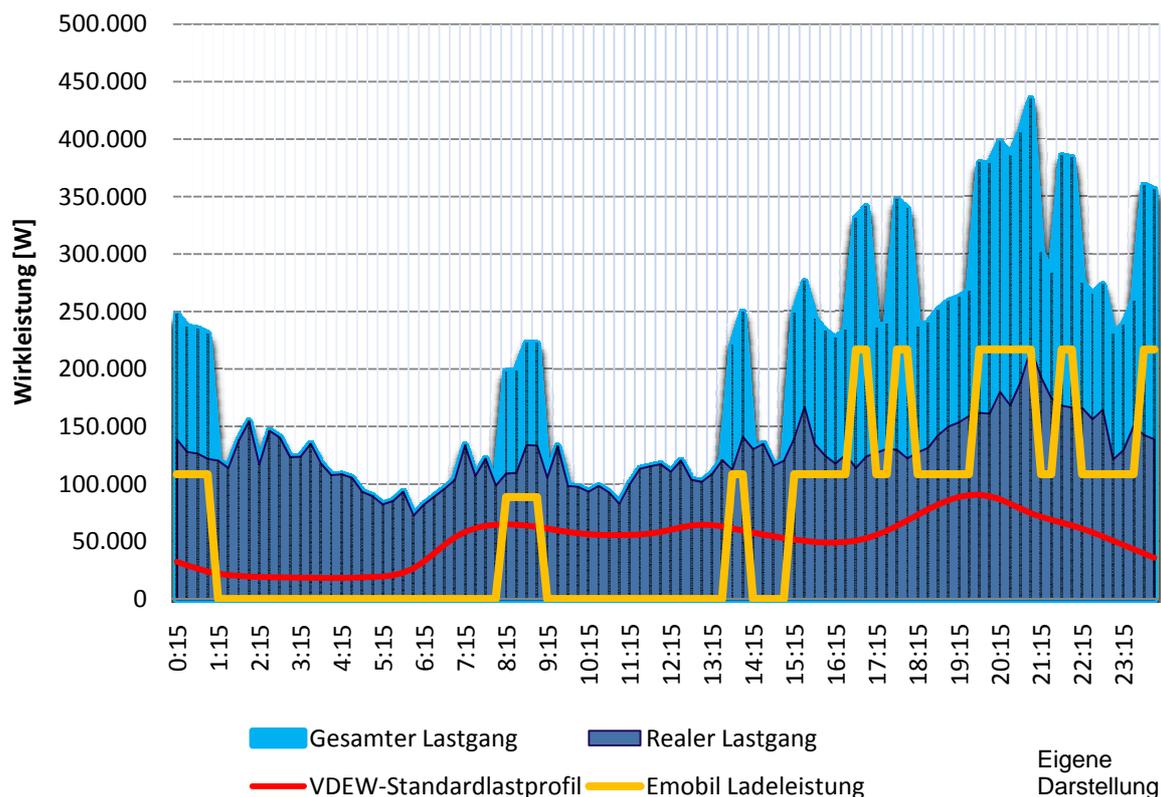
## 6.4 Szenario 2050

Das Szenario für das Jahr 2050 unterscheidet sich deutlich zu den bisher untersuchten Fällen. Aufgrund der langen Zeitspanne bis zum Eintreten des Szenarios werden im Folgenden erneut zwei unterschiedliche Variationen des Szenarios untersucht. In beiden Variationen wird davon ausgegangen, dass sich die Elektromobilität im großen Maß durchsetzt. Jedem Hausanschluss wird ein Elektrofahrzeug zugeordnet. Das bedeutet, dass die Elektromobilität einen Gesamtanteil von 56 % erreicht. Absolut wären ca. 27,3 Mio. Fahrzeuge, also mehr als jedes zweite Auto auf Deutschlands Straßen elektrisch angetrieben. Weiterhin wird das Verhalten des „Ankommens und Ladens“ zugrunde gelegt. Die Ladeleistung wird abermals gesteigert auf 43,6 kW. Dies entspricht etwa dem aktuellen Maximum bei Lithium-Ionen-Batterien, bietet aber durch die deutliche Verkürzung der Ladezeiten prägnante Vorteile [53].

Doch nicht nur wegen der verkürzten Ladezeiten wird der Gleichzeitigkeitsgrad weiter sinken. Bis zum Jahr 2050 werden die spezifischen Kosten und die spezifische Masse fallen. Infolgedessen wird die in Elektrofahrzeugen integrierte Kapazität des Energiespeichers erheblich steigen. Durch die verbesserte Eigenschaft, Energie zu speichern, wird auch die Reichweite des Elektrofahrzeugs merklich verbessert. Denkbar ist, dass Ladevorgänge nicht mehr jeden Tag erfolgen. Vielmehr ist ein Verhalten denkbar, das einem Tankvorgang eines herkömmlichen Fahrzeugs ähnelt. Je nach Länge der zurückgelegten Strecke wird dann im Abstand von wenigen Tagen oder bei geringer Fahrleistung evtl. nur jede Woche der Speicher geladen. Der Gleichzeitigkeitsgrad würde auf 0,03 ( $k_g = 0,03$ ) sinken (vgl. Abbildung 5-8).

Für die erste Betrachtung des Szenarios 2050 werden die aufgenommenen Messwerte des Niederspannungsnetzes zugrunde gelegt. Zwar ist davon auszugehen, dass die Elektrifizierung der Haushalte weiter voranschreitet, doch das „Leitszenario 2009“ des Bundesumweltministeriums zeigt für das Jahr 2050 im Vergleich zu 2010 keine Erhöhung der Bruttostromerzeugung. Es wird von einer merklichen Steigerung der Energieeffizienz ausgegangen.

Hinsichtlich des potentiellen Lastgangs für das Jahr 2050 zeigt die Abbildung 6-7 für die Elektromobilität während der typischen Zeitpunkte im Tagesverlauf deutliche Auswirkungen. Trotz des geringen Gleichzeitigkeitswertes wird viel Leistung zum Laden der Batterien benötigt. Begründet wird dies mit der hohen Ladeleistung und der Menge an Elektrofahrzeugen. Die benötigte Gesamtwirkleistung führt zur Überlastung des 400 kVA-Transformators. Auch die Simulation mit NEPLAN verdeutlicht die hohe benötigte Leistung. Es wird eine Wirkleistung von 457 kW und eine Blindleistung von 42 kvar errechnet. Auf einigen Wegstrecken werden die Kabelleitungen mit über 115 % belastet. Es ist kein erhöhter Spannungsfall erkennbar.

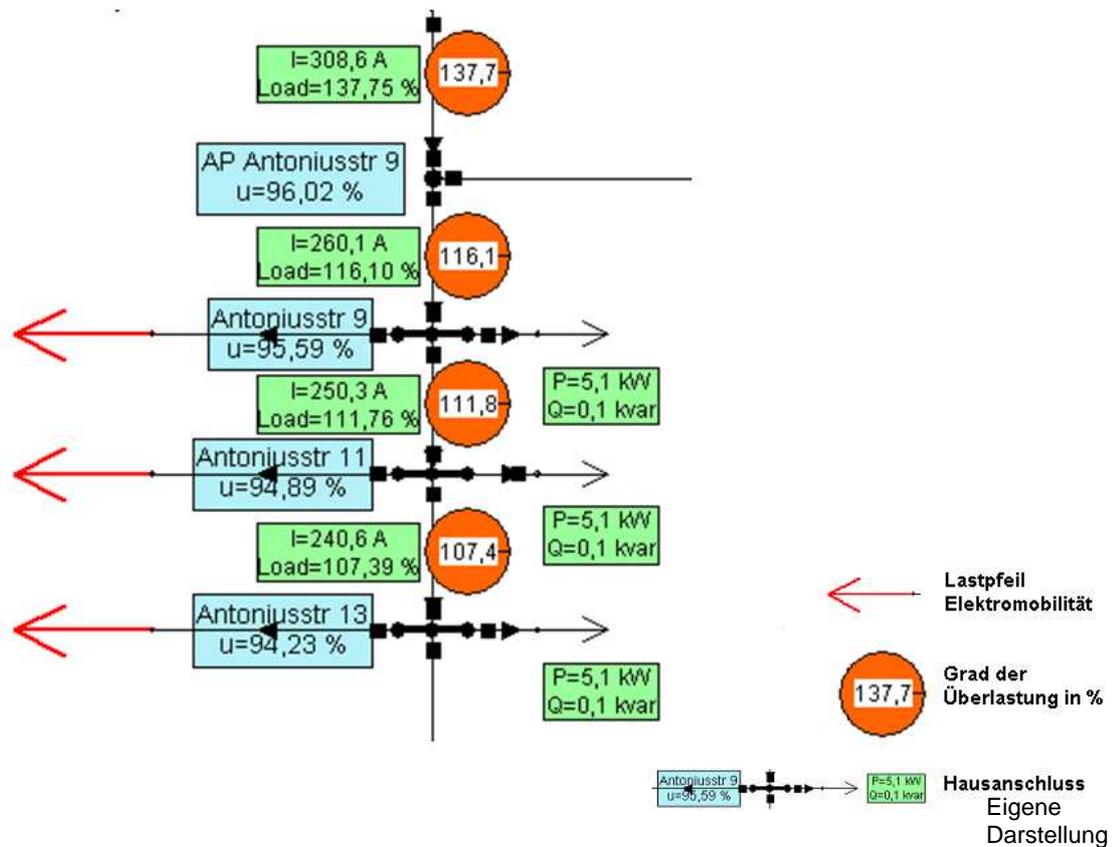


**Abbildung 6-7 Szenario 2050**

Eine Variation des Szenarios 2050 geht von einer Vervielfachung des elektrischen Energieverbrauchs für Haushalte aus. Neben der Deutschen Bundesregierung hat auch die Europäische Union im Rahmen der Klimawandel- und Nachhaltigkeitsdiskussion angestrebte Ziele formuliert. In den nächsten Jahrzehnten geht es um die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Steigerung der Energieeffizienz und um die Deckung des Energiebedarfs aus regenerativen Energien [53]. Der Weg in eine CO<sub>2</sub>-neutrale Energiewelt bis zum Jahr 2050 wird auch die europäische Energiewirtschaft nachhaltig beeinflussen. Experten gehen davon aus, dass der Anteil des Stromverbrauchs am gesamten Energiemix deutlich steigen wird, um die Ziele der CO<sub>2</sub>-Reduktion und eine Steigerung der Energieeffizienz zu erreichen. Die elektrische Energie wird so immer weiter in die Anwendungsbereiche Mobilität und Klimatisierung drängen. Unter den gegebenen Umständen wird mit einer Verdreifachung des Stromverbrauchs je Haushalt in Deutschland gerechnet [54].

Zur Simulation dieser neuen Daten wurde die gemessene Spitzenlast um den Faktor drei erhöht und als Grundlast hinterlegt. Zu dieser Grundlast der Haushalte kommt die Last durch die Elektromobilität hinzu. Weiterhin wird jedem Hausanschluss ein Elektrofahrzeug zugeordnet. Die Ladeleistung mit 43,6 kW und die für jeden Leitungsabgang angepasste Gleichzeitigkeit (vgl. Abbildung 5-8) bleiben erhalten.

Die Simulation zeigt, dass erhebliche Grenzwertverletzungen auftreten. Der Transformator erfährt eine extreme Überlastung. Errechnet wird die Wirkleistung von 793kW und die Blindleistung von 88 kvar. Man kann sagen, dass der Transformator mit ca. 200 % belastet wird. Auch bei den elektrischen Leitungen werden Grenzwerte überschritten. Die Abbildung 6-8 zeigt beispielsweise einen Kabelstrang mit einer solchen Überlastung. Die rot hinterlegten Kreise weisen auf eine Überlastung des Elements hin. Innerhalb der Kreise wird die prozentuale Abweichung deutlich.



**Abbildung 6-8 Überlastung von Leitungselementen**

In dem abgebildeten Beispiel offenbart sich eine Grenzwertüberschreitung des vieradrigen VPE-Kabels mit einem Querschnitt von  $95 \text{ mm}^2$  auf einer Länge von ca. 120 m. Der Spannungsfall im Niederspannungsnetz zeigt an mehreren Knoten Werte nahe am Grenzbereich.

## 7. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die Auswirkungen der Elektromobilität auf die Niederspannungsnetze zu untersuchen. Um eine möglichst praxisnahe Untersuchung durchzuführen, wurde die Betrachtung exemplarisch auf ein existierendes Ortsnetz gelenkt.

Um unterschiedlichen Prognosen bzgl. der Elektromobilität gerecht zu werden, wurden Untersuchungen für unterschiedliche Szenarien in der Zukunft vorgenommen. In jedem Szenario wurden entscheidende Eigenschaften wie die Zahl der Elektrofahrzeuge und die zum Laden der Batterien verwendete Leistung zugrunde gelegt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Problemstellung der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge im Ortsnetz gelegt. Da es keine öffentlichen Angaben für diese Gleichzeitigkeitsgrade gibt, war es nötig, hierzu eigene Berechnungen durchzuführen.

Um Aussagen über die Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz treffen zu können, wurden sowohl eigene Berechnungen sowie rechnergestützte Simulationen durchgeführt. Insbesondere wurde hier auf die Belastung des Transformators und der Leitungselemente sowie auf die Höhe des Spannungsfalls geachtet (vgl. Abbildung 7-1).

Im Laufe der Untersuchungen ließen sich folgende Trends beobachten. Zunächst zeigt sich, dass sich die Lastspitze von Elektroautos mit der Abendlastspitze von Haushalten überschneidet. Des Weiteren ist anzunehmen, dass in den kommenden Jahrzehnten die Ladeleistung zugunsten einer kürzeren Ladedauer deutlich steigen wird.

Untersucht wurden Szenarien für die Jahre 2020, 2030 und hypothetisch für das Jahr 2050. Bei Worst-Case-Betrachtungen für die Jahre 2020 und 2030 waren keine bzw. nur für das Szenario 2030 geringe Grenzwertverletzungen zu erkennen. Das untersuchte Szenario 2050 zeigte deutlichere Probleme im Niederspannungsnetz. So wurde der momentane Transformator mit einem Vielfachen seiner Nennkapazität belastet. Ferner stieg auch die Strombelastung einiger Leitungselemente auf ein kritisches Maß.

	Beobachtungsjahre		
	2020	2030	2050
<b>Transformatorbelastung</b>	keine Überlastung	kurzzeitige Überlastung	klare Überlastung
<b>Spannung an Knotenelementen</b>	keine Grenzwertverletzung	keine Grenzwertverletzung	liegen im Grenzbereich
<b>Belastung der Leitungselemente</b>	keine Überlastung	wenige Überlastungen	mehrere Überlastungen

Farbgebung zeigt die Tendenz von  
ok --> problematisch



Eigene  
Darstellung

Abbildung 7-1 Grafische Darstellung der Ergebnisse

Es wäre sinnvoll, mit weiteren Studien etwa bzgl. der Batterieladesysteme an diese Arbeit anzuknüpfen. Da diese Arbeit auf dem Prinzip des „Ankommens und Ladens“ basiert, wäre eine Untersuchung sinnvoll, die sich mit den Einflussfaktoren und Potentialen eines intelligenten Batterieladesystems auseinandersetzt. Ebenso wäre es interessant zu wissen, auf welche Art und Weise das Ladeverhalten der Verbraucher beeinflusst werden kann.

Ideal wäre zudem eine anschließende Untersuchung, die nach gleichem methodischen Vorgehen ein städtisches Niederspannungsnetz ergründet. So wäre eine gute Vergleichbarkeit verschiedener Ortsnetze gegeben.

Abschließend lässt sich sagen, dass im Niederspannungsnetz auch bei einer hohen Durchdringung der Elektromobilität keine außerordentlichen Probleme zu erwarten sind. Den Anforderungen durch die Elektromobilität wird das bestehende Verteilnetz der RWE Deutschland AG bereits heute gerecht und stellt keinen Engpass für die Entwicklung der Elektromobilität dar.

## Literaturverzeichnis

- [1]. **Yay, Mehmet.** Elektromobilität: Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in der Praxis. Frankfurt am Main : Peter Lang, 2010.
- [2]. **Brake, Matthias.** Mobilität im regenerativen Zeitalter. Hannover : Heise Zeitschriften Verlag, 2009.
- [3]. **Wagner vom Berg, Benjamin.** Elektromobilität: Gegenwart oder Zukunft? Förderung der Elektromobilität durch innovative Infrastruktur- und Geschäftsmodelle. Göttingen : MKWI 2010 – Automotive Services, 2010.
- [4]. **MiD 2008.** Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Berlin : s.n., 2009.
- [5]. **Audi.** www.audi.de. [Online] 2011. [Zitat vom: 11. Januar 2011.] [http://www.audi.de/de/brand/de/erlebniswelt/historie/evolution\\_der\\_modelle/1965-1990/audi\\_100\\_c3/audi\\_duo\\_1989.html](http://www.audi.de/de/brand/de/erlebniswelt/historie/evolution_der_modelle/1965-1990/audi_100_c3/audi_duo_1989.html).
- [6]. **Studienband 4 eMobilität.** Studienband 4 eMobilität. 53113 Bonn - www.dcti.de : Deutsches Cleantech Institut, 2010, S. 148.
- [7]. **Schulé, Roland.** Hybrid- und Elektroantriebe im Kfz. s.l. : Vogel Lernprogramm, 2009.
- [8]. **Henning Wallentowitz, Arndt Freialdenhoven, Ingo Olschewski.** Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010, S. S.58.
- [9]. **Mathoy, Arno.** Grundlagen für die Spezifikation von E-Antrieben. Motortechnische Zeitschrift. 09 2010.
- [10]. **Heinemann, Detlef.** Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps. Berlin : Dissertation, 2010, S. S.4.
- [11]. **Van Basshuysen, Richard/ Schäfer, Fred.** Handbuch Verbrennungsmotor – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 758.
- [12]. **Friedrich, Andreas.** Weiter kommen mit der Batterie. Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt Magazin 127. September 2010, S. 10.
- [13]. **ZSW.** Lithium – begehrter Rohstoff der Zukunft, eine Verfügbarkeitsanalyse. Stuttgart : Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2010.
- [14]. **Patel, Prachi.** Technology Review. [Online] 12. Januar 2011. [Zitat vom: 25. Februar 2011.] <http://www.heise.de/tr/artikel/Hybrid-aus-Batterie-und-Doppelschichtkondensator-1167349.html>.
- [15]. **Bundesregierung.** Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität. Berlin : s.n., 2009.

- [16]. **RWE**. [www.rwe-mobility.com](http://www.rwe-mobility.com). [Online] [Zitat vom: 25. Februar 2011.] <http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/236758/rwemobility/pilotprojekte/e-mobility-berlin/>.
- [17]. **BMVBS**. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. [Online] [Zitat vom: 25. Februar 2011.] <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/modellregion-berlin-potsdam.html?nn=36210>.
- [18]. **Seiwert, Martin**. WirtschaftsWoche. [Online] 21. Januar 2011. [Zitat vom: 22. Januar 2011.] <http://www.wiwo.de/unternehmen-maerkte/deutsche-autobauer-verlieren-bei-elektroautos-an-boden-454330/>.
- [19]. **Agency, International Energy**. Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Paris : OECD/IEA, 2009.
- [20]. **Seiwert, Martin**. WirtschaftsWoche. WirtschaftsWoche. [Online] [Zitat vom: 22. Januar 2011.] <http://www.wiwo.de/unternehmen-maerkte/deutsche-autobauer-verlieren-bei-elektroautos-an-boden-454330/>.
- [21]. **Schöttle, Markus**. Elektroauto i-MiEV am Start: Lehrstück für konsequente Umsetzung - ATZonline. [Online] 31. Juli 2009. [Zitat vom: 22. Januar 2011.] <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/10185/Elektroauto-i-MiEV-am-Start-Lehrstueck-fuer-konsequente-Umsetzung.html>.
- [22]. **Opel**. [www.OPEL.de](http://www.OPEL.de). [Online] 2010. [Zitat vom: 22. Januar 2011.] [http://www.opel-ampera.com/index.php/ger/news\\_events/press\\_releases/left/Opel-Ampera-revolutionaeres-Elektroauto-ab-42.900-Euro](http://www.opel-ampera.com/index.php/ger/news_events/press_releases/left/Opel-Ampera-revolutionaeres-Elektroauto-ab-42.900-Euro).
- [23]. **TeslaMotors**. [www.teslamotors.com](http://www.teslamotors.com). [Online] 27. October 2009. [Zitat vom: 25. Januar 2011.] <http://www.teslamotors.com/about/press/releases/tesla-roadster-travels-313-miles-single-charge>.
- [24]. **VDI**. [www.vdi-nachrichten.com](http://www.vdi-nachrichten.com). [Online] 15. August 2008. [Zitat vom: 24. Januar 2011.] [http://www.vdi-nachrichten.com/vdi-nachrichten/aktuelle\\_ausgabe/akt\\_ausg\\_detail.asp?cat=2&id=39788](http://www.vdi-nachrichten.com/vdi-nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?cat=2&id=39788).
- [25]. **UPI-Bericht 35**. UPI - Umwelt- und Prognose-Institut. [Online] 2010. [Zitat vom: 29. Januar 2011.] <http://www.upi-institut.de/upi35.htm>.
- [26]. **Faktor X**. Faktor X - Fahrt das Auto der Zukunft elektrisch? [Online] August 2009. [Zitat vom: 29. Januar 2011.] <http://www.faktor-x.info/ressourcen/elektromobilitaetaugust-2009.html>.
- [27]. **VDA**. Verband der Automobilindustrie. [Online] [Zitat vom: 29. Januar 2011.] <http://www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/>.
- [28]. **Auto-Motor-und-Sport**. [www.auto-motor-und-sport.de](http://www.auto-motor-und-sport.de). [Online] 14. März 2010. [Zitat vom: 29. Januar 2011.] <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/daimler-chef-zetsche-fordert-mehr-hilfe-fuer-elektroautos-1769776.html>.
- [29]. **BDEW**. [Online] 14. September 2010. [Zitat vom: 30. Januar 2011.] [http://bdew.de/bdew.nsf/id/DE\\_Datenplattform\\_Stromkennzeichnung/\\$file/Bundesmix%202009\\_Stromkennzeichnung\\_14.09.10.pdf](http://bdew.de/bdew.nsf/id/DE_Datenplattform_Stromkennzeichnung/$file/Bundesmix%202009_Stromkennzeichnung_14.09.10.pdf).
- [30]. **Fraunhofer ISI**. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Karlsruhe : Fraunhofer ISI, 2009.
- [31]. **Merkel, Angela**. Kooperationsprojekt Elektromobilität. 05. September 2008.

- [32]. **Handelsblatt**. [Online] 05. August 2010. [Zitat vom: 01. März 2011.] <http://www.handelsblatt.com/finanzen/boerse-inside/wertvollste-firmen-deutschland-ag-wird-an-der-boerse-zum-federgewicht;2630637>.
- [33]. **Handelsblatt**. 2009 Elektroauto: Fahrt ins Ungewisse., Handelsblatt.
- [34]. **Koch, Wolfgang**. Kräfte bündeln bei Elektromobilität. 2011, Stuttgarter Zeitung.
- [35]. **F.A.Z.** 2011, Die Straßenlaterne wird zur Stromtankstelle. Frankfurter Allgemeine Zeitung.
- [36]. **GrüneAutos.com**. [Online] 18. August 2010. [Zitat vom: 01. Februar 2011.] <http://www.grueneautos.com/2010/08/welchen-mehrpreis-deutsche-und-franzosen-fur-ein-elektroauto-zahlen-wurden/>.
- [37]. **BMWi**. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. [Online] [Zitat vom: 28. Februar 2011.] <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Energietraeger/strom,did=292508.html>.
- [38]. **Crastan, Valentin**. Elektrische Energieversorgung 1. Berlin : Springer-Verlag, 2000.
- [39]. **BP**. [www.BP.com](http://www.bp.com). [Online] 2010. [Zitat vom: 10. Februar 2011.] <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>.
- [40]. **Konstantin, Panos**. Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. Berlin : Springer-Verlag, 2009.
- [41]. **BMJ**. Bundesministerium der Justiz. [Online] [Zitat vom: 05. März 2011.] [http://bundesrecht.juris.de/enwg\\_2005/index.html](http://bundesrecht.juris.de/enwg_2005/index.html).
- [42]. **Rosendahl**. Gemeinde Rosendahl. [Online] [Zitat vom: 03. März 2011.] <http://www.rosendahl.de/magazin/magazin.php?menuid=58&topmenu=60>.
- [43]. **Kalab, Otto**. Standardisierte Lastprofile. 2008.
- [44]. **BCP**. [www.neplan.ch](http://www.neplan.ch). [Online] [Zitat vom: 10. Januar 2011.] [http://www.neplan.ch/html/e/e\\_about.html](http://www.neplan.ch/html/e/e_about.html).
- [45]. **ABB**. NEPLAN-Manual.
- [46]. **Beck, H.-P.** Manuskript zur Vorlesung Energiesysteme: Elektrische Energieversorgungssysteme. Clausthal-Zellerfeld : s.n., 2009.
- [47]. **Shell**. Shell PKW-Szenarien bis 2030 . Hamburg : s.n., 2009.
- [48]. **Neupert, Ulrik**. Energiespeicher: Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial. s.l. : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2009.
- [49]. **Meffert, Heribert**. Marketing. Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2008.
- [50]. **Kuder, Martin**. Kundengruppen und Produktlebenszyklus: Dynamische Zielgruppenbildung am Beispiel der Automobilindustrie. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 2005.
- [51]. **RWE**. [www.rwe-mobility.com](http://www.rwe-mobility.com). [Online] [Zitat vom: 26. 02 2011.] <http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/332002/rwemobility/produkte/rwe-autostrom-ladebox/>.

[52]. **Böge, Wolfgang.** Vieweg-Handbuch Elektrotechnik. s.l. : Vieweg +Teubner, 2007.

[53]. **Birkner, Peter.** Distribution Grids of the Future- The Technological Challenges we are going to Face. Proceedings of the 5th International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA. Stara Lesna, Slovakia : s.n., 2009.

[54]. **Birkner, Peter, Küppers, Stefan und Zdrallek, Markus.** Anforderungen und zukünftiger Bedarf für intelligente Netze in Deutschland. Leipzig : VDE Verlag, 2010.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Übersicht über die unterschiedlichen Hybridantriebskonzepte
Abbildung 2-2	Der Elektromotor
Abbildung 2-3	Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie
Abbildung 2-4	Energiedichte verschiedener elektrochemischer Energiespeicher (z.B. Pb, NiCd...) als Funktion der Leistungsdichte
Abbildung 2-5	Die 8 Modellregionen im Überblick
Abbildung 2-6	Markteintritt verschiedener Elektrofahrzeuge
Abbildung 2-7	Electric Vehicle Index
Abbildung 2-8	Tesla Roadster
Abbildung 3-1	Überblick über die Bruttostromerzeugung in Deutschland
Abbildung 3-2	Mögliche Mehrausgaben für ein Elektrofahrzeug
Abbildung 4-1	Weltweite Elektrizitätserzeugung
Abbildung 4-2	Prinzipschaltbild des Verbundnetzes
Abbildung 4-3	Die Ortsnetzstation Kortüms Esch
Abbildung 5-1	Darstellung der Lastprofile für einen Werktag
Abbildung 5-2	Schematische Darstellung der Ortsnetzstation in NEPLAN
Abbildung 5-3	Schematische Darstellung des Ortsnetzes in NEPLAN
Abbildung 5-4	Spannungsfall bei Übertragung von Elektrizität
Abbildung 5-5	Verlauf des Gleichzeitigkeitsgrades $k_g$
Abbildung 5-6	Shell PKW-Szenarien im Zeitraum von 1995 - 2030
Abbildung 5-7	Startzeiten der Wege nach Wegezwecken von Montag bis Freitag
Abbildung 5-8	Gleichzeitigkeitswerte
Abbildung 6-1	Szenario 2020 <sub>1</sub>
Abbildung 6-2	Darstellung des Spannungsfalls im Ortsnetzgebiet
Abbildung 6-3	Szenario 2020 <sub>2</sub>
Abbildung 6-4	RWE-Ladebox
Abbildung 6-5	Schematische Darstellung der Ortsnetzstation in NEPLAN
Abbildung 6-6	Szenario 2030
Abbildung 6-7	Szenario 2050

- Abbildung 6-8      Überlastung von Leitungselementen  
Abbildung 7-1      Grafische Darstellung der Ergebnisse