

DIPLOMARBEIT

System für die koordinierte Ladung von Elektrofahrzeugen

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

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Dietrich
Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friederich Kupzog
Dipl.-Ing. Hans Jürgen Bacher

am

Institut für Computertechnik (E384)
der Technischen Universität Wien

durch

Mario Faschang
Matr. Nr. 0525929
Kriehubergasse 16/3/4, 1050 Wien

Wien, am 31. August 2011

Kurzfassung

Der zunehmende Anteil von elektrisch betriebenen Fahrzeugen stellt erhöhte Anforderungen an die elektrischen Niederspannungs- und Verteilnetze. Analysen ergeben, dass es besonders in den Nachmittags- und Abendstunden zu einer starken Belastung bei unkoordinierter, gleichzeitiger Ladung der Fahrzeugbatterien kommt. Daraus resultiert eine weitere Erhöhung der bereits vorhandenen Lastspitzen und somit eine stärkere Beanspruchung der Energienetze. Es entstehen hohe Kosten durch den nötig werdenden Ausbau der Netzinfrastruktur. Diesen Auswirkungen kann mit Hilfe eines Systems für die koordinierte Ladung von Elektrofahrzeugen, welches im Zuge der Diplomarbeit exemplarisch entwickelt wurde, entgegengewirkt werden. Das Ladesystem erhält sowohl Informationen über die momentane Netzsituation, als auch über den Status der Elektrofahrzeuge. Zusätzlich wird es dem Fahrzeughalter ermöglicht, über verschiedenartige Interfaces, z. B. am Smartphone, seine Fahr- und Ladewünsche zu äußern. Aus all diesen Daten wird durch geeignete Algorithmen ein optimierter Ladungsplan erstellt. Somit können die negativen Auswirkungen auf die Netzqualität reduziert werden und es kann auf unvorhergesehene Ereignisse, wie plötzlicher starker dezentraler Einspeisung reagiert werden. Die Ergebnisse des Einsatzes des entwickelten Systems sind die Einbindung von Nutzerwünschen in die Ladungsplanung mit Hilfe der entwickelten Interfaces, sowie die Koordination der Fahrzeugladungen zur Vermeidung von Überlastungen und Spannungsabweichungen in den Energienetzen. Durch die Koordination der Ladung ist eine Verschiebung der zusätzlichen Netzbelastung von der Spitzenlastzeit auf Zeitpunkte geringer Netzauslastung möglich. Es ist auch möglich auf die stark fluktuierenden Einspeisungen durch dezentrale, alternative Energiequellen zu reagieren und diese somit effizienter zu nutzen. Durch den exemplarischen Systembetrieb können praktische Erkenntnisse für den zukünftigen Einsatz von Ladesystemen gewonnen werden. Der Betrieb eines solchen koordinierten Systems ebnet den Weg für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen und die großflächige Verwendung alternativer Energiequellen in den Energienetzen der nächsten Generation.

Abstract

The rising number of electrically powered vehicles (EV) challenges the distribution grid. Analyses revealed that the uncoordinated, simultaneous charging of vehicle batteries results in heavy load, especially in the afternoon and evening hours. This load leads to further increase of the already existing load peaks and thus to an even greater strain on the distribution grid. There are high costs resulting from the necessary expansion of network infrastructure. These effects can be counteracted by a system for coordinated vehicle charging which was developed as part of this thesis. This coordinating system receives information about the current network situation and the status of the vehicles. In addition, it enables the vehicle owner to express his driving and charging preferences via various interfaces. These interfaces are implemented by smart phones or as web page. Based on the information provided by customers, network operators, and energy suppliers, an optimized schedule for EV-charging is created. The charging process of the vehicle is thereby planned and coordinated in order to keep the power quality high despite the increasing burden to the grid. In addition to that, the system is able to react on unforeseen events like sudden strong decentralized generation from alternative energy sources. The results of the use of the developed system is the integration of user requirements in the planning process with the help of the developed interfaces, as well as coordination of vehicle charging to avoid overloads and voltage deviations in the power grid. Due to the coordination of charging, the necessary charging power can be shifted from peak load times to times of lower grid load. It is possible to react to the rapidly fluctuating, decentralized generation of alternative energy sources and thus to use them more efficiently. Because of the exemplary system operation, practical insights for future use of charging systems can be obtained. Due to the controllability of the charging process, it is possible to respond to the rapidly fluctuating generation of distributed alternative energy sources, such as wind energy and photovoltaic systems. Therefore, these sustainable energy sources can be used more efficiently which prepares the path for their future integration into the smart grid.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben und mich auf meinem Weg durch das Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich stets unterstützen und niemals an meinem Erfolg gezweifelt haben. Auch meiner Freundin und meiner Schwester möchte ich meinen Dank für ihre Anregungen und motivierenden Worte, sowie für ihre Geduld aussprechen.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. Friederich Kupzog und Herrn Prof. Dr. Dietmar Dietrich für die Betreuung meiner Diplomarbeit am Institut für Computertechnik der Technischen Universität Wien, sowie Herrn DI Hans-Jürgen Bacher für die Kooperation seitens der Salzburg AG.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Trend zu alternativen Energieträgern in der Fahrzeugtechnik | 1 |
| 1.1.1 | Wirtschaftliche Faktoren | 1 |
| 1.1.2 | Gesundheitliche, umweltpolitische und gesellschaftliche Überlegungen . . . | 4 |
| 1.2 | Trend zur Elektromobilität | 5 |
| 1.3 | Problembeschreibung | 9 |
| 2 | State of the Art und Aufgabenstellung | 11 |
| 2.1 | Normierung und Standards | 12 |
| 2.1.1 | Steckverbindungen | 13 |
| 2.1.2 | Lademodi nach IEC 61851 | 15 |
| 2.1.3 | Kommunikation nach IEC 61850 und IEC 15118 | 16 |
| 2.2 | Ladestationen für Elektrofahrzeuge | 18 |
| 2.2.1 | Kommunikation zu Fahrzeug und Back-End | 19 |
| 2.2.2 | Identifikation, Geschäfts- und Abrechnungsmodelle | 19 |
| 2.2.3 | Lastmanagement und Rückspeisungsmöglichkeiten | 20 |
| 2.2.4 | Ladestation-Management-Systeme | 21 |
| 2.3 | Aufgabenstellung und Methodik | 22 |
| 2.3.1 | Notwendige Mittel für koordiniertes Laden | 22 |
| 2.3.2 | Aufgabenstellung: Realisierung eines Systems zur koordinierten Ladung von Elektrofahrzeugen | 23 |
| 2.3.3 | Methodik | 25 |
| 3 | Realisierungsmöglichkeiten eines koordinierten Ladesystems für Elektrofahr- zeuge | 26 |
| 3.1 | Komponenten eines koordinierten Ladesystems | 26 |
| 3.2 | Anforderungen an das Ladesystem | 28 |
| 3.2.1 | Anforderungen an das Interface | 28 |
| 3.2.2 | Anforderungen an das Managementsystem (Aggregator) | 29 |
| 3.2.3 | Anforderungen an die Ladestationen | 30 |
| 3.2.4 | Anforderungen an Energieerzeuger und Netzbetreiber | 30 |
| 3.3 | Aufbau des Ladesystems | 31 |
| 3.4 | Positionierung und Varianten des Interfaces | 32 |
| 3.5 | Kommunikation | 34 |
| 3.5.1 | Kommunikationsmittel | 34 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.2 | Kommunikationswege | 36 |
| 3.6 | Authentifizierungsmechanismen | 38 |
| 3.7 | Zentrale Datenhaltung | 41 |
| 4 | Auswahl eines Lösungsansatzes und Beschreibung der Implementierung | 42 |
| 4.1 | Auswahl eines Lösungsansatzes | 42 |
| 4.2 | Implementierung eines Systems zur koordinierten Ladung von Elektrofahrzeugen . | 43 |
| 4.2.1 | Back-End (Server) | 44 |
| 4.2.2 | User-Interface | 46 |
| 4.2.3 | Aggregator | 49 |
| 4.3 | Ergebnisse | 56 |
| 4.3.1 | Verarbeitung der Ladewünsche | 56 |
| 4.3.2 | Reaktion auf Änderungen der Netzreserve | 57 |
| 5 | Resümee | 60 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 60 |
| 5.2 | Diskussion | 61 |
| 5.3 | Resümee | 63 |
| | Wissenschaftliche Literatur | 64 |
| | Internet-Referenzen | 65 |

Abkürzungen

| | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------|
| AC | Alternating Current |
| ADSL | Asymmetric Digital Subscriber Line |
| AG | Aktiengesellschaft |
| BALLADE | Benutzerfreundliche ALlgegenwärtige LADestelle für Elektromobilität |
| BP | British Petroleum |
| CEE | Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment |
| CHAdEMO | Charge and Move (aus dem Japanischen) |
| CISC | Complex Instruction Set Computer |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CPU | Central Processing Unit |
| DB | Datenbank |
| DBMS | Datenbank-Managementsystems |
| DC | Direct Current |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DKE | Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik |
| DoD | Depth of Discharge |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EU | Europäische Union |
| EV | Electric Vehicle |
| EXI | Efficient XML Interchange |
| FTP | File Transfer Protocol |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| GOOSE | Generic Object Oriented Substation Events |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| GPS | Global Positioning System |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| H0 | Standardlastprofil für Haushalte |
| H ₂ | Wasserstoff |
| HSDPA | High Speed Downlink Packet Access |
| HTML | Hypertext Markup Language |
| HTTP | Hypertext Transfer Protocol |
| HTTPS | Hypertext Transfer Protocol Secure |
| IBM | International Business Machines Corporation |
| IEC | Internationale Elektronische Kommission |
| IIS | Microsoft Internet Information Services |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnologie |
| iOS | Apple Operating System |
| IP | Internet Protocol |
| ISDN | Integrated Services Digital Network |

| | |
|--------|------------------------------------------------------------------|
| JARI | Japanese Automotive Research Institute |
| JEVS | Japan Electric Vehicle Standard |
| LED | Light-Emitting Diode |
| Li-Ion | Lithium-Ionen (Akkumulator) |
| LL | Ladeleistung |
| LS | Ladestation |
| LTE | Long Term Evolution |
| LW | Ladewunsch |
| MAC | Media Access Control |
| MMS | Manufacturing Messaging Specification |
| Ni-MH | Nickel-Metallhydrid (Akkumulator) |
| NR | Netzreserve |
| OPEC | Organisation erdölexportierender Länder |
| PC | Personal Computer |
| PEM | Proton Exchange Membrane |
| PHP | Hypertext Preprocessor (Skriptsprache) |
| PIN | Persönliche Identifikationsnummer |
| PKW | Personenkraftwagen |
| PLC | Powerline-Communication |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| RAM | Random-Access Memory |
| RFID | Radio-Frequency-Identification |
| RIM | Research In Motion |
| ROM | Read-Only Memory |
| RWE | Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SCL | Substation Configuration description Language |
| SDL | Specification and Description Language |
| SI | Système International d'unités (Internationales Einheitensystem) |
| SoC | State of Charge |
| SQL | Structured Query Language |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TEPCO | Tokyo Electric Power Company |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| USA | United States of America |
| USB | Universal Serial Bus |
| USD | United States Dollar |
| V2G | Vehicle to Grid |
| VDE | Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik |
| VDEW | Verband der Elektrizitätswirtschaft |
| VPN | Virtual Private Network |
| WHO | World Health Organization |
| XML | Extensible Markup Language |

1 Einleitung

„Mobilität“ – Würde man das vergangene Jahrhundert in Stichworten beschreiben, so fände sich dieses mit Sicherheit darunter.

Die Erfindung des Automobils bedeutete eine enorme Steigerung von Flexibilität und Reichweite im Individualverkehr. Auch für die Wirtschaft entwickelte sich der Verkehr und mit ihm der günstige Transport von Waren zu einem treibenden Motor.

Im 20. Jahrhundert erfuhr Mobilität durch das Automobil sowohl im Wirtschafts- als auch im Privatleben enormen Zuwachs. Der Vorteil der hohen Energiedichte von erdölbasierten Treibstoffen und der niedrige Ölpreis (siehe Diagramm in Abbildung 1.1) waren treibende Faktoren in der Verbreitung von Automobilen mit Verbrennungsmotor [Hel09].

1.1 Trend zu alternativen Energieträgern in der Fahrzeugtechnik

Die Überlegungen, welche zu einem Umdenken im Energiesektor führten, können in zwei Kategorien gruppiert werden. Hauptsächlich beschränken sie sich auf wirtschaftliche und gesundheitliche/gesellschaftliche Argumente, welche seit Beginn der 1970er Jahre eine Diskussion über die Verwendung alternativer Energieträger immer wieder laut werden lassen.

1.1.1 Wirtschaftliche Faktoren

Wie im Diagramm in Abbildung 1.1 zu sehen ist, war Rohöl bis zum Beginn der 1970er Jahre sehr preiswert. Sowohl die rasante Zuwachse in der Automobilindustrie, als auch der gesamte wirtschaftliche Aufschwung in diesem Zeitraum wurde durch den extrem niedrigen Ölpreis bedingt. In den USA war ein PKW-Kraftstoffverbrauch von durchschnittlich 30 Litern pro 100 Kilometer Fahrleistung keine Seltenheit [Hel09]. Doch als 1973 der erste Ölpreisschock, ausgelöst durch eine Drosselung der Fördermenge durch die Organisation der Erdöl exportierenden Länder (OPEC), einsetzte und der Ölpreis im darauf folgenden Jahr von 3 USD auf über 12 USD pro Fass Rohöl zunahm, begann ein Umdenkprozess hinsichtlich des immer weiter steigenden Ölverbrauchs [Hel09]. Von den betroffenen Industriestaaten wurde versucht die Abhängigkeit von der OPEC zu reduzieren. Dies geschah teilweise durch die Suche nach alternativen Energieträgern und Energiesparpotential, jedoch größtenteils durch die Suche nach alternativen Ölquellen und alternativen Fördermöglichkeiten (z. B. Offshore-Förderung in der Nordsee). Des Weiteren wurden von den

betroffenen Staaten große Ölreserven als Puffer angelegt. 1979 kam es durch den ersten Golfkrieg und aufgrund von Förderausfällen zur zweiten Ölkrise infolge derer der Ölpreis abermals extrem (auf 38 USD pro Fass) anstieg [Qua08].

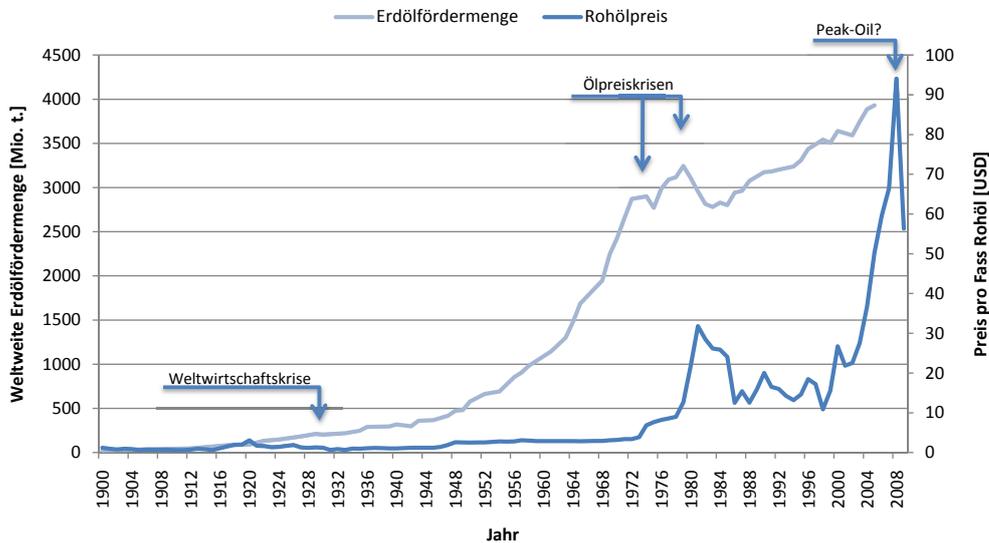


Abbildung 1.1: globale Erdölfördermenge [Qua08] und Ölpreisentwicklung (USD pro Fass Rohöl) [19]

Bedingt durch diese beiden Ölkrisen endete der exponentielle Anstieg der globalen Erdölförderung (vgl. Abbildung 1.1). In der zweiten Hälfte der 1980er Jahre fiel der Ölpreis aufgrund interner Unstimmigkeiten der OPEC-Länder wieder. Jedoch stieg der Ölpreis seit dem enormen wirtschaftlichen Aufschwung Chinas und anderer Länder immer weiter und erzielte mit dem Ölpreisschock 2008 ein vorläufiges Maximum von 94 USD pro Fass. Es ist zu erwarten, dass wegen der begrenzten Vorkommen von fossilen Brennstoffen und der weiter steigenden Nachfrage sich die Preisentwicklung ähnlich der, der letzten Jahre, fortsetzen wird. Zu einer noch stärkeren Preissteigerung könnte es kommen, zieht man in Betracht, dass in naher Zukunft ein Punkt erreicht werden könnte, welcher als Peak-Oil bezeichnet wird. Dieser Punkt kennzeichnet den Zeitpunkt an welchem die maximale Ölfördermenge erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt wird die Menge an gefördertem Rohöl regressieren. Nach [Bra09] könnte dieser Zeitpunkt in der zweiten Hälfte der 2010er Jahre mit einer maximalen Jahresfördermenge von knapp fünf Milliarden Tonnen Rohöl erreicht werden.

Ein weiterer Aspekt, welcher für die Verwendung alternative Energiequellen spricht, ist der fortwährende Anstieg der Weltbevölkerung und der damit gekoppelte Anstieg des Energieverbrauchs. In Abbildung 1.2 ist die Entwicklung der Weltbevölkerung seit 1950 dargestellt. Diese Abbildung beinhaltet zudem auch geschätzte Bevölkerungszahlen bis ins Jahr 2050. Der generelle Trend ist nicht zu übersehen: Die Weltbevölkerung hat sich seit 1970 fast verdoppelt und die Tendenz ist laut den United Nations (World Population Prospects, Rev. 2008) auch bis 2050 weiter stark steigend. Jedoch wird der Zuwachs an Einwohnern kaum durch die führenden Industrienationen, (deren Bevölkerungswachstum stieg seit 1990 nur mehr gering und wird auch in den kommenden Jahrzehnten nur gering zunehmen) sondern vielmehr durch die stark steigende Population in den Entwicklungsländern erfolgen.

Nicht nur der Anstieg an Energieverbrauchern, sondern auch der durchschnittliche Energieverbrauch pro Einwohner ist ein entscheidender Faktor zur Abschätzung des zukünftigen globalen

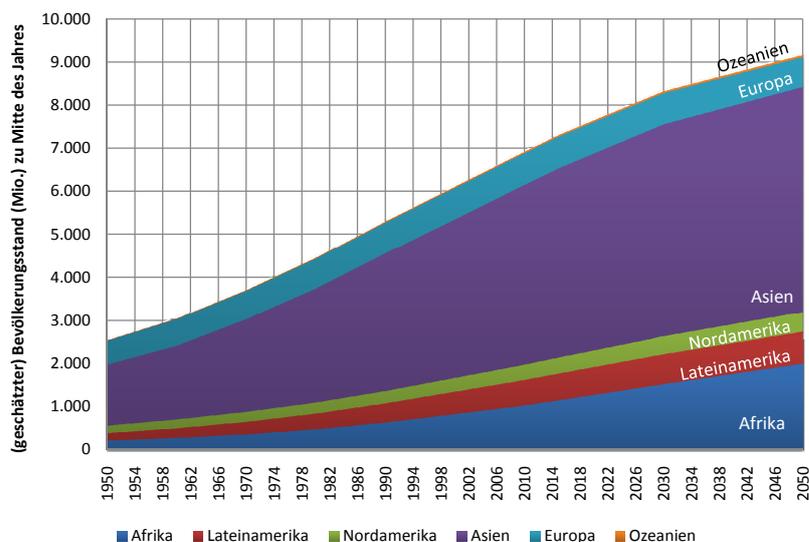


Abbildung 1.2: Entwicklung der Weltbevölkerung 1950 - 2050 in Mio. Einwohnern (Daten von [17]).

Energiebedarfs. Insbesondere der Anstieg des Energieverbrauchs des Verkehrssektors spiegelt diese Tatsache gut wieder. Besonders in China und Indien steigt die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge enorm an. Diese Tatsache kann gut anhand der in Tabelle 1.1 dargestellten Zahlen am Beispiel des durchschnittlichen Fahrzeugbestandes pro 1000 Einwohnern und der Änderung der Neuzulassungen in den jeweiligen Ländern aufgezeigt werden.

Tabelle 1.1: Autostatistik und Änderung der Neuzulassungen [Hel09] [21] [3] [4]

| | USA | Deutschland | Japan | China | Indien | Brasilien |
|---------------------------------------|---------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|
| PKW je 1000 Einwohner | 565 | 463 | 282 | 12 | 12 | 12 |
| PKW je Straßenkilometer | 30 | 63 | 52 | 28,6 | 6,3 | 260,8 |
| Änderung Neuzulassungen (2006 - 2007) | -2,5 % | 0,0 % ¹ | -5,2 % | 24,7 % | 15,1 % | 27,8 % |
| Änderung Neuzulassungen (2008 - 2009) | -21,2 % | -1,5 % ¹ | -7,2 % | 47,2 % | 17,5 % | 12,6 % |

Die Kombination aus den teilweise extrem steigenden Bevölkerungszahlen und der, besonders in den Entwicklungsländern vorhandenen, Steigerung der Fahrzeugdichte (bezogen auf 1000 Einwohner) lässt eine enorme Erhöhung des (größtenteils fossilen) Energiebedarfs erwarten. Ob dieser angesichts der Tatsache des baldigen Eintretens des Peak-Oil-Zeitpunktes gedeckt werden kann ist mehr als fraglich. Laut der Studie „Statistical Review of World Energy“, durchgeführt von British Petroleum (BP) und dem Deutschen Bundeswirtschaftsministerium im Jahre 1999, liegt die statische Reichweite von Erdöl bei 42 Jahren [Amo99] [Bra09]. Ob jedoch die Verwendung der statischen Reichweite (welche konstanten Verbrauch voraussetzt) aus 1999 angesichts des stetig steigenden Verbrauchs gerechtfertigt ist, sollte bezweifelt werden. Auch wird, bei steigenden Ölpreisen, die Förderung von unkonventionellem Erdöl wirtschaftlicher werden und somit die Menge an wirtschaftlich nutzbarem Erdöl steigen.

Es steht somit aufgrund unterschiedlicher Faktoren nicht genau fest, wie lange die Erdölreserven noch ausreichen werden. Klar ist jedoch, dass es sich bei diesem Energieträger um ein nicht

¹EU15-Wert verwendet

regeneratives und nur mehr begrenzt zur Verfügung stehendes Gut handelt, welches in absehbarer Zeit sehr rar werden wird.

1.1.2 Gesundheitliche, umweltpolitische und gesellschaftliche Überlegungen

Ein weiterer zentraler Aspekt der Diskussion um alternative Energiequellen für Mobilität ist die Auswirkung des hohen Anteils von fossilen Energieträgern auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Durch das starke Wirtschaftswachstum und den steigenden Grad der Industrialisierung nahm die Verbrennung von fossilen Brennstoffen (vorwiegend Kohle und Erdöl) im 20. Jahrhundert enorm zu. Besonders in Ballungszentren sind die Auswirkungen dieser Zunahme unter bestimmten Voraussetzungen deutlich erkennbar: Es bildet sich Smog. Der Ausdruck „Smog“ ist eine Wortzusammensetzung aus dem englischen „Smoke“ und „Fog“. Es bezeichnet die gesundheitsschädliche und sichtbeeinträchtigende Konzentration von Schadstoffen in der Luft.

In den 1950er Jahren erreichte die Smogbelastung und deren Auswirkungen in vielen Großstädten einen Höhepunkt. Im Dezember 1952 war London für fünf Tage von extrem dichtem Smog betroffen („The Great Smog“). Diese extreme Luftverschmutzung forderte an die 4000 Todesopfer [AG03].

Die gesundheitliche Belastung erfolgt größtenteils durch Feinstaub (Ruß, Reifen- und Bremsabrieb) sowie durch Schwefel-, Kohlenstoff- und Stickoxide (Verbrennungsprodukte). Die direkten gesundheitlichen Auswirkungen am menschlichen Körper sind Lungenkrankheiten, Asthma, Krebs und Herz-Kreislauferkrankungen. Besonders Kleinkinder und ältere Menschen sind von diesen Erkrankungen vermehrt betroffen. Ein weiterer umweltschädlicher Effekt ist die Bildung von saurem Regen und die damit verbundene Übersäuerung der Böden.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) verzeichnet für Deutschland eine Zahl von 70.000 Toten pro Jahr, hervorgerufen durch die Feinstaubbelastung. Der Anteil der Feinstaubbelastung, welcher durch den Verkehr verursacht wird, wird dabei auf rund 20 Prozent geschätzt. Auch der CO_2 -Ausstoß hat besonders im Verkehrssektor enorm zugenommen. Im Vergleich zum Jahr 1990 stiegen die CO_2 -Emissionen bis 2007 kontinuierlich auf knapp 140 Prozent an [Bra09].

Der Verkehrssektor ist in Österreich mit einem Anteil von rund 20 Prozent einer der Hauptemittenten von Kohlendioxid [Fre09]. Dieser hohe Anteil ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass weltweit gesehen 95 Prozent der Primärenergie, welche für den Verkehrssektor benötigt wird, aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird. Im Rahmen des 1997 beschlossenen Kyoto-Protokolls verpflichtete sich die EU zu einer Reduktion der Emissionsmenge an CO_2 -Äquivalent von durchschnittlich acht Prozent bis zum Verpflichtungszeitraum 2008 bis 2012. Österreich ist im Zuge des Lastenverteilungsabkommens (Burden-Sharing) innerhalb der EU dazu verpflichtet die Emissionsmenge an CO_2 -Äquivalent im Vergleich zum Jahr 1990 um 13 Prozent auf knapp 69 Millionen Tonnen bis 2012 zu reduzieren [Fre09]. Im Jahr 2004 erzeugte Österreich jedoch bereits 91,3 Millionen Tonnen CO_2 -Äquivalent, was einer Steigerung von 15 Prozent entspricht. 23,87 Millionen Tonnen davon stammten aus dem Verkehrssektor, der somit den größten Anteil verursachte. Dazu trägt auch der, vor allem in Grenznähe besonders populäre Tanktourismus einen nicht unwesentlichen Teil bei. Sein Anteil an den gesamten Verkehrsemissionen des Jahres 2004 wurde in [Fre09] auf rund 32 Prozent beziffert.

In Abbildung 1.3 ist die Entwicklung der in Österreich erzeugten Menge an CO_2 -Äquivalent für die Jahre 1995 bis 2008 dargestellt. Trotz eines geringen Rückganges in den Jahren 1996 - 1999 ist eine Erreichung der, durch das Kyoto-Protokoll vorgegebenen, Ziele eher unwahrscheinlich [Fre09]

[16]. Besonders hervorzuheben ist die, ebenfalls in Abbildung 1.3 dargestellte, enorme Steigerung der Emissionen, welche durch den Verkehrssektor verursacht werden.

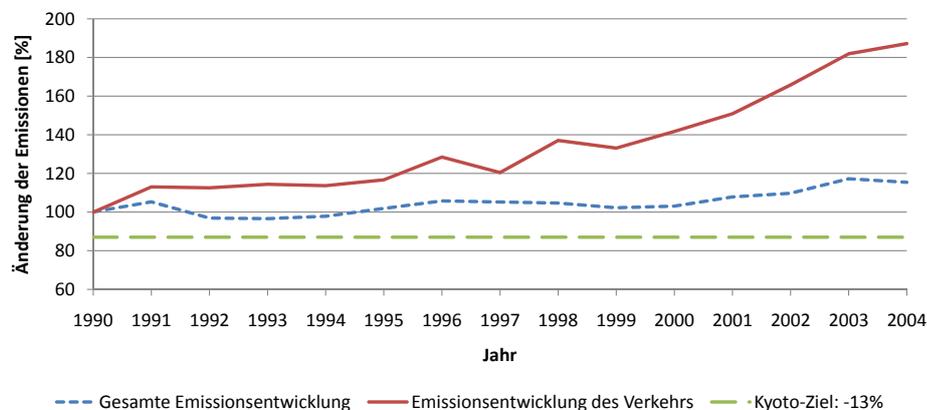


Abbildung 1.3: CO_2 -Äquivalent-Ausstoß in Österreich nach [GRR06]

Um die Belastung der Umwelt und der Bevölkerung durch diese Giftstoffe zu reduzieren wurden einige Vorkehrungen getroffen. Sowohl bei Kraftwerken, als auch bei Fahrzeugen werden Filtersysteme eingesetzt. Seit geraumer Zeit gibt es auch gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte für den Ausstoß gesundheitsschädlicher Stoffe. Durch diese Maßnahmen wurde die Emission von Schad- und Giftstoffen zwar reduziert, jedoch nimmt die Anzahl der Emittenten weiterhin stetig zu.

Alleine durch Filter, Katalysatoren und anderen „End-of-the-Pipe“-Ansätze wird die Schad- und Giftstoffproblematik dauerhaft nicht zu lösen sein. Vielmehr bedarf es grundsätzlicher Änderungen zu einer sauberen und nachhaltigen Energiepolitik, welche ohnehin aufgrund der drohenden Verknappung fossiler Brennstoffe notwendig werden wird.

1.2 Trend zur Elektromobilität

In den vorangegangenen beiden Kapiteln wurde die bevorstehende Verknappung fossiler Brennstoffe, sowie die steigenden Gesundheits- und Umweltbelastungen, welche zu einem nicht unerheblichen Teil durch den Verkehr verursacht werden, angeführt.

Der Ersatz des Verbrennungsmotors durch modernere, effizientere und umweltfreundlichere Antriebskonzepte ist eine der zentralen Aufgaben vor welchen der Verkehrssektor in den kommenden Jahrzehnten steht. Hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze.

Eine Möglichkeit ist Verbrennungsmotore mit Erdgas, Biogas bzw. Biodiesel zu betreiben. Der Ausstoß von Schadstoffen bei der Verbrennung diese Treibstoffe ist geringer (Erdgas erzeugt bei dessen Verbrennung knapp 40 Prozent weniger CO_2 als Erdöl), bzw. CO_2 -neutral, da das Heranwachsen der Rohstoffe für Biotreibstoff CO_2 konsumiert. Erdgas ist jedoch genau wie Erdöl ein fossiler Brennstoff, welcher ebenfalls nur in begrenzter Menge verfügbar ist [Rs09].

Die Produktion von Biotreibstoffen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. In Deutschland stieg der Anteil biogener Treibstoffe von 1,4 Prozent im Jahr 2004 auf 7,3 Prozent im Jahr 2007 an. Diese Treibstoffe werden größtenteils mit den konventionellen Treibstoffen gemischt um somit deren effektiven CO_2 -Ausstoß zu reduzieren [Hel09]. Ein gravierender Nachteil der biogenen

Treibstoffproduktion ist die Flächenkonkurrenz mit der Lebensmittelindustrie. Die USA bestreben drei Prozent ihres gesamten Treibstoffbedarfs durch Biotreibstoffe (größtenteils Bioethanol aus Mais) zu decken. Dieses Vorhaben löste in Mexiko jedoch aufgrund des dadurch stark gestiegenen Preises für das Grundnahrungsmittel Mais (+ 54,3 Prozent im Jahr 2006) eine weitreichende Nahrungsmittelknappheit („Tortilla-Krise“) aus und verschlimmerte dadurch die ohnehin bestehende Armut. Die Abhängigkeit der Nahrungsmittel- von der Biotreibstoffproduktion und die damit verbundene soziale Verwerfung ist besonders in ärmeren Ländern eine unüberwindbare Hürde für eine Substitution von konventionellen Treibstoffen durch Biotreibstoffe [Büh10].

Ein weiterer Ansatz zur Nutzung alternativer Energiequellen für die Fahrzeugindustrie ist die Verwendung von Wasserstoff (H_2) als Treibstoff. Wasserstoff kann auf zwei Arten als Energielieferant für den Verkehr eingesetzt werden. Einerseits kann es direkt zur Verbrennung in Kolbenmotoren eingesetzt werden, wobei jedoch genau wie beim konventionellen Verbrennungsmotor, Stickoxide erzeugt werden. Andererseits kann Wasserstoff auch in einer Brennstoffzelle (mit Sauerstoff) zu elektrischem Strom umgewandelt werden. Dieser Vorgang erzeugt neben elektrischer Energie nur reines Wasser. Der Prozess der Elektrolyse um Wasser in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufzutrennen und auch die Energierückgewinnung in der Brennstoffzelle weisen jedoch derzeit nur einen geringen Wirkungsgrad auf (vgl. Tabelle 1.2). Auch die Lagerung von Wasserstoff ist nicht trivial. Er kann entweder in flüssiger Form bei $-253\text{ }^\circ\text{C}$ oder gasförmig bei einem Druck von 350 - 700 bar gelagert werden [Hel09].

Tabelle 1.2: spezifische Energie von Treibstoffen und Wirkungsgrade der Antriebskonzepte [Rs09] [Bra09]

| Treibstoff | $\rho_{Energie}$ | η_{Netz} | $\eta_{Elektrolyse}$ | η_{PEM}^2 | η_{Laden} | η_{Akku} | η_{Motor} | $\eta_{Eff.}$ |
|-----------------|------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Benzin / Diesel | 12 Wh/g | - | - | - | - | - | 0,20 | 0,20 |
| Wasserstoff | 39 Wh/g | - | 0,70 | 0,60 | - | - | 0,95 | 0,40 |
| Strom (Ni-MH) | 0,07 Wh/g | 0,92 | - | - | 0,85 | 0,60 | 0,95 | 0,44 |
| Strom (Li-Ion) | 0,17 Wh/g | 0,92 | - | - | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 0,67 |

Wie aus Tabelle 1.2 hervorgeht, ist die Effizienz von batterie-elektrischen Fahrzeugen aufgrund des hohen Wirkungsgrades von synchronen und asynchronen Drehstrommotoren sehr hoch. Die Effizienz kann noch weiter gesteigert werden durch die Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation). Dabei wird beim Bremsen des Fahrzeuges ein Generator angetrieben, welcher elektrische Energie in die Batterie zurück speist, die bei konventionellen Bremssystemen als Wärmeenergie verloren ginge.

Wird ein Fahrzeug rein batterie-elektrisch betrieben, so entstehen dabei keinerlei, direkt beim Fahrzeug emittierte, Emissionen. Diese Tatsache bringt besonders in Ballungszentren einen enormen Vorteil für die Steigerung der Luftqualität. Auch die Lärmentwicklung solcher Fahrzeuge ist um einiges geringer als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Jedoch erzeugen auch Elektroautos Emissionen und zwar durch die Gewinnung der für sie benötigten elektrischen Energie. Dabei wird unterschieden zwischen den „Well-to-Tank“³- und den „Tank-to-Wheel“⁴-Emissionen. Zweitere sind bei Elektrofahrzeugen gleich Null. Die „Well-to-Tank“-Emissionen jedoch sind stark von der für die Stromerzeugung genutzten Energiequelle abhängig [Kor10].

In Abbildung 1.4 ist erkennbar, dass ein Fahrzeug welches mit elektrischer Energie aus einem Steinkohlekraftwerk betrieben wird, keinerlei Verbesserungen hinsichtlich des CO_2 -Ausstoßes

²„Proton Exchange Membrane“-Wasserstoff-Brennstoffzelle

³„Well-to-Tank“ bezeichnet den Weg der Energie von der Quelle (Bohrloch, etc.) bis zum Tank des Fahrzeuges

⁴„Tank-to-Wheel“ bezeichnet den Weg der Energie vom Tank des Fahrzeuges bis zum bewegten Rad [Rs09]

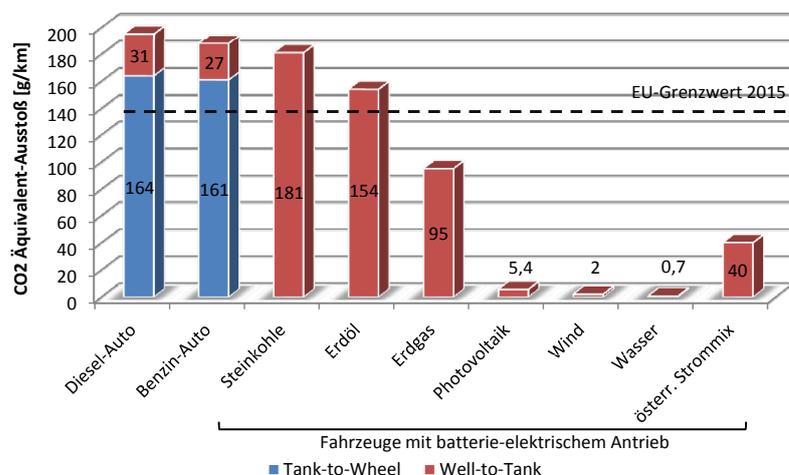


Abbildung 1.4: CO_2 -Äquivalent-Ausstoß nach Antriebs- und Treibstoffarten (Daten aus [Rs09]).

bringt. Die einzigen Vorteile wären die Erhöhung der wirtschaftlichen Unabhängigkeit von den OPEC-Ländern und die Verschiebung der Emissionen von der Straße zum Kraftwerk. Der Vorteil der geringeren Emissionen des Elektrofahrzeuges kommt also nur bei der Verwendung von Energie aus alternativen Energiequellen voll zum Tragen.

Wird ein Elektrofahrzeug mit dem üblichen österreichischen Strommix betrieben, so emittiert es im Schnitt 40 Gramm CO_2 pro Kilometer (vgl. Abbildung 1.4). Dies stellt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen dar. Auch die Grenzwerte der Europäischen Union für den CO_2 -Ausstoß von Fahrzeugen (130 Gramm bis 2015 [Hel09]) wären mit diesem Modell einfach zu erreichen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im österreichischen Strommix ein vergleichsweise großer Anteil (52 Prozent) der Energie aus Wasserkraft stammt. Der europäische Strommix hingegen beinhaltet nur 11,3 Prozent Wasserkraftstrom und würde somit einen entsprechend höheren effektiven CO_2 -Ausstoß generieren.

Es stellt sich nun die Frage, ob der Mehraufwand an elektrischer Energie, welcher durch eine großflächige Einführung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen entstehen würde, überhaupt vom Stromnetz und den Energielieferanten bereitgestellt werden kann. In Schabauer et al. ([S⁺11]) werden vier verschiedene Szenarien angenommen, bei denen ein Mehrstromaufwand von einem Prozent zum momentanen Stromverbrauch bei einer Anzahl von 430.000 Elektrofahrzeugen angegeben wird. In [Rs09] werden etwas höhere Zahlen prognostiziert. Bei einer Durchdringung mit Elektrofahrzeugen von 20 Prozent der in Österreich gemeldeten Fahrzeuge, was einer Anzahl von knapp 900.000 elektrisch betriebenen Fahrzeugen entspricht, erhöht sich der Gesamtstromverbrauch um ca. drei Prozentpunkte. Diese zusätzliche Menge an elektrischer Energie kann, besonders durch die Nachtreserven im österreichischen Stromnetz, leicht bereitgestellt werden [Rs09] [S⁺11].

Einer der größten Kritikpunkte an Elektrofahrzeugen ist deren geringe Reichweite von momentan üblichen 150 bis 200 Kilometern [LL10]. Dies wird bedingt durch die vergleichsweise geringe Energiedichte (vgl. Tabelle 1.2) von elektrochemischen Energiespeichern (z. B. Lithium-Ionen-Batterien) zu der Energiedichte fossiler Energieträger (vorwiegend Benzin und Diesel). Auch die Zeit, welche für das „Nachtanken“ der benötigten Energie gebraucht wird, ist bei batterieelektrischen Fahrzeugen um ein Vielfaches höher als bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen (vgl. Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3: Dauer der Ladung eines 30 kWh-Akkus (verlustloses Laden und rein ohmsche Last vorausgesetzt)

| Kapazität | Spannung | Strom | System | Leistung | Ladezeit |
|-----------|----------|-------|------------|----------|----------|
| 30 kWh | 230 V | 10 A | einphasig | 2,3 kW | 13 h |
| 30 kWh | 230 V | 16 A | einphasig | 3,6 kW | 8,3 h |
| 30 kWh | 400 V | 16 A | dreiphasig | 11 kW | 2,7 h |
| 30 kWh | 400 V | 32 A | dreiphasig | 22 kW | 1,4 h |
| 30 kWh | 400 V | 63 A | dreiphasig | 44 kW | 42 Min. |

Die Entwicklung der Akku-Technologie hat mit der Einführung des Lithium-Ionen-Akkus einige Fortschritte hinsichtlich der Steigerung der spezifischen Energie gemacht, jedoch steckt in der Akku-Technologie noch viel Verbesserungspotential. So könnte es in Zukunft möglich sein, Akkus basierend auf Nano-Technologie binnen Minuten voll aufzuladen [Kor10] [Bra08].

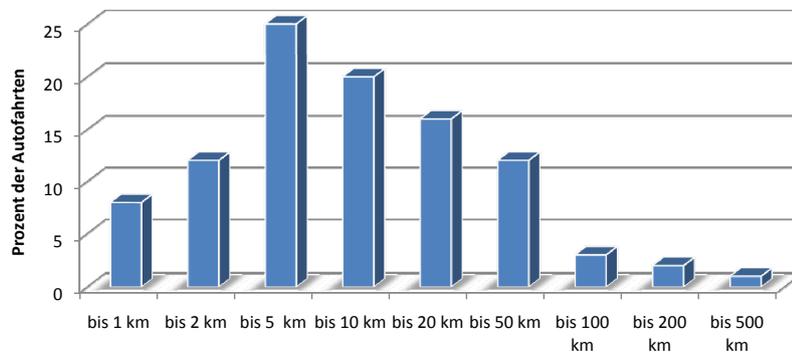


Abbildung 1.5: prozentueller Anteil der Fahrten abhängig von der Distanz [Rs09].

Betrachtet man eine maximale Reichweite von 150 Kilometern mit einer vollgeladenen Batterie, so scheint diese auf den ersten Blick besonders im Vergleich zur Reichweite von Benzin- und Dieselfahrzeugen nicht ausreichend zu sein. Aus Abbildung 1.5 ist jedoch ersichtlich, dass 95 Prozent aller Fahrten im österreichischen Straßenverkehr kürzer als 50 Kilometer sind. Mehr als 80 Prozent der Fahrten sind sogar kürzer als 20 Kilometer. Daraus geht hervor, dass besonders im urbanen Bereich ein Einsatz von Elektrofahrzeugen durchaus möglich und auch sinnvoll ist. Der Einsatz dieser neuen Fahrzeugtechnologie ist auch für Flottenfahrzeuge (z. B. Taxi-Unternehmen, Zulieferunternehmen, Post, usw.) aufgrund der dort üblichen Fahrprofile (viele Kurzstreckenfahrten) und deren Infrastruktur (zentrale Park- und Lademöglichkeiten), sowie der deutlich geringeren Betriebskosten⁵ der Fahrzeuge empfehlenswert [Rs09].

Verschiedene Studien gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2020 in Österreich ein Anteil von neun bis 25 Prozent an Elektrofahrzeugen auf Österreichs Straßen unterwegs sein wird [Kor10] [Hel09]. Diese Zahlen hängen stark von der Unterstützung durch Bund und Länder (Subventionen), von der Entwicklung der Fahrzeugakkus und vor allem von der weiteren Entwicklung des Ölpreises ab. Auch die, von der EU vorgeschriebene, Reduktion des CO_2 -Ausstoßes kann deutlich zur Verbreitung von alternativen Antriebskonzepten, insbesondere von Elektrofahrzeugen beitragen.

⁵Kosten pro 100 km: 6 - 9 € bei konventionellem Treibstoff, 3 - 4 € bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen [LL10].

1.3 Problembeschreibung

Steigt die Anzahl der batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeuge in Österreich in den kommenden Jahrzehnten an, so muss dafür auch mehr elektrische Energie zur Verfügung gestellt werden. Das folgende Rechenbeispiel soll verdeutlichen in welchen Größenordnungen sich der Mehraufwand an Energie bewegen wird.

Ausgehend von einer Jahresfahrleistung von 15.000 Kilometern pro Fahrzeug und einem Energieverbrauch von 15 kWh pro 100 Kilometern ergeben sich die in Tabelle 1.4 dargestellten Prognosen. Sie sind eine grobe Abschätzung für den durch den elektrifizierten Individualverkehr verursachten Mehraufwand an elektrischer Energie. Die prozentuelle Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs, die in Tabelle 1.4 angegeben ist, bezieht sich auf 62.000 GWh (Referenzjahr 2007) an umgesetzter Energie in Österreich [Hel09] [Bra08].

Tabelle 1.4: Erhöhung des österreichischen Jahresenergieverbrauchs durch EV

| Durchdringung Elektrofahrzeuge (EV) | ca. 10 % EV | ca. 20 % EV | ca. 50 % EV |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Anzahl an EV | 500.000 | 1.000.000 | 2.500.000 |
| Gesamtfahrleistung der EV [Mio. km] | 7.500 | 15.000 | 37.500 |
| gesamter Jahresenergieverbrauch [GWh] | 1.125 | 2.250 | 5.625 |
| Erhöhung des Energieverbrauchs [%] | 1,81 % | 3,63 % | 9,07 % |

Es ist erkennbar, dass sich die Erhöhung des Energieverbrauchs in den kommenden Jahren in einem Bereich bewegen wird, der kleiner als zehn Prozent des gesamten Jahresenergieverbrauchs Österreichs ist. Diese Menge an elektrischer Energie kann durch die österreichischen Energieversorger und das internationale Stromnetz zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere in den Nachtstunden sind große Energiereserven vorhanden, welche dazu genutzt werden sollten [BL08].

Auch die Anschlussleistung, welche benötigt wird um die Akkus der Elektrofahrzeuge zu laden spielt eine zentrale Rolle. Wie in Tabelle 1.3 angegeben ist, wird besonders für Schnellladevorgänge eine Leistung von 20 kW und mehr pro Ladestation benötigt. Beispielsweise kann der Akku des Elektroautos „iMiEV“, welches seit 2009 von Mitsubishi hergestellt wird, bei verfügbarer Anschlussleistung mit bis zu 50 kW in 30 Minuten zu 80 Prozent geladen werden [KMS10]. Bei solch einer Ladeleistung kann es vor allem durch gleichzeitiges Laden lokal zu Überlastungen der Netze kommen. Typische Ortsnetztransformatoren sind für eine maximale Leistung von 630 bzw. 800 kVA ausgelegt. Aufgrund der bereits bestehenden Transformatorbelastung durch die Haushalte und notwendigen Reserven besteht nicht mehr sehr viel Spielraum für ungesteuerte Ladestationen mit Leistungsansprüchen jenseits der 20 kW [LL10].

Die starke (variable) Belastung der Verteilnetze verursacht einen erhöhten Stromfluss. Damit verbunden ist ein erhöhter Spannungsabfall entlang der Versorgungsleitung aufgrund des Leitungswiderstandes. Dies kann besonders bei langen Stichleitungen (z. B. in Tälern) dazu führen, dass die Versorgungsspannung am Ende der Leitung unter den Grenzwert von 90 Prozentpunkten des normierten Spannungsniveaus fällt [ÖVE06]. In Abbildung 1.6 ist das typische Lastprofil eines österreichischen Ortsnetzes an einem Winter-Werks tag (12.01.2011; Quelle: Salzburg AG) abgebildet. Die dargestellte Leistungskurve entspricht einem H0-Standardlastprofil⁶ und wird normiert dargestellt. Es ist üblich, dass pro Tag zwei bis drei Lastspitzen auftreten. Eine um die

⁶H0 bezeichnet das Standardlastprofil für Haushalte (Verband der Elektrizitätswirtschaft – VDEW)

Vormittags- bzw. Mittagszeit und eine weitere am späten Nachmittag. Bedingt durch die Produktion in der Industrie und das wirtschaftliche Treiben sind generell die Lastkurven der Wochentage etwas höher anzunehmen als die der Wochenendtage. In den Sommermonaten befindet sich diese Lastkurve auf einem etwas niedrigerem Niveau, da Verbraucher wie elektrische Heizgeräte, Nachtspeicheröfen, Durchflusserhitzer, usw. weniger genutzt werden. Der Verlauf der Lastkurve bleibt jedoch prinzipiell ähnlich [LL10].

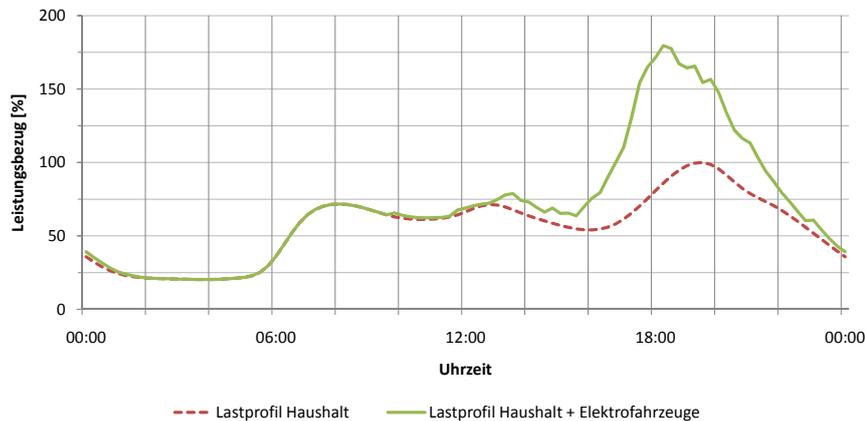


Abbildung 1.6: normiertes Haushaltslastprofil und Lastgang von 0,58 Elektrofahrzeugen je Haushalt [Nau11] [LL10].

Geht man bei 200 Haushalten von einer durchschnittlichen Bewohnerzahl von 2,31 Personen pro Haushalt und einem Motorisierungsgrad von 51 Prozent aus, so ergeben sich daraus insgesamt 231 motorisierte Fahrzeuge. Bei einem Anteil von 50 Prozentpunkten an Elektrofahrzeugen (entspricht 116 batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen) kann eine grobe Abschätzung des benötigten Energieaufkommens durchgeführt werden [Lit09]. Werden die Elektrofahrzeuge ungesteuert, ausschließlich zuhause nach Beendigung der letzten Fahrt geladen, so ergibt sich der in Abbildung 1.6 dargestellte Mehrverbrauch an elektrischer Energie. Es ist gut erkennbar, dass sich hauptsächlich in den Nachmittags- und Abendstunden eine starke Belastung der Netze ergeben wird. Durch das ungesteuerte Laden der Fahrzeugbatterien ergibt sich für das Modell von 116 Elektrofahrzeugen in 200 Haushalten ein maximaler Mehraufwand an elektrischer Leistung von rund 80 Prozent [LL10]. Dieses Szenario berücksichtigt ausschließlich Ladeleistungen von 3,67kW. Ein Laden mit höheren Leistungen könnte zu einem noch drastischeren Anstieg der Leistungsspitzen führen.

Ein solches ungesteuertes Ladeverhalten führt somit zu einer weiteren Steigerung der Spitzenbelastung der Netze. Da die Abdeckung der Lastspitzen hohe Kosten verursacht und dafür Kraftwerksreserven vorgesehen werden müssen, gilt es diese möglichst gering zu halten. Auch die derzeit installierten Verteilnetze sind teilweise nicht für einen so enormen Leistungsanstieg ausgelegt und müssten dafür weiter ausgebaut werden [LL10]. Es ist festzuhalten, dass bei einer stetigen Zunahme des elektrifizierten Straßenverkehrs der Mehraufwand an Energie zwar großteils durch die Nachtreserven, Energiereserven und geplanten Kraftwerksbauten befriedigt werden kann, jedoch ein unkoordiniertes Laden der Elektrofahrzeuge zu Problemen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Netze (Leitungen und Transformatoren) und Kraftwerke führen wird. Auch wäre ein Betrieb von Elektrofahrzeugen, welcher ein Lastprofil wie das in Abbildung 1.6 dargestellte zur Folge hätte, äußerst unwirtschaftlich und ineffizient. Es ist daher eine koordinierende Instanz notwendig, welche eine Lastverteilung ermöglicht und dafür eine Anpassung der Ladezeiten von Elektrofahrzeugen an die jeweilige Netzsituation durchführbar macht.

2 State of the Art und Aufgabenstellung

Der technologische Fortschritt ist im Bereich der Elektromobilität momentan stark erkennbar. Anfangs wurden die Akkus der Elektrofahrzeuge der Einfachheit halber über die sehr weit verbreitete Haushaltssteckdose¹ geladen (Abbildungen 2.1(a) und 2.1(b)). Das österreichische Stromnetz liefert hierfür eine Wechselspannung von 230 V bei einer, in Haushalten üblichen, Absicherung von 10 bzw. 16 A. Diese Konfiguration ermöglicht eine maximale Ladeleistung von 2,3 bzw. 3,7 kW. Momentan ist diese Art der Akkuladung die verbreitetste, da die Schuko-Steckdose in jedem Haushalt zu finden ist und somit keine weiteren Aufwendungen für das Laden des Fahrzeugakkus nötig sind (vorausgesetzt eine Schuko-Steckdose ist in der Garage, bzw. im Parkbereich verfügbar).

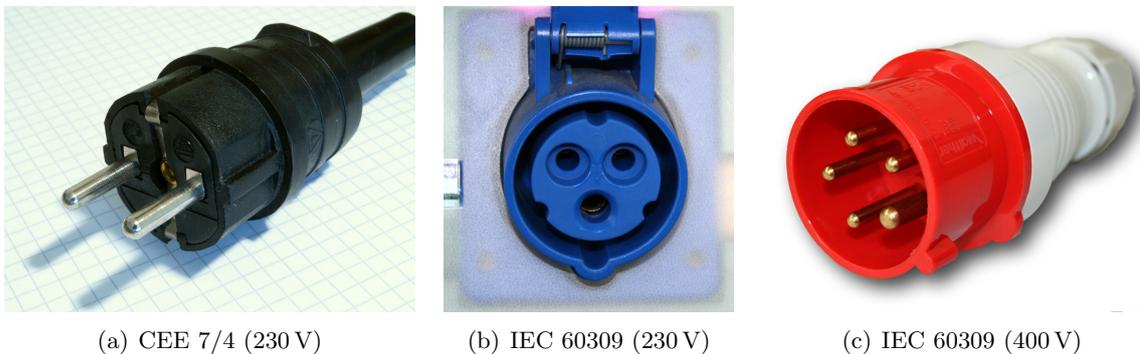


Abbildung 2.1: Steckverbindungen: (a) nach CEE 7/4; (b), (c) nach IEC 60309

Aufgrund der geringen Ladeleistung, bedingt durch das Stromlimit der gängigen Haushaltsinstallation, wird vermehrt auf dreiphasige 400 V Drehstrom-Anschlüsse zum Laden der Akkumulatoren umgestellt. Die in Österreich für 400 V Drehstrom übliche CEE-Steckverbindung² (nach IEC 60309) ist in Abbildung 2.1(c) zu sehen. Hiermit ist eine Leistungsübertragung von mindestens 11 kW (bei 16 A Ladestrom) möglich. Die Drehstromstecker nach IEC 60309 sind ausgelegt für Strom weit über 16 A, womit auch eine Schnellladung der Fahrzeugakkus (unter 60 Minuten) ermöglicht wird. Wichtig für eine solche Schnellladung sind neben den Stecksystemen (welche für 16, 32, 63 und 125 A ausgelegt sind) die Anpassung der Leitungen, des Haushaltsanschlusses und dessen Absicherung [PS08].

¹Schutzkontakt (Schuko)-Stecker: CEE 7/4

²CEE steht für „Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment“ und ist die internationale Kommission für die Regelung der Zulassung elektrischer Ausrüstungen

Für die Ladung einer geringen Anzahl von Elektrofahrzeugen reicht ein ungesteuertes Ladesystem über die in Abbildung 2.1 dargestellten Steckverbindungen aus. Diese Stecker sind für den Ladevorgang im privaten Bereich in der Einführungsphase der Elektromobilität auch gut geeignet, da das Steckersystem weit verbreitet ist und dadurch keinerlei zusätzlicher Installationsaufwand bzw. Mehrkosten für den Fahrzeugbesitzer entstehen.

Bei einer weiteren Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird, wie in Kapitel 1.3 ab Seite 9 beschrieben ist, ein System zur Steuerung des Ladevorganges benötigt um Leitungsüberlastungen und eine weitere Erhöhung der Lastspitzen zu vermeiden. Dies setzt Ladestationen mit integrierten Technologien für die Kommunikation und Fernsteuerung voraus. Solche Ladestationen werden momentan von verschiedenen Unternehmen (Energieversorgern, Fahrzeugherstellern, etc.) entwickelt und bilden die Grundlage für die Vermeidung unerwünschter Effekte im Stromnetz bei großflächiger Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Intelligente Ladestationen ermöglichen weiters den Einstieg in die nächste Generation von Energieversorgungsnetzen (Smart Grids).

2.1 Normierung und Standards

In den Jahren 2010 bis 2015 werden voraussichtlich 18 neue Elektrofahrzeugmodelle der unterschiedlichsten Hersteller am österreichischen Markt eingeführt [PWL10]. Um eine möglichst gute Interoperabilität der Fahrzeuge mit den Ladestationen gewährleisten zu können, wird eine Standardisierung der Ladeschnittstelle benötigt. Dadurch wird vermieden, dass für die Ladung eines Elektrofahrzeuges ausschließlich ein, dafür vorgesehenes Ladesystem verwendet werden muss, was eine deutliche Beeinträchtigung der Mobilität darstellen würde.

Eine Normierung ist nicht nur für eine unkomplizierte Ladung des Fahrzeugakkus an sich notwendig, sondern auch für die Einbindung von Elektrofahrzeugen in die Stromnetze der nächsten Generation (Smart Grids).

Folgende, in Abbildung 2.2 dargestellte, Abschnitte eines Ladesystems bedürfen einheitlicher Vorgaben durch spezielle Normen (Nummerierung entsprechend Abbildung 2.2):

1. Die elektrische Anbindung der Ladestation an das elektrische Verteilnetz sowie derer Absicherung.
2. Die elektrische Verbindung des Elektrofahrzeuges mit der Ladestation (Kabel, Steckverbindungen, usw.).
3. Die Lademodi zur Ladung der Elektrofahrzeuge (Anzahl der Phasen, Spannung, Stromstärke, Ladedauer, usw.).
4. Die Kommunikation bzw. Datenübertragung vom Back-End des Energieversorgers zu den Ladestationen.
5. Die Kommunikation bzw. Datenübertragung zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation (z. B. zur Identifikation, Festlegung des Lademodus, Übertragung des Ladestandes, usw.).

Zusätzlich sind noch weitere (allgemeinere) Normen zu beachten (z. B. Niederspannungs-Installationsnorm IEC 60364, Schutzklassen nach DIN EN 61140, usw.). Die speziell für die Elektrofahrzeugladung bestimmten Normen werden im folgenden Abschnitt erklärt.

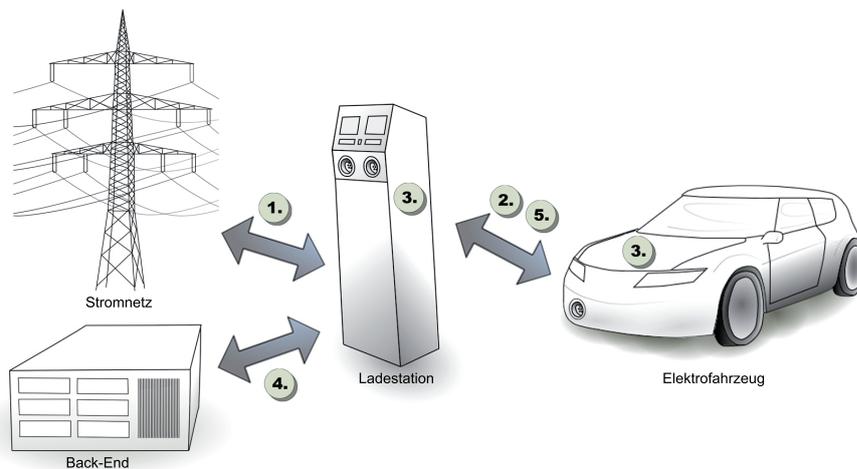


Abbildung 2.2: Normungsbedarf eines Ladesystems für Elektrofahrzeuge

In der Einführungsphase der Elektrofahrzeuge finden großteils Schuko-Stecker (CEE 7/4) und Stecksysteme nach IEC 60309 (sgn. „CEE-Stecker“) Verwendung. Diese wurden bereits im vorhergehenden Abschnitt kurz beschrieben. Die beiden in Österreich am weitesten verbreiteten CEE-Steckerarten sind in Abbildung 2.1(b) und 2.1(c) dargestellt.

Die zusätzlichen Sicherheits- und Kommunikationsanforderungen können mit den bisher üblichen Steckverbindungen jedoch nicht mehr ausreichend befriedigt werden. Aus diesem Grund befinden sich momentan einige neuere Standards in Entwicklung (z. B. IEC 62196-3: Steckverbindung für Gleichspannungen bis 1000 V und 400 A) oder es werden bestehenden Standards für die Anforderungen der Elektromobilität erweitert [8].

Im internationalen Standard IEC 61851-1 der Internationalen Elektronischen Kommission (IEC) werden vier Lademodi (vgl. Tabelle 2.1) sowie eine Stromfreischaltung der Kontakte mit Hilfe eines Signaling-Pins nach IEC 61851 angeführt [9]. In der nächsten, noch in Bearbeitung befindlichen, Ausgabe des zweiten Teils dieses Standards (IEC 62196-2) werden voraussichtlich drei Steckertypen für Wechselspannungsladung vorgegeben. Auch wird es eine Standardisierung der Anforderungen für Gleichspannungs-Steckverbindungen in IEC 62196-3 geben [8].

2.1.1 Steckverbindungen

Die drei Steckertypen für die Wechselspannungsladung von Elektrofahrzeugen sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Alle drei verfügen über Signalisierungspins (basierend auf IEC 61851) mit deren Hilfe die Kontakte spannungsfrei gehalten werden bis die Steckverbindung (mittels Pulsweitenmodulation am Signaling-Pin) freigegeben werden. Somit können Schäden und Verletzungen durch Kontakt mit den spannungsführenden Steckverbindungen vermieden werden. Auch wird es durch die Signalisierungspins ermöglicht, das Wegfahren des Fahrzeuges bei verbundener Ladeleitung zu unterbinden [9].

- **Type 1 – z. B. „Yazaki-Stecker“**

Abbildung 2.3(a) wird in IEC 62196-2 als „Type 1“ bzw. umgangssprachlich als „Yazaki-Stecker“ (nach einem der größten Hersteller dieser Stecker-Type, der Yazaki Group) bezeichnet. Die ursprünglich von der Society of Automotive Engineers (SAE) in den USA

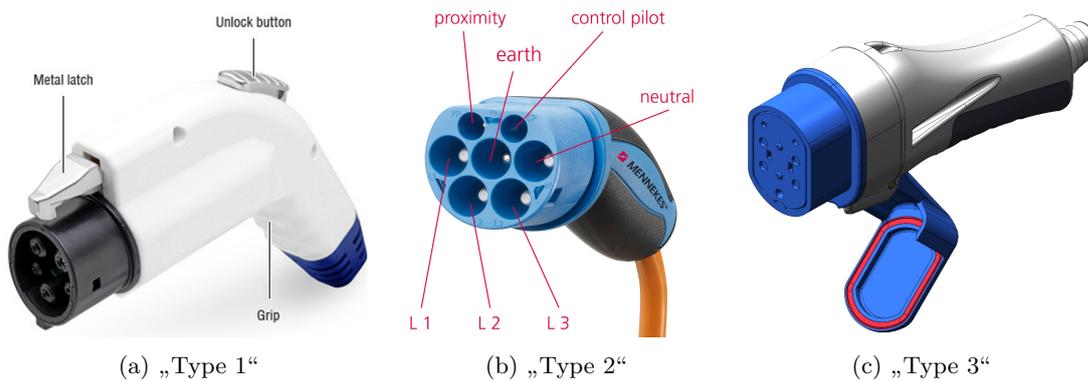


Abbildung 2.3: Beispiele für Steckverbindungen nach IEC 62196-2:

- (a) „Type 1“ (mit freundlicher Genehmigung von Yazaki Europe Ltd.),
- (b) „Type 2“ (mit freundlicher Genehmigung von Mennekes GmbH & Co. KG) und
- (c) „Type 3“ (mit freundlicher Genehmigung von Scame Parre S.p.A.).

veröffentlichte Spezifikation für diese Steckertypen (SAE J1772-2009) wurde in IEC 62196-2 übernommen. Die Steckverbindung ist fünfpolig ausgeführt, wovon zwei Pins für Signalisierung und Wegfahrsperrung, zwei für die Spannungsübertragung und einer als Erdungs-Kontakt verwendet werden. Die Ladung kann hierbei nur einphasig durchgeführt werden. Der „Yazaki-Stecker“ findet vor allem in den USA Anwendung und ist dort für einen Ladestrom bis zu 80 A bei 250 V spezifiziert [14].

- **Type 2 – z. B. „Mennekes-Stecker“**

In Abbildung 2.3(b) ist der, in IEC 62196-2 als „Type 2“, bzw. umgangssprachlich als „Mennekes-Stecker“ bezeichnete Steckverbinder dargestellt. Dieser soll hauptsächlich im europäischen Raum Anwendung finden und stellt, nach den CEEplus³-Steckern, eine Weiterentwicklung der bekannten IEC 60309-Stecker dar. Die Ladung kann sowohl einphasig (250 V, max. 70 A), als auch dreiphasig (380 - 480 V, max. 63 A) durchgeführt werden. Von den sieben Kontakten werden drei für die Phasen (L1, L2, L3), einer als Neutral- und einer als Erdungsleiter verwendet. Zusätzlich sind zwei (dünner ausgeführte) Kontakte für die Signalisierung und Wegfahrsperrung vorgesehen. Dieses Stecksystem wurde von der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) bereits im November 2009 standardisiert (VDE-AR-E 2623-2-2) [20] [14].

- **Type 3 – z. B. „Scame-Stecker“ der EV Plug Alliance**

Schneider Electric, Legrand und Scame haben sich 2010 zur EV Plug Alliance zusammengeschlossen und ein Stecksystem entwickelt welches dem „Type 3“ des IEC-Standards 62196-2 entspricht. Die in Abbildung 2.3(c) dargestellte Steckvorrichtung ist als vier-, fünf- oder sieben-Pin Variante vorgesehen. Eine Abdeckvorrichtung verhindert das Berühren der blanken Kontakte. Jede der drei Variationen dieser Steckverbindung verfügt über mindestens einen Spannungspol (L1), sowie einen Neutral- und einen Erdungs-Pin. Auch ein Signalisierungspol zur Kommunikation zum Fahrzeug ist fix vorgesehen. Zwei weitere Spannungspole (L2 und L3) für dreiphasige Ladevorgänge, sowie ein Pin für die Wegfahrsperrung des Fahrzeuges sind optional. Die einphasige Ladung erfolgt bei 250 V mit 16 oder 32 A. Bei dreiphasiger Ladung kann bei 380 - 480 V mit 32 A geladen werden [13].

³CEEplus ist eine kompatible Erweiterung der CEE-Drehstromstecker nach IEC 60309 durch Signalisierungspins

Zusätzlich zu diesen drei Stecksystemen für die Ladung von Elektrofahrzeugen mit Wechselspannung scheint sich die, in Japan entwickelte, CHAdeMO-Ladesteckvorrichtung für Gleichspannungsladung mit bis zu 125 A bei 500 V zu etablieren [18]. Diese Steckvorrichtung ist standardisiert in Japan Electric Vehicle Standard (JEVS) G 105-1993, welcher vom Japanese Automotive Research Institute (JARI) veröffentlicht wurde. Entwickelt wurde dieses Gleichspannungsladesystem von einer Gruppe japanischer Automobilhersteller in Zusammenarbeit mit der Tokyo Electric Power Company (TEPCO), welche sich im März 2010 zur „CHAdeMO-Association“⁴ zusammenschlossen. Das CHAdeMO-System wird bereits von einigen europäischen, sowie nordamerikanischen Ladeequipmentherstellern eingesetzt und produziert [1].

2.1.2 Lademodi nach IEC 61851

In der Norm IEC 61851 sind vier Lademodi definiert, welche Vorgaben für Stecker, Dosen, Verbindungen und Kabel für konduktives Laden beinhalten. Diese Lademodi spezifizieren ein Laden mit Wechselspannungen bis 690 V (50 - 60 Hz) und einem maximalen Strom von 250 A. Die Ladung mit Gleichspannung ist mit bis zu 600 V und einem maximalen Strom von 400 A möglich [7].

Tabelle 2.1: Lademodi nach 61851 [7] [9]

| Modus | Beschreibung | Strom |
|--------|----------------------------|------------|
| Mode 1 | 1- oder 3-phasig (AC) | 16 A |
| Mode 2 | 1- oder 3-phasig (AC) | 32 A |
| Mode 3 | 1- oder 3-phasig (AC) | 32 / 250 A |
| Mode 4 | 2- (DC) oder 3-phasig (AC) | 400 A |

Mode 1 und Mode 2 nutzen die übliche Hausinstallation und -spannungen. Der Ladestrom ist bei Mode 1-Ladung auf 16 A begrenzt. Da für eine sichere Ladung die Erdung und eine Fehlerstrom-Absicherung unbedingt nötig sind, diese jedoch bei älteren Installationen nicht vorgeschrieben und daher evtl. auch nicht vorhanden sind, ist der Lademodus 1 in einigen Ländern nicht zugelassen [9].

Der Lademodus 2 ermöglicht das Laden mit bis zu 32 A Stromstärke und schreibt eine Fehlerstrom-Absicherung und ein Absicherungssystem im Kabel bzw. im Stecker (Pilot-Pin) vor, welche Verletzungen durch Berührung spannungsführender Pins verhindert [9].

Für den Lademodus 3 werden spezielle Steckverbinder (siehe z. B. Abbildung 2.3) benötigt. Es werden einzelne Pins der Steckverbindung dazu verwendet um die Spannungsversorgung nur dann zu aktivieren, wenn auch wirklich ein Fahrzeug mit der Ladestation verbunden ist und um dann ggf. höhere Ladeströme (Lademodi nach IEC 61851-1) freizuschalten. Auch eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation ist über diese Kontakte möglich [9] [7].

Der Lademodus 4 hebt sich von den anderen dadurch ab, dass er neben einer dreiphasigen Ladung mit bis zu 32 A auch für Gleichspannungsladung spezifiziert wurde. Die Gleichspannungsladung erfolgt dabei zweipolig durch ein externes Ladegerät mit bis zu 400 A Ladestrom. Es werden ebenfalls Signalisierungspins verwendet um die Kompatibilität des Fahrzeuges mit der Station zu überprüfen und den jeweiligen Lademodus zu aktivieren [9] [7].

⁴Mitglieder der CHAdeMO-Association sind: Toyota, Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries und die Tokyo Electric Power Company (Stand: März 2011)

2.1.3 Kommunikation nach IEC 61850 und IEC 15118

In Abbildung 2.4 ist das Prinzip eines Kommunikationsmodelles dargestellt. Die Kommunikation zwischen einer zentralen Einheit und dem Elektrofahrzeug verläuft hierbei in zwei Abschnitten, welche durch die Ladestation gekoppelt werden. Durch die in den Normen IEC 61850 und IEC 15118 spezifizierten Datenstrukturen kann jeweils einer der beiden Kommunikationspfade realisiert werden, worauf im folgenden Abschnitt kurz eingegangen wird.

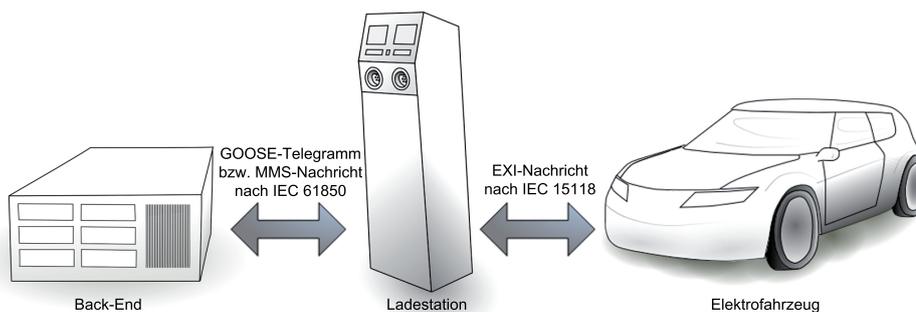


Abbildung 2.4: Kommunikationsmodell nach IEC 61850 und IEC 15118

Die Normenreihe IEC 61850 definiert ein Kommunikationssystem, welches für die Schutz- und Leittechnik elektrischer Anlagen sowohl im Mittelspannungsnetz, als auch im Hochspannungsnetz konzipiert wurde. Der Kommunikationsstack, der für die Übertragung der Nachrichten verwendet wird, baut unter anderem auf Ethernet- und TCP/IP-Verbindungen auf. Mittlerweile wurden einige Erweiterungen der Normungsreihe erstellt, welche das Kommunikationskonzept verallgemeinern und damit auch für Wind- und Wasserkraftanlagen verwendbar machen. Es wurden auch Parameter für die Anlagenkommunikation für dezentrale Energieversorgung vorgesehen [Sch04].

Durch die Verallgemeinerungen, welche im Zuge der Erweiterungen eingeführt wurden und die Verwendung XML-basierter Konfigurationsdateien, ist es denkbar auch die Ladestationen für Elektrofahrzeuge zu beschreiben und die Kommunikation zu ihnen aufzubauen. Für die Beschreibung einer Anlage wird die in der Norm definierte „Substation Configuration description Language“ (SCL) verwendet, welche auf Extensible Markup Language (XML) basiert. Mit Hilfe der SCL werden unter anderem auch die Gesamt-Systemkonfiguration, Adressen von Geräten und logischen Knoten und deren Kommunikationsbeziehungen beschrieben [Sch04].

Die realen Geräte werden hierbei mit allen relevanten Informationen auf logische Einheiten abgebildet. Diese Einheiten beinhalten logische Knoten (z. B. Leistungsschalter, Trenner, Messpunkte, usw.), welche wiederum Datenobjekte mit Attributen und Steuermöglichkeiten enthalten. Für das eingesetzte hierarchische Modell sind in der Norm ca. 90 unterschiedliche logische Knoten, ca. 550 anwendungsbezogene Datenklassen und ca. 120 Datenattribute definiert. Der Zugriff auf die Attribute bzw. die Steuerung kann entweder über so genannte GOOSE-Telegramme⁵ direkt über die Ethernet-Verbindung erfolgen oder mittels MMS-Nachrichten⁶ über TCP/IP-Verbindungen [Sch04].

Bei der Datenübertragung werden nicht nur die reinen Mess- und Steuerwerte übertragen, sondern auch eine große Anzahl von relevanten Zusatz- und Meta-Daten. So können zu einem Messwert

⁵Generic Object Oriented Substation Events (GOOSE)-Telegramme werden verwendet zur schnellen Übertragung von Nachrichten (Messwerten) über Ethernet

⁶Manufacturing Messaging Specification (MMS) ist ein Transportprotokoll-unabhängiger Nachrichtentyp zum objektorientierten Datenaustausch in (verteilten) Produktionssystemen

zusätzlich z. B. auch dessen Wertebereich, die SI-Einheit, die Abtastrate, der Skalierungsfaktor oder eine textuelle Beschreibung des Messwertes übertragen werden. Auch bei einem Steuerbefehl sind Zusatzinformationen, wie der Zeitpunkt zu dem gesteuert werden soll, die Steuerquelle, ein Ersatzwert, eine Beschreibung oder eine Erweiterungskennung üblich [Sch04].

Die Norm IEC 15118 definiert, im Gegensatz zur IEC 61850, ein Interface zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation und befindet sich zurzeit noch in der Ausarbeitungsphase. Dieses Interface dient unter anderem zum Austausch von Informationen bezüglich der Ladung und Identifikation und setzt voraussichtlich auf einer seriellisierten, binären XML-Struktur auf [KSWH10].

In der Norm IEC 15118 sind verschiedene Nachrichten definiert, welche immer aus einem Nachrichten-Header und einem -Body bestehen. Der Nachrichten-Header beinhaltet allgemeine Informationen, wie Sessions, Identifier oder die Protokoll-Versionsnummer. Der Nachrichten-Body beinhaltet die eigentliche Nachricht, welche entweder einen Request oder einen Response darstellt. Folgende Nachrichten sind definiert:

Tabelle 2.2: Nachrichtentypen nach IEC 15118 [KSWH10]

| | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Service Discovery | Erste Nachricht vom Fahrzeug (EV) zur Ladestation (LS) zur Erkundung möglicher (Lade-)Services. |
| Authorization | Nach der Service-Wahl erfolgt die Autorisierung zum Austausch von Sicherheits- und Statusinformationen. |
| Power Discovery | Es werden Ladeinformationen ausgetauscht zum Überprüfen der Kompatibilität und zur Berechnung der voraussichtlichen Kosten. |
| Power Delivery | Das EV bestätigt das ausgehandelte Ladeprofil und beginnt die Ladung. |
| Metering Status | Periodischer Informationsaustausch während der Ladung zwischen EV und LS (Abwechselnd mit Metering Receipt). |
| Metering Receipt | Periodischer Informationsaustausch während der Ladung zwischen EV und LS (Abwechselnd mit Metering Status). |
| Power Off | Nachricht zum Deaktivieren des Ladestroms vom EV zur LS. |
| Line Lock | Durch diese Nachricht wird das Ladekabel in der Buchse fixiert um es vor unberechtigter Entfernung zu schützen. |
| Line Unlock | Diese Nachricht hebt die Verriegelung des Ladesteckers wieder auf. |

Auf Grund der beschränkten Ressourcen eingebetteter Systeme, ist der Einsatz von Klartext-XML nicht empfehlenswert. In IEC 15118 wird daher binäres XML verwendet. Im Speziellen handelt es sich dabei um das „Efficient XML Interchange“-Format (EXI), welches besonders für Systeme mit geringen Ressourcen (z. B. kleine Mikrocontroller) leichter zu verarbeiten ist [KSWH10].

Mit Hilfe der IEC 15118 EXI-Nachrichten, welche z. B. via Powerline-Communication (PLC) zwischen Fahrzeug und Ladestation kommuniziert werden und dem hierarchischen Kommunikationsmodell nach IEC 60850 kann ein vollständiger Kommunikationspfad zwischen dem Elektrofahrzeug und dem Energienetz aufgebaut werden. Als Gateway für die Kommunikation dient hierbei die Ladestation [KSWH10].

2.2 Ladestationen für Elektrofahrzeuge

Im folgenden Abschnitt werden drei aktuell im deutschsprachigen Raum verfügbare Ladestationen genauer beschrieben. Das Hauptaugenmerk liegt dabei sowohl auf den eingesetzten Technologien für die Datenverarbeitung, zentrale Datenhaltung, Kommunikation und Identifikation, sowie auf den verwendeten Geschäfts- und Abrechnungsmodellen. In weiterer Folge wird noch untersucht, in wie fern intelligente, netzentlastende Funktionen in den jeweiligen Ladestationen implementiert wurden.

Bei der Beschreibung werden nur Ladestationen mit einem erweiterten Funktionsumfang beachtet. Das heißt, reine „Steckdosen“ oder „Adapter-Systeme“, welche keinerlei weitere Funktion aufweisen, werden nicht weiter beschrieben. Sie stellen jedoch, zumindest zum jetzigen Zeitpunkt, den Großteil der, für Elektrofahrzeuge verwendeten, „Ladestationen“ dar.

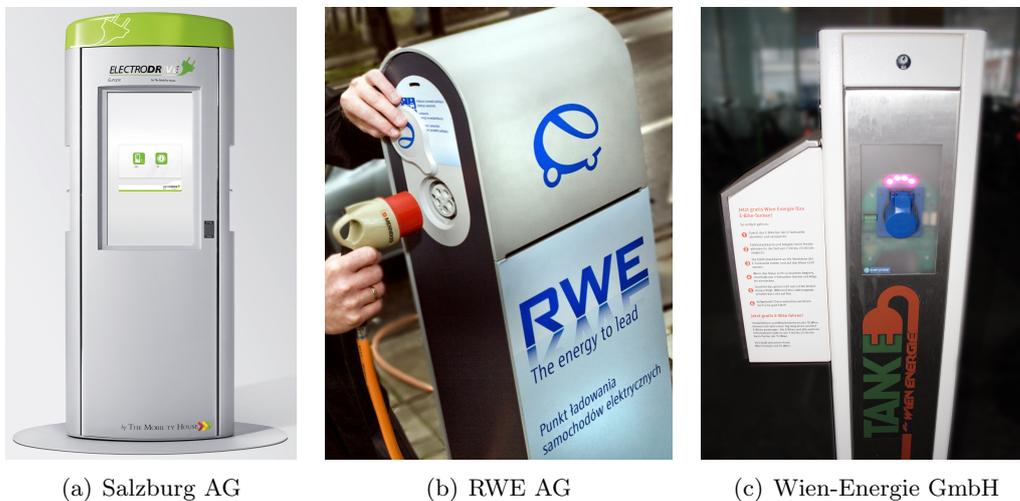


Abbildung 2.5: Beispiele für Ladestationen mit erweitertem Funktionsumfang von Salzburg AG (a), RWE AG (b) und Wien-Energie GmbH (c).
Quellen und Copyright: eigene Abbildung, The Mobility House und rwe-mobility.com

Auch kann, da sich die Elektromobilität erst in den Startlöchern befindet und eine Menge an Ladesystemen in vielen Ländern der Welt gerade erst entwickelt werden, hier kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt werden. Es werden lediglich einige Vertreter und deren Funktionen beschrieben um den Stand der Technik, den Funktionsumfang und die technischen Möglichkeiten festzuhalten und aufzuzeigen.

Folgende Ladestationen wurden hinsichtlich der eingesetzten Technologien, Funktionen und der Geschäfts- und Abrechnungsmodell untersucht:

- „Home“- und „Public“-Ladestationen der Salzburg AG
- „Smart Station“ der Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (RWE) AG
- „E-Tankstellen“ der Wien-Energie GmbH

Diese Ladestationen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

Zusätzlich zu diesen Ladestationen wurden auch noch Informationen zur Modellregion VLOTTE in Vorarlberg und zum Forschungsprojekt BALLADE eingeholt. Die Modellregion VLOTTE ist die erste E-Mobilitätsmodellregion in Österreich und wird vom österreichischen Klima- und Energiefond unterstützt. Ende 2010 waren in Vorarlberg 77 Elektrofahrzeuge in dieser Modellregion angemeldet und 59 Stromtankstellen in Betrieb [11].

2.2.1 Kommunikation zu Fahrzeug und Back-End

Abbildung 2.6 zeigt eine Übersicht über die Kommunikationswege der untersuchten Ladestationen. Die Kommunikation vom Fahrzeug zum zentralen Server erfolgt nie direkt, sondern immer über die Ladestation, welche dabei als Gateway fungiert.

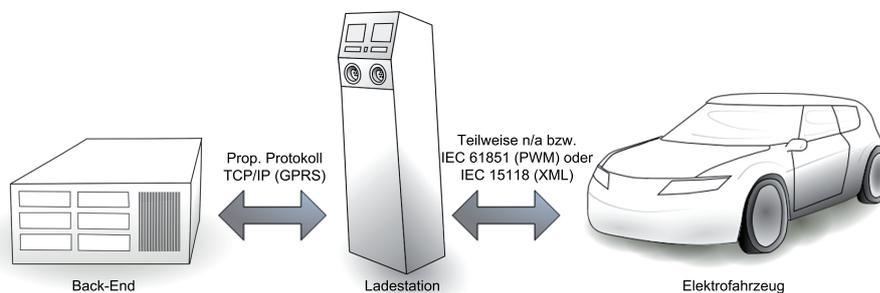


Abbildung 2.6: Übersicht der Kommunikation untersuchter Ladestationen

Die Kommunikation der Ladestationen mit dem jeweiligen zentralen Server erfolgt TCP/IP-basiert über das GSM/GPRS Netzwerk. Es sind jedoch teilweise auch kabelgebundene Kommunikationsmöglichkeiten (z. B. Ethernet) angedacht um Empfangsproblemen (z. B. in Tiefgaragen oder Gebieten mit schlechter Mobilfunkabdeckung) vorzubeugen. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation ist abhängig von der Art des Fahrzeuges und der Ladestation. Bei Elektrofahrrädern beispielsweise erfolgt weder bei den Wien-Energie-Ladestationen, noch bei den Stationen der Salzburg AG eine Kommunikation. Für Elektroautos hingegen ist, wenn durch das Stecksystem zugelassen, eine Kommunikation mit Hilfe des Signalisierungspins (z. B. einfache Ladestrom-Einstellung mittels Pulsweitenmodulation nach IEC 61851 oder der Übertragung von XML-Daten nach IEC 15118 über PLC) möglich [12].

2.2.2 Identifikation, Geschäfts- und Abrechnungsmodelle

Zur Identifikation des Kunden an der Ladestation werden großteils Radio-Frequency-Identification-Chips (RFID-Chips, z. B. als Chipkarte, welche vor das Gerät gehalten wird um die Ladung zu starten oder direkt in den Stecker eingeklebt ist) verwendet. Beim Plug-and-Charge-System von RWE kann die Identifikation des Kunden zusätzlich zur RFID-Karte auch über PLC (via IEC 15118) erfolgen. Es ist auch eine Freischaltung der Ladesäule durch einen Anruf bei der Kundenhotline vorgesehen [12] [22].

Die eindeutige Identifikation des Kunden spielt vor allem bei öffentlichen Ladestationen eine zentrale Rolle. Beispielsweise werden die Ladestationen erst nach erfolgreicher Identifikation freigegeben und auch die Abrechnung der konsumierten Energiemenge erfordert eine personalisierte Zugangskontrolle.

Um den Aufwand für die Abrechnung gering zu halten, wird bei den öffentlichen Ladestationen der Salzburg AG und auch in der Modellregion VLOTTE in Vorarlberg keine kilowattstunden-genaue Abrechnung betrieben, sondern der Energieverbrauch pauschal abgerechnet und ist im Mobilitätspaket inkludiert. Die Abrechnung erfolgt somit pauschal über einen Leasing-Vertrag für das Fahrzeug. Dieser Vertrag beinhaltet neben der Bereitstellung des Fahrzeuges und der Energie auch noch weitere Services. So werden z. B. Fahrkarten für den öffentlichen Nahverkehr, Versicherungspakete (unter anderem auch für die Fahrzeugbatterie) und Mitgliedschaften bei Automobilclubs mit angeboten [11] [10].

Ein anderes Abrechnungsmodell wird bei der Ladestation der Wien-Energie angewandt. Hier wird nach erfolgter Identifikation mittels einer RFID-Karte, unabhängig vom tatsächlichen Ladestrom, nach der Ladezeit abgerechnet. Dies stellt einen Anreiz für die Kunden dar, die Belegungszeit der öffentlichen Ladesäulen möglichst gering zu halten. Eine Unterscheidung erfolgt nur zwischen ein- und dreiphasiger Ladung [22]. Diese gesonderten Abrechnungsmodelle werden besonders in den Anfangszeiten der Elektromobilität zum Einsatz kommen, da sich die Anbieter damit den Aufwand einer kWh-genauen Abrechnung ersparen können. Außerdem muss die Hardware für solch genaue Abrechnungsmechanismen erst entwickelt und ggf. zertifiziert werden.

2.2.3 Lastmanagement und Rückspeisungsmöglichkeiten

Die Anbindung von Ladestationen (und anderen starken Verbrauchern oder dezentralen Einspeisern, wie Photovoltaik-Anlagen o. Ä.) an das Stromnetz kann zu Problemen im Netz führen. Es kann zu Transformator- und Leitungsüberlastung kommen, das Spannungsniveau kann sich außerhalb des vorgegebenen Bereiches von $230\text{ V} \pm 10\%$ [IEC09] bewegen und es kann zu Schiefasten auf Grund starker einphasiger Einspeisung bzw. Belastung kommen. Folgende Mechanismen zur Steigerung der Netzqualität könnten in Ladestationen für Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen um solche Netzprobleme zu vermeiden:

- **Schalten der Lasten abhängig von der Netzfrequenz**

In Österreich beträgt die Netzfrequenz 50 Hz. Dieser Wert kann jedoch nicht genau eingehalten werden, da er von der Netzlast abhängig ist. Ist das Netz stark belastet, so sinkt die Netzfrequenz unter 50 Hz. Bei einem solchen Rückgang der Frequenz werden momentan (schnell einsetzbare) Kraftwerke aktiviert um der höheren Belastung entgegen zu wirken und die Netzfrequenz zu stabilisieren. Es ist jedoch denkbar, die Frequenz des Netzes lokal zu messen und die Last bei Rückgang der Frequenz temporär zu reduzieren bzw. ganz abzuschalten um das Netz zu entlasten.

- **Schalten der Lasten abhängig vom Spannungsniveau**

Entlang einer Versorgungsleitung kann es vorkommen, dass die Nennspannung von 230 V am Einspeisepunkt zwar gegeben ist, diese jedoch entlang der Leitung abweicht. Dieser Effekt wird verursacht durch den Spannungsabfall entlang verlustbehafteter Leitungen. Der Spannungsabfall ist proportional zum Strom, welcher bei hoher Netzbelastung ansteigt. Äquivalent zur Frequenzmessung ist es denkbar die Netzspannung als Kriterium für die Schaltung einer lokalen Last zu verwenden. Dazu müsste die Spannung lokal gemessen werden und abhängig von deren Wert die Last reduziert, abgeschaltet oder gegebenenfalls auch erhöht werden.

- **Schalten der Lasten mittels Rundsteuersignal**

Beim der Rundsteuertechnik wird dem Spannungssignal ein Datensignal mit geringer Bandbreite aufmoduliert. Mit Hilfe dieses unidirektionalen Datenkanals ist es möglich Broadcast-Messages über das Stromnetz auszusenden und damit Verbraucher an- oder abzuschalten. Auf Grund der geringen Bandbreite kann die Übertragungszeit einer solchen Nachricht Minuten dauern. Die Rundsteuertechnik wird momentan dazu eingesetzt, um spezielle Nacht-tarife oder Straßenbeleuchtung zu schalten.

- **Schalten der Lasten mittels TCP/IP-Verbindung**

Ist die Last (Ladestation) mit Hardware für eine Kommunikation via TCP/IP ausgestattet, so wäre es möglich diese extern zu schalten. Als Grundlage für eine solche Schaltung können sowohl statistische Kennwerte des Netzes, bzw. aktuell gemessene oder geplante Daten eingesetzt werden. Es könnten verschiedenste Aspekte für eine Reduktion bzw. Erhöhung der Leistung berücksichtigt werden. Ein Vorteil im Gegensatz zur Rundsteuertechnik ist, dass jede Last schneller und individuell angesteuert werden kann und die Kommunikation auch bidirektional erfolgen kann.

Die beschriebenen Technologien für das Schalten der Lasten sind in den untersuchten Ladestationen zwar teilweise vorgesehen, kommen jedoch bis dato nicht für aktives Lastmanagement zum Einsatz. Nicht nur die Reduktion der Lasten ist für die Stabilisierung der Netze interessant, auch die Rückspeisung von, im Fahrzeugakku gespeicherter Energie ist ein wichtiger Punkt für die Energieversorgungsnetze der Zukunft. Dabei könnten bei Energieüberschuss (z. B. bei starkem Wind oder starker Sonneneinstrahlung) die Akkus geladen werden um diese gespeicherte Energie zu Spitzenzeiten wieder aus den Akkus zu entnehmen. Doch auch für diese Anwendung in Smart Grids sind die untersuchten Ladestationen noch nicht ausgelegt. Berechnungen in [DKW11] haben außerdem ergeben, dass zum momentanen Zeitpunkt eine Einbindung der Elektrofahrzeuge in das Smart Grid nicht wirtschaftlich ist, da die entstehenden Kosten teilweise höher sind als der daraus gewonnene Nutzen. Aufgrund der zusätzlichen Ladezyklen würden die Batterien schneller altern und somit früher ersetzt werden müssen. Diese Tatsache könnte sich in den kommenden Jahren dann ändern, wenn die Anschaffungskosten der Batterien günstiger werden und die Preise für Regelernergie steigen [DKW11].

2.2.4 Ladestation-Management-Systeme

Zur Verwaltung aller Ladestationen eines Anbieters kommen proprietäre, auf die Anforderungen der Verwaltung der Ladestationen zugeschnittene, Systeme zum Einsatz. Solche Systeme ermöglichen die Fernablesung der Zählerstände und der aktuellen Statusinformationen der Stationen. Sie beinhalten Methoden zur Kundenverwaltung und zur Erkennung von Fehlfunktionen bzw. Problemen. Neben dem Asset Management (zur Verwaltung der Anlagen) bietet das System der Salzburg AG auch noch die Möglichkeit der Koordination und Verwaltung von Wartungsaufträgen sowie eine interne Benutzer-Verwaltung. Die Position der Ladestationen kann auf einer topografischen Karte angezeigt werden. Das System ist eine in sich geschlossene Software welche die eingegebenen Kommandos in Steuersignale umwandelt und an die Ladestationen bzw. an den Server kommuniziert [SA10]. Das Ladestations-Management-System des Forschungsprojektes BALLADE ist Web-basierend ausgeführt. Das heißt, es kann von jedem Gerät, welches in der Lage ist Webseiten darzustellen, bedient werden. Ansonsten bietet es die bereits erwähnte Funktionalität und ist dem System der Salzburg AG sehr ähnlich [5]. Beide Systeme kommunizieren über TCP/IP-Verbindungen mit den Servern und den zu verwaltenden Ladestationen.

2.3 Aufgabenstellung und Methodik

Aus der im Kapitel 1.3 angeführten Problemstellung und den momentan verfügbaren technischen Möglichkeiten werden im folgenden Abschnitt die notwendigen Schritte zur Realisierung einer Lastverteilung durch ein intelligentes Ladesystem ermittelt. Aus diesen Schritten folgt dann die spezielle Aufgabenstellung für die vorliegende Diplomarbeit. Im letzten Abschnitt wird auf die für die Erstellung der Arbeit verwendete Methodik eingegangen.

2.3.1 Notwendige Mittel für koordiniertes Laden

Bei der Durchführung einer Lastverteilung müssen unterschiedliche Stakeholder mit unterschiedlichen, teils gegensätzlichen Interessen berücksichtigt werden. Diese sind in Abbildung 2.7 schematisch dargestellt. Um eine faire Lastverteilung durchführen zu können, muss es möglich sein, die Interessen jedes Stakeholders zu kennen und zu beachten.

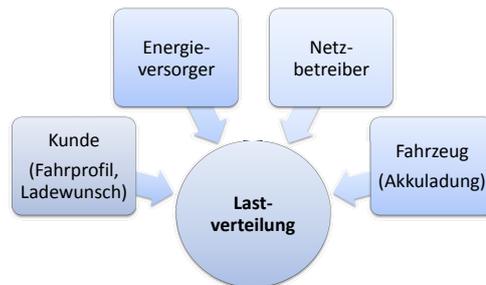


Abbildung 2.7: Die unterschiedlichen Stakeholder der Lastverteilung

Ein optimales Laden der Elektrofahrzeuge aus der Sicht des Kunden erfolgt dann, wenn dieser zum gewünschten Zeitpunkt in der Lage ist, die benötigte Fahrleistung mit seinem Elektrofahrzeug zurücklegen zu können. Das heißt, dass beim Antritt der Fahrt ausreichend elektrische Energie im Fahrzeugakku vorhanden sein muss, um die angestrebte Wegstrecke problemlos zurücklegen zu können. Aus Sicht des Netzbetreibers ist die Ladung jedoch dann optimal, wenn durch sie das Netz nicht zu stark belastet wird und somit keine oder nur geringe Ausbauarbeiten am Verteilnetz nötig sind. Für Energieversorger ist eine Fahrzeugladung dann ideal, wenn die benötigte Energiemenge möglichst gleichmäßig und zu Zeiten hoher Verfügbarkeit angefordert wird. Für das Fahrzeug selbst, bzw. den Fahrzeugakku existieren wiederum andere Präferenzen hinsichtlich einer idealen Lastverteilung. Zum Beispiel ist es für spezielle Akkutypen vorteilhaft für deren Lebensdauer, diese erst kurz vor Fahrtantritt vollgeladen zu haben um längere Standzeiten mit vollgeladenem Akku zu vermeiden.

Um diesen unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, ist es nötig, sowohl die konkreten Fahr- bzw. Ladewünsche der Kunden, als auch den Netzzustand zu kennen. Diese Informationen müssen von einer zentralen Instanz gesammelt, aufbereitet und weiterverarbeitet werden. Erst, wenn alle Informationen über das Netz (Spannungsniveaus, Leistungsspitzen, etc.) und die Ladewünsche vorhanden sind, kann koordiniertes Laden zielführend eingesetzt werden.

Zum Sammeln dieser Informationen und auch zur Ansteuerung der Ladestationen bedarf es einem übergeordneten Kommunikationssystem. Durch die Verbindung einer zentralen Steuereinheit

mit den Ladestationen und der Möglichkeit der (echtzeitfähigen) Sammlung von Last- und Netzinformationen ist es möglich, koordiniertes Laden durchzuführen um Lastspitzen und kritische Spannungsrückgänge zu vermeiden.

Konkret bedarf es einem Interface mit dessen Hilfe der Kunde seinen Ladewunsch bzw. seine Anforderungen an das Fahrzeug und die Fahrzeugladung eingeben kann. Diese Information muss an eine Einheit gesandt werden, welche die gesamte Koordination, Berechnungen, usw. durchführt. Diese Einheit kann zentral oder dezentral ausgeführt werden. Ihre Hauptaufgabe ist die Sammlung, Aufbereitung und Verteilung von Informationen.

Für die Übertragung der Kundenanforderungen ist ein Kommunikationssystem nötig, welches eine hohe Verfügbarkeit aufweist und einfach zugänglich ist. Um die Steuersignale der zentralen Einheit für die koordinierte Ladung verarbeiten zu können, bedarf es einer Ladestation mit einem gewissen Maß an „Intelligenz“. Sie muss in der Lage sein, Steuerinformationen von der zentralen Einheit entgegennehmen und weiterverarbeiten zu können. Des Weiteren soll sie Statusinformationen an die zentrale Instanz melden können.

2.3.2 Aufgabenstellung: Realisierung eines Systems zur koordinierten Ladung von Elektrofahrzeugen

Die Aufgabenstellung für die vorliegende Diplomarbeit ist ein Benutzer-Interface zu erstellen, mit dessen Hilfe die Ladewünsche der Kunden aufgenommen werden können. Zusätzlich ist eine zentrale Einheit (Aggregator) prototypisch zu entwickeln, welcher mit Hilfe spezieller Algorithmen eine Lastverteilung vornehmen kann.

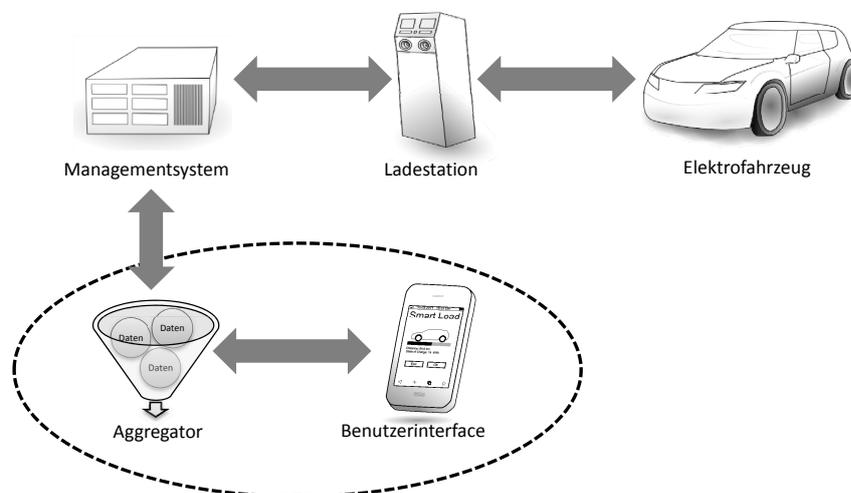


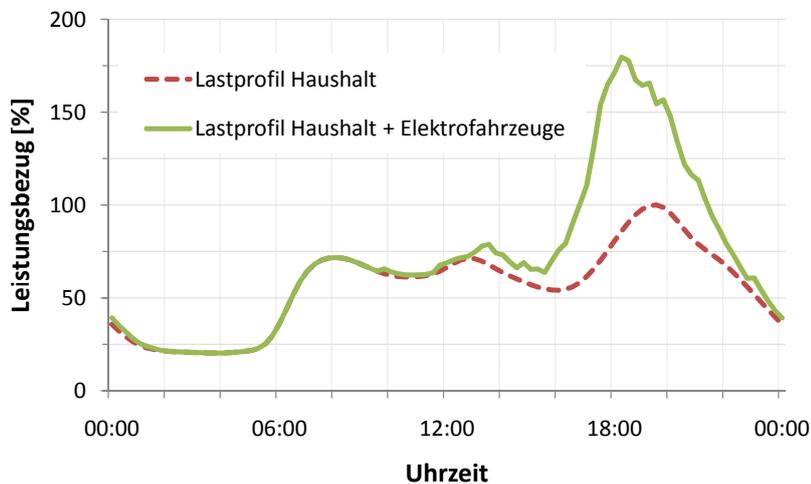
Abbildung 2.8: Aufbau und Zusammenhänge im Ladesystem

Das gesamte System für die koordinierte Ladung von Elektrofahrzeugen ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Ladestationen und Elektrofahrzeuge sind nicht Teil der Diplomarbeit und werden dafür als vorhanden angenommen. Die zu implementierenden Teile, also das Interface und der Aggregator sind in Abbildung 2.8 umrandet dargestellt.

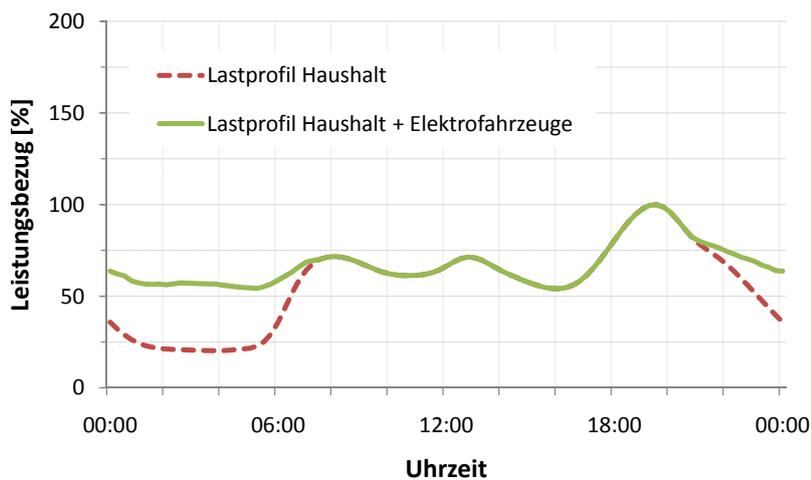
Zur Erfüllung dieser Aufgaben sollen im ersten Schritt vorhandene Ladestationen untersucht und deren Tauglichkeit für gesteuertes Laden analysiert werden. Es sollen verschiedene mögliche Positionierungen und technische Ausführungsmöglichkeiten des Interfaces untersucht werden und

daraus ein Modell ausgewählt und dieses realisiert werden. Das Interface soll über veränderbare Profile verfügen, mit welchen die Ladung des Elektrofahrzeuges beeinflusst werden kann. Mit den Profilen soll es dem Benutzer möglich sein, spezielle Informationen (z. B. Reichweite und der Zeitpunkt zu dem die Ladung abgeschlossen sein muss) abzuspeichern. Zusätzlich sollen Statusinformationen ausgegeben werden.

Der Aggregator muss so ausgeführt werden, dass er als selbstständige, unabhängige Instanz fungieren kann. Er muss über definierte Schnittstellen in der Lage sein, sowohl mit dem Kundeninterface, als auch mit den Ladestationen kommunizieren zu können. Es muss möglich sein, dem Aggregator von außen Netzinformationen zukommen lassen zu können, auf deren Basis durch geeignete Algorithmen eine Lastanpassung und -verteilung vorgenommen werden kann. Die zentrale Aufgabe des Aggregators ist es, durch die Planung und Beeinflussung der Fahrzeugladung das elektrische Verteilnetz zu entlasten und somit Leistungsspitzen und Spannungseinbrüche zu vermeiden. Es soll, wie in Abbildung 2.9 dargestellt ist, die Last der Fahrzeugladungen von der Spitzenlastzeit 2.9(a) auf Zeiten geringerer Netzbelastung 2.9(b) verschoben werden.



(a) Lastkurve bei unkoordinierter Ladung



(b) Lastkurve bei koordinierter Ladung

Abbildung 2.9: Vergleich der Lastkurven: unkoordinierte (a) und optimal koordinierte (b) Ladung [Nau11]

2.3.3 Methodik

Die Vorgehensweise für die Erarbeitung der Diplomarbeit gliedert sich in vier Teile. Im ersten Abschnitt erfolgt die Einarbeitung in das momentan sehr aktuelle Thema Elektromobilität durch umfassende Literaturrecherche, Besuche von Förder- und Diskussionsveranstaltungen von Unternehmen und öffentlichen Institutionen. Darauf aufbauend wird im zweiten Abschnitt der Stand der Technik untersucht. Dabei werden bereits vorhandene Ladesysteme analysiert und die, zur Realisierung des gesteuerten Ladens, benötigten Technologien genauer beleuchtet. Im dritten, praktischen Teil der Arbeit wird ein Prototyp eines Ladesystems entwickelt, welcher die Möglichkeiten der koordinierten Ladung am praktischen Beispiel darstellen soll. Zu diesem Prototypen gehört sowohl ein funktionales Interface zur Eingabe des Ladewunsches durch den Benutzer, sowie die zentrale Einheit (der Aggregator) welche die Ladung an den einzelnen Stationen so steuert, dass diese auf das Netz abgestimmt ist. Aus den Erkenntnissen der Implementierung folgt der vierte und somit letzte Abschnitt der Arbeit, die Zusammenfassung und das Resümee. Dieser Abschnitt geht auf die gewonnenen Eindrücke ein, fasst die wichtigsten Teile der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf eine weitere mögliche Vorgehensweise.

3 Realisierungsmöglichkeiten eines koordinierten Ladesystems für Elektrofahrzeuge

Es gibt viele mögliche Ausführungsvarianten eines koordinierten Ladesystems für die Ladung von Elektrofahrzeugen, wovon sich jedoch bei genauerer Betrachtung nur wenige als sinnvoll hinsichtlich des Aufwandes und der Kosten ihrer Implementierung herausstellen. Manche Varianten stellen sich bei detaillierter Betrachtung als nicht zielführend heraus (vgl. Abschnitt 3.4 und 3.5.2).

Im vorliegenden Kapitel werden zuerst die Komponenten eines koordinierten Ladesystems für Elektrofahrzeuge und daraufhin die Anforderungen an diese aufgezeigt. Im Anschluss wird daraus der Aufbau des Systems abgeleitet und sämtliche Varianten davon, welche sich durch die unterschiedlichen Positionierungsmöglichkeiten des Interfaces und der unterschiedlichen Kommunikationswege ergeben, beschrieben und bewertet.

3.1 Komponenten eines koordinierten Ladesystems

Um die Anforderungen an ein Ladesystem definieren zu können, muss zuerst festgestellt werden, welche Einheiten in solch einem System miteinander interagieren und wie deren Interessen aussehen.

Die Einheiten aus denen das Ladesystem besteht sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Ihre möglichen Interessen im Kontext des österreichischen Strommarktes werden wie folgt angenommen:

- **Anwender**

Der Anwender will auf möglichst einfache Art und Weise die Ladung seines Elektrofahrzeuges steuern und den Status der Ladung auslesen können. Er möchte Informationen über die Dauer der Ladung, den Ladestand der Batterien und die Reichweite des Fahrzeuges sowie Statistiken und Preisinformationen abfragen können. Zusätzlich möchte er die Ladung hinsichtlich unterschiedlicher Präferenzen (Kosten, Dauer, Umweltbeeinflussung, usw.) beeinflussen können.

- **Elektrofahrzeug**

Die Interessen des Elektrofahrzeuges sind vom Hersteller, bzw. von der Art der im Fahrzeug

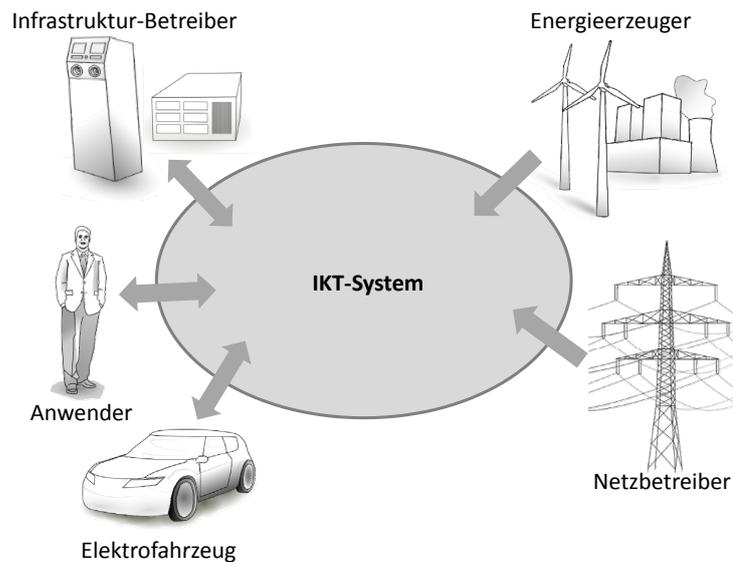


Abbildung 3.1: Komponenten im Ladesystem

eingesetzten Technologien abhängig. Sie beschränken sich auf die Dauer, den Zeitpunkt und die Art (Spannung, Stromstärke, Anzahl der Phasen) der benötigten elektrischen Energie. Für manche Akkutypen ist es beispielsweise vorteilhaft, dass diese erst kurze Zeit vor Fahrtantritt vollgeladen werden.

- **Ladeinfrastruktur-Betreiber**

Für den Betreiber der Ladeinfrastruktur ist die Interoperabilität und Wartbarkeit des Systems von großer Bedeutung. Hierfür ist der Einsatz von gemeinsamen Standards und Normen entscheidend. Wichtig ist auch die Bereitstellung von definierten Schnittstellen für die Anbindung externer Einheiten und Informationsquellen an das System.

- **Energieerzeuger**

Das Hauptinteresse der Energieerzeuger besteht darin, Lastspitzen durch die zeitliche Verschiebung der Fahrzeugladung von Hoch- zu Niederlastzeiten zu vermeiden. Durch diese Verschiebung kann die Notwendigkeit der Erzeugung von teurer Spitzenlast reduziert werden. Die Energie wird stattdessen zur Niederlastzeit von Grundlastkraftwerken, welche geringere Stromgestehungskosten verursachen, zur Verfügung gestellt. Weiteres Interesse der Energieerzeuger betrifft die Möglichkeit auf die variablen Energieeinspeisungen durch dezentrale alternative Energieerzeugungsanlagen wie Wind- und Sonnenenergieanlagen reagieren und diese somit effizienter nutzen zu können.

- **Netzbetreiber**

Die Interessen der Netzbetreiber bestehen hauptsächlich in der optimalen Nutzung der Energienetze um kostenaufwändige Ausbaurbeiten vermeiden zu können und die Netzqualität hoch zu halten. Dies bedeutet vor allem, dass die Netzspannung innerhalb bestimmter Toleranzbereiche gehalten werden kann und Überlastungen vermieden werden können. Diese Gütekriterien können durch eine reaktive Steuerung und eine damit verbundene Verschiebung und Anpassung der Fahrzeugladungen positiv beeinflusst werden.

Diese Interessen der fünf verschiedenen Stakeholder gilt es beim Aufbau eines Ladesystems zu

berücksichtigen. Außerdem ergeben sich aus ihnen die in weiterer Folge (Kap. 3.2) beschriebenen Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten.

3.2 Anforderungen an das Ladesystem

Ausgehend von den zuvor definierten Interessen der einzelnen Einheiten des Ladesystems und dessen Struktur werden nun die Anforderungen an diese Einheiten beschrieben. Für eine reibungslose Interaktion der Komponenten untereinander und mit externen Entitäten müssen bestimmte, im Folgenden beschriebene Vorgaben eingehalten werden.

3.2.1 Anforderungen an das Interface

Die Möglichkeiten einer Implementierung des Benutzerinterfaces sind weit gestreut und werden in Kapitel 3.4 genau beschrieben und bewertet. Die Implementierung des Interfaces – auf welche Art auch immer – ist jedoch extrem wichtig für das Gesamtsystem, da nur damit die Fahr- bzw. Ladewünsche des Kunden berücksichtigt werden können. Ohne diese Möglichkeit wäre die Flexibilität des Systems stark beeinträchtigt und würde bei den Anwendern wohl auch auf wenig Akzeptanz stoßen.

Zur Bestimmung der Anforderungen wurde im Zuge des Projekts „Neue Energien 2020 – V2G Interfaces“ ein Kreativworkshop abgehalten. Dieser Workshop hat ergeben, dass es für Benutzer des Systems nicht ideal ist, die Anzahl der zu ladenden kWh eingeben zu müssen, da viele Benutzer mit diesem Energiewert wenig anfangen können. Viel einfacher ist es hingegen den Prozentsatz der Gesamtladung oder, noch besser, die gewünschte Reichweite in Kilometern vorzugeben.

Der Benutzer soll die Möglichkeit haben, entweder eine Sofortladung zu starten oder den Zeitraum (bzw. eine Frist) anzugeben in dem der Fahrzeugakku bis zu einem bestimmten Wert geladen werden soll. Diese Ladewünsche sollen von unterschiedlichen Kriterien (z. B. den maximalen Kosten) abhängig gemacht werden können. Um die Ladewunscheingabe für den Benutzer möglichst einfach zu gestalten, sollen Ladeprofile verwendet werden, welche vorab definiert werden können. Es sollen Standardprofile vordefiniert sein und die Möglichkeit einer weiteren Profileingabe bzw. -bearbeitung bestehen. Beispiele für solche Standardprofile sind ein „Sofort“-Profil zur Sofortladung oder ein „Günstig“-Profil bei welchem der Fahrzeugakku in den Nachtstunden bis zum nächsten Morgen kostengünstig vollgeladen wird.

Zur Information des Kunden über den Status der Ladung sind im Interface bestimmte Funktionen vorzusehen. Auch soll der Kunde Informationen über die verbrauchte Energiemenge der vergangenen Ladungen in Form von Statistiken am Interface abrufen können.

Um den Anwender eindeutig identifizieren zu können, muss ein Authentifizierungsmechanismus vorgesehen werden. Auch ist darauf zu achten, dass die Übertragung der Daten vom Interface zum Managementsystem über gesicherte Verbindungen erfolgt um fehlerbedingte oder böswillige Änderungen dieser Daten zu vermeiden.

3.2.2 Anforderungen an das Managementsystem (Aggregator)

Im Managementsystem laufen die verschiedenen Daten des Systems zusammen. Mit Hilfe geeigneter Algorithmen wird von einem dafür vorgesehenen Modul des Managementsystems (im Weiteren als „Aggregator“ bezeichnet) anhand dieser Daten der optimale Ladevorgang berechnet und an die Ladestationen kommuniziert.

Der Aggregator ist primär für drei Aufgabengebiete verantwortlich:

1. Verarbeitung von Ladewünschen
(proaktives Vorgehen zur Steigerung der Netzqualität)
2. Reaktion auf Änderungen von Netzzuständen
(reaktives Vorgehen zur Steigerung der Netzqualität)
3. Kommunikation mit Netzbetreibern, Energieversorgern und Ladestationen

Die Verarbeitung der Ladewünsche wird als proaktives Vorgehen bezeichnet, da die damit verbundene Planung und Einteilung der Ladungen eine initiative und vorbeugende Handlung gegen negative Auswirkungen auf die Netzqualität ist. Im Gegensatz dazu steht das reaktive Handeln des Aggregators bei dem erst im konkreten Fall einer Unter- oder Überspannung im Netz reagiert wird um dieser entgegen zu wirken.

Für die Erfüllung dieser ersten beiden Aufgabenstellungen muss der Aggregator über bestimmte Algorithmen verfügen. Weiters benötigt er sowohl stochastische, als auch aktuelle Netzinformationen (z. B. die üblichen Lastprofile der einzelnen Netzabschnitte, deren aktuelle Spannungsniveaus bzw. die aktuelle Netzfrequenz). Der Algorithmus zur Verarbeitung der Ladewünsche muss so ausgelegt sein, dass dieser sowohl die Mobilitätsanforderungen des Kunden, als auch die Ansprüche von Energieversorgern und Netzbetreibern zur Steigerung der Netzqualität berücksichtigt. Zusätzliche Ansprüche an die Ladungsplanung können preisliche Vorgaben des Kunden sein oder Präferenzen bezüglich einer möglichst schonenden Akkuladung zur Steigerung der Batterielebensdauer.

Die Reaktion auf Änderungen von Netzzuständen muss so erfolgen, dass die Qualität der Ladung an sich nicht wesentlich beeinträchtigt und die Qualität der Netzparameter gesteigert wird. Methoden hierzu können z. B. die Reduktion der Ladeleistung, die Rückspeisung von Energie aus dem Fahrzeugakku bei zu hoher Netzlast oder die Erhöhung der Ladeleistung bei starker dezentraler Einspeisung sein.

Eine weitere Anforderung an den Aggregator ist die Verfügbarkeit von Schnittstellen für die Kommunikation nach außen hin. Diese sind nötig damit der Aggregator als unabhängige Instanz betrieben werden kann. Der Betrieb kann dabei entweder durch eine eigenständige Institution durchgeführt werden oder aber auch vom V2G-Infrastrukturbetreiber übernommen werden.

Da der Aggregator die zentrale, kontrollierende und steuernde Einheit darstellt, ist eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit unerlässlich. Es ist sicherzustellen, dass das Managementsystem zu möglichst jedem Zeitpunkt erreichbar und funktionsfähig ist.

3.2.3 Anforderungen an die Ladestationen

Die primäre Funktion der Ladestation ist die Ladung des Fahrzeugakkus. Für den Einsatz einer Ladestation im Ladesystem für koordinierte Ladung sind jedoch weitere Anforderungen zu erfüllen. Die Ladestation muss in der Lage sein, Befehle hinsichtlich der Fahrzeugladung vom Managementsystem empfangen und verarbeiten zu können. Für den Empfang solcher Befehle muss die Ladestation über eine Kommunikationsschnittstelle (z. B. Ethernet, GPRS, etc.) verfügen. Weiters muss die Ladestation in der Lage sein die Ladeleistung zu variieren bzw. die Ladung für einen gewissen Zeitraum zu unterbrechen.

Bei einem Großteil der mit Wechselspannung beladenen Fahrzeuge befindet sich die Ladeelektronik im Fahrzeug selbst. Da durch diese die bezogene Stromstärke eingestellt und Informationen über den Batterie- und Ladestatus zur Verfügung gestellt werden, ist eine Kommunikationsverbindung auch zwischen dem Fahrzeug (respektive dem Batteriemanagementsystem im Fahrzeug) und der Ladestation nötig. Diese kann z. B. auf dem in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Standard IEC 15118 basieren. Über eine solche Kommunikationsverbindung können Informationen wie der State of Charge (SoC) oder Depth of Discharge (DoD) aus dem Fahrzeug ausgelesen und die Ladeleistung eingestellt werden. Diese Informationen müssen von der Ladestation an den Aggregator weitergegeben werden, um den Anwender über den Status der Ladung informieren und die Ladung möglichst optimal planen zu können.

Für die Erfassung der konsumierten Energiemenge ist ein Zählsystem in der Ladestation vorzusehen. Dieses muss aus der Ferne durch das Managementsystem auslesbar sein. Kommt die Fahrzeugbatterie als Energiezwischenspeicher in einem Smart Grid zum Einsatz muss die Elektronik der Ladestation in der Lage sein, auch Energie ins Netz zurück speisen zu können. Auch dieser Vorgang muss von außen durch den Aggregator steuerbar sein und die Energiemenge muss (ggf. durch eine separate Zählvorrichtung) gemessen werden können.

Nicht zwingend nötig, jedoch sehr vorteilhaft wäre die Option, Netzinformationen wie Spannung und Frequenz aus der Ladestation auslesen und an das Managementsystem senden zu können. Diese Informationen können direkt für die Koordination der Ladungen verwendet werden und müssen nicht durch extra dafür vorzusehende Messeinheiten erhoben und kommuniziert werden. Auf diese Weise wird es möglich Netzdienstleistungen wie Frequenz- oder Spannungshaltung durch die Ladestation anzubieten.

3.2.4 Anforderungen an Energieerzeuger und Netzbetreiber

Um die Interessen der Energieerzeuger und Netzbetreiber berücksichtigen zu können ist es wichtig Informationen von diesen zu erhalten. Dies geschieht mittels vorher definierter Schnittstellen, über welche die Statusinformationen betreffend dem Netzstatus und der Energiebereitstellung an das Managementsystem und somit an den Aggregator übertragen werden. Für eine effiziente Lastverschiebung und Optimierung des Ladeprozesses ist es nötig, dass die an das System übertragenen Informationen aktuell und fehlerfrei sind. Die Energieerzeuger und Netzbetreiber müssen also in der Lage sein die relevanten Daten auslesen und über die zuvor definierten Schnittstellen innerhalb eines angemessenen Zeitraumes übertragen zu können.

3.3 Aufbau des Ladesystems

Das in Abbildung 3.2 dargestellte Ladesystem ist modular aufgebaut und besteht aus den im Folgenden definierten Einheiten. Hierbei werden lediglich der Informationsfluss und die Art der Interaktion beschrieben, nicht jedoch der Energiefluss an sich.

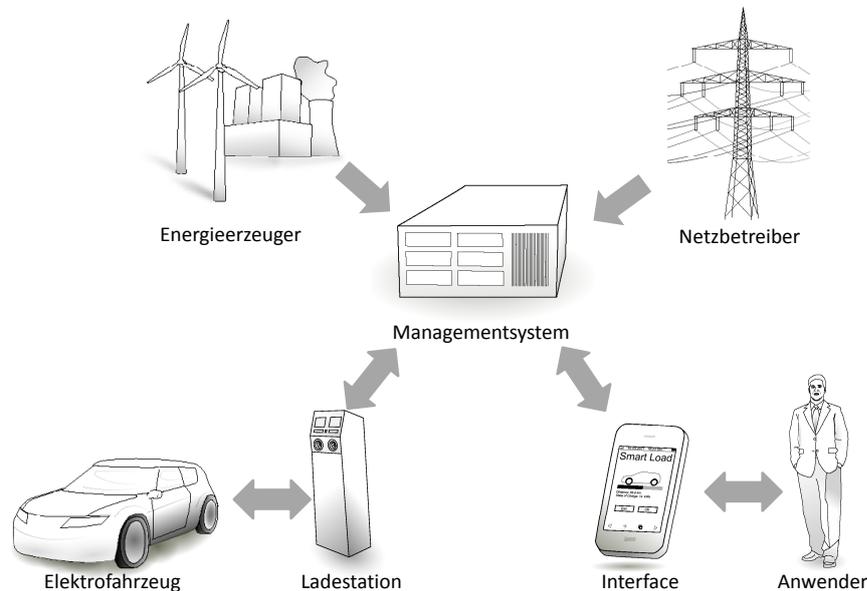


Abbildung 3.2: Aufbau des Ladesystems

- Anwender**
 Der Anwender betreibt das Elektrofahrzeug und muss es zu diesem Zweck mit elektrischer Energie beladen. Er interagiert außerdem mit Hilfe des Benutzerinterfaces mit dem Managementsystem um seine Fahr- bzw. Ladewünsche einzugeben und Informationen auszulesen.
- Interface**
 Das Interface bildet die Schnittstelle zwischen dem Managementsystem und dem Benutzer. Es kann in vielfältiger Art und Weise ausgeführt werden und soll für den Benutzer einfach und schnell bedienbar sein. Auch für die Positionierung des Interfaces gibt es unterschiedliche Möglichkeiten (vgl. Abschnitt 3.4).
- Elektrofahrzeug**
 Das Elektrofahrzeug wird mit der Ladestation verbunden um dessen Batterien mit elektrischer Energie zu befüllen. Für die Ladung benötigte Parameter werden zwischen dem Elektrofahrzeug bzw. dessen Batteriemanagementsystem und der Ladestation ausgetauscht.
- Ladestation**
 Die Ladestation bildet die Schnittstelle zwischen dem Managementsystem und dem Elektrofahrzeug. Aus informationstechnischer Sicht dient sie als Gateway zwischen diesen beiden Einheiten und sendet bzw. empfängt Informationen sowohl vom Managementsystem als auch vom Elektrofahrzeug.
- Managementsystem**
 Das Managementsystem kann aus mehreren, auch getrennt voneinander betriebenen Einheiten bestehen und für die Bearbeitung unterschiedlichster Aufgaben verantwortlich sein.

Es übernimmt die gesamte Koordination, Verwaltung und Verarbeitung aller eintreffenden Daten. Dies betrifft sowohl die Benutzer- als auch die Anlagenverwaltung, die Speicherung und Weiterverarbeitung der Ladewünsche, sowie die direkte Ansteuerung der Ladestationen. Auch die Reaktion auf (kritische) Änderungen der Werte von Energieerzeugern und Netzbetreibern zählt zu seinen Aufgaben.

- **Energieerzeuger**

Der Energieerzeuger stellt die, für die Ladung der Fahrzeugbatterien benötigte, elektrische Energie zur Verfügung. Diese Energie wird von Kraftwerken unterschiedlicher Typen mit verschiedenen Charakteristiken (Stromgestehungskosten, Anlaufzeit, Umweltverträglichkeit, uvm.) erzeugt. Ein zunehmender Anteil der Energie wird bereits aus alternativen Energiequellen (Photovoltaik, Windenergie, usw.) bezogen.

- **Netzbetreiber**

Der Netzbetreiber ist für die Verteilung der elektrischen Energie zuständig. Er betreibt zu diesem Zweck Hochspannungs-, Niederspannungs- und Verteilnetze und ist für die Einhaltung bestimmter Gütekriterien (Netzspannung und -frequenz) innerhalb dieser Netze verantwortlich.

3.4 Positionierung und Varianten des Interfaces

Das Interface, das die Schnittstelle für den Kunden zum Managementsystem darstellt, kann unterschiedlich positioniert werden. Die möglichen Positionen des Interfaces sind in Abbildung 3.3 dargestellt und mit I_1 bis I_3 bezeichnet. Ein Interface kann sich entweder direkt im Fahrzeug (I_1), auf der Ladestation (I_2) oder auf einem mobilen Gerät (I_3) befinden. Diese Positionierungen schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern es ist auch der parallele Einsatz von zwei oder auch aller drei Interfacepositionen möglich. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Positionierungen werden im vorliegenden Kapitel beschrieben.

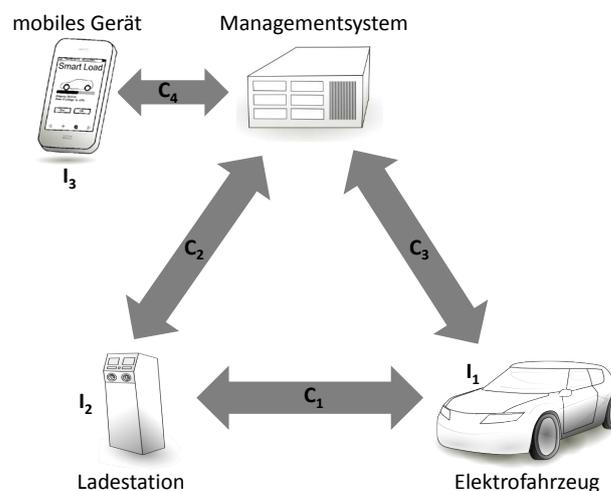


Abbildung 3.3: Interfacepositionen ($I_1 - I_3$) und Kommunikationswege ($C_1 - C_4$) [KBG⁺11]

Interface im Fahrzeug

In Abbildung 3.3 mit I_1 bezeichnet ist das Fahrzeug, bzw. das Interface, welches sich im Fahrzeug befindet.

Der Vorteil dieser Interface-Variante ist, dass das Interface in das ggf. bereits vorhandene Fahrzeug-Entertainment-System integriert werden kann und es somit sowohl technisch, als auch optisch gut in den bereits vorhandenen Bedienelementen und der Elektronik des Fahrzeugs integriert wäre. Das Interface kann auch direkt in ein bereits vorhandenes Navigationssystem integriert werden und hätte dadurch auch die Möglichkeit die (GPS-)Daten bzw. die Funktionen des Navigationssystems zu nutzen.

Ein entscheidendes Problem stellt hierbei jedoch die Tatsache dar, dass es eine große Anzahl an Fahrzeugherstellern gibt und diese mehrheitlich nicht bereit sein werden, Systeme von Drittherstellern in ihr Fahrzeugkonzept aufzunehmen bzw. die technischen Informationen, welche für eine nahtlose Integration nötig wären, preiszugeben. Es besteht somit momentan nur die Option das Interface im Fahrzeug (ähnlich einem externen Navigationsgerät oder einem Autoradio) nachzurüsten, was die meisten Vorteile des fahrzeuginternen Interfaces wieder zunichte macht.

Auch die Kommunikationsanbindung eines solchen Interfaces birgt gewisse Hürden in sich. Zur Übertragung der eingegebenen Ladewünsche ist eine Datenverbindung zum Managementsystem bzw. zur Ladestation nötig. Dies kann über das GSM/GPRS-Netz erfolgen, wobei jedoch teilweise mit Empfangsproblemen und hohen Roaming-Gebühren im Ausland und in Grenznähe zu rechnen sein wird.

Über das Interface im Fahrzeug wäre ausschließlich die Ladungssteuerung des betreffenden Fahrzeuges unabhängig von der dazu verwendeten Ladestation möglich. Außerdem kann diese Interface-Variante nur von einem im Fahrzeug sitzenden Benutzer bedient werden.

Interface an der Ladestation

Das Interface an der Ladestation, welches in Abbildung 3.3 mit I_2 bezeichnet ist, kann in seiner Funktionalität stark variieren. Die einfachste, bereits von manchen Herstellern eingesetzte Variante beinhaltet nur einige wenige Bedienelemente und LEDs zur Anzeige des Status.

Mit einem solchen Interface ist es jedoch nicht möglich, einen komplexeren Ladewunsch zu deponieren oder detaillierte Lade- und Verbrauchsinformationen anzuzeigen. Solche, für ein Ladesystem benötigte erweiterte Funktionen sind nur mit einem umfangreichen Interface mit Display und umfassenden Eingabemöglichkeiten realisierbar.

Der Vorteil eines Interfaces an der Ladestation ist, dass die Ladungssteuerung von der Ladestation selbst vorgenommen wird und damit jedes beliebige Elektrofahrzeug, welches bestimmte einfache Grundanforderungen hinsichtlich der Steckverbindung und des Ladesystems erfüllt, geladen werden kann. Die dazu nötigen Ansprüche an die Elektrofahrzeuge sind eher gering und es sind keine aufwändigen Nachrüstungsarbeiten nötig.

Interface auf mobilen Geräten

Das Interface auf mobilen Geräten, wie Smart-Phones oder Tablet-PCs ist in Abbildung 3.3 mit I_3 bezeichnet. Es verbindet die Vorzüge des Interfaces im Fahrzeug und die des an der Ladestation

befindlichen Interfaces und kann mobil eingesetzt werden. Besser noch als beim Fahrzeug-Interface kann es überall hin mitgenommen werden. Des Weiteren kann mit diesem Interface sowohl die Ladesteuerung über eine dazu fähige Ladestation oder aber auch über ein dafür ausgestattetes Fahrzeug durchgeführt werden.

Nachteilig zeichnen sich jedoch abermals die Verbindungsmöglichkeiten ab, welche auf dieselben Probleme mit Empfangslöchern bei GSM/GPRS-Übertragung und Roamingkosten stoßen können wie beim fahrzeuginternen Interface. Außerdem ist die Anschaffung und Konfiguration eines weiteren Gerätes notwendig, falls der Kunde nicht bereits über ein entsprechendes Mobilgerät verfügt. Auch sind die Anzeigeeigenschaften mancher Mobilgeräte sehr gering dimensioniert, sodass z. B. die Anzeige umfangreicher Statistiken und Tabellen problematisch werden kann.

Web-Interface

Ein Web-Interface begegnet den Problemen der geringen Anzeigefläche des mobilen Interfaces, da die meisten PC-Monitore eine ausreichend hohe Auflösung bieten und somit genügend Platz für umfangreiche Statistiken und Tabellen zur Verfügung stellen. Die Grenze zwischen dem Interface für mobile Geräte und dem Web-Interface verschwimmt, da auf HTML-fähigen Mobilgeräten auch Webseiten in ausreichend hoher Qualität dargestellt werden können.

Der Vorteil des Einsatzes von Web-Interfaces besteht in der Möglichkeit diese mit dem eventuell bereits bestehenden Web-Portal des Energieversorgers oder des Netzbetreibers zu verbinden und somit dem Kunden ein Gesamtsystem anbieten zu können. Der Einsatz eines solchen Interfaces setzt jedoch abermals das Vorhandensein bzw. die Anschaffung von zusätzlicher Hardware (einem PC) und einer Internetverbindung voraus.

3.5 Kommunikation

Das in Abbildung 3.1 als „IKT-System“ bezeichnete Informations- und Kommunikationssystem bildet die Basis für eine effiziente und zielführende Koordination der Fahrzeugladung. Mit Hilfe des IKT-Systems ist es möglich die relevanten Informationen betreffend der Ladewünsche, Ladefehle, Netzzustände und vielem mehr zwischen den Einheiten des Ladesystems zu verteilen. Dafür können unterschiedliche Kommunikationsmittel und -wege zum Einsatz kommen, welche in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben werden.

3.5.1 Kommunikationsmittel

Bei der Wahl der Kommunikationsmittel muss grundsätzlich zwischen kabelloser und kabelgebundener Kommunikation unterschieden werden. Für Informationsübertragung zum bewegten Fahrzeug ist ausschließlich der Einsatz von drahtloser Kommunikation möglich. Erfolgt die Kommunikation ausschließlich dann, wenn das Fahrzeug steht und z. B. mit der Ladestation verbunden ist, so kann die Datenübertragung auch kabelgebunden erfolgen.

Tabelle 3.1 zeigt eine Gegenüberstellung kabelgebundener Kommunikationsmöglichkeiten. In Tabelle 3.2 erfolgt eine Auflistung und ein Vergleich kabelloser Datenübertragungstechnologien.

Grundsätzlich ist eine kabelgebundene Kommunikation der kabellosen dann vorzuziehen, wenn der Aufwand für die Inbetriebnahme dem für die Inbetriebnahme kabelloser Übertragung nicht

Tabelle 3.1: kabelgebundene Kommunikationstechnologien [HS05] [Kel11] [FLNS10]

| Technologie | Bandbreite | Distanz | Anmerkung |
|-------------------------|-----------------|----------|--------------------------------|
| RS232 | 115,2 kBit/s | 2 - 30 m | Punkt zu Punkt |
| RS485 | 100 kBit/s | 1200 m | differenzielle Übertragung |
| USB 2.0 | 480 MBit/s | 5 m | auf PC-Peripherie beschränkt |
| Analogmodem (V.90) | 56 kBit/s | - | Telefonnetz, analog |
| ISDN | 2 x 64 kBit/s | - | Telefonnetz, digital |
| (A)DSL | 8 MBit/s | 5500 m | Telefonnetz, digital |
| Rundsteuertechnik | ≤ 2 kBit/s | - | Stromnetz, unidirektional |
| Powerline-Kommunikation | 200 MBit/s | 300 m | im Stromnetz integrierbar |
| Ethernet (1000Base-T) | 1 GBit/s | 100 m | weit verbreitet |
| Fiber-Optics | > 1 GBit/s | 5000 m | EMV-unempfindlich, breitbandig |

wesentlich übersteigt bzw. die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der kabellosen Verbindung nicht ausreichend ist. Beim Einsatz von drahtloser Kommunikation ist besonders auf die Verschlüsselung der Daten zu achten um diese vor unbeabsichtigter oder böswilliger Veränderung zu schützen.

Tabelle 3.2: kabellose Kommunikationstechnologien [LAS07] [EM07] [GJ10]

| Technologie | Bandbreite | Distanz | Anmerkung |
|-------------|--------------|------------|------------------------------------------------|
| ZigBee | 250 kBit/s | 10 - 100 m | energieeffizient, unterschiedliche Topologien |
| Bluetooth | 2,1 MBit/s | 10 - 100 m | Frequency Hopping (störungsunempfindlich) |
| WLAN 802.11 | 600 MBit/s | 20 - 300 m | weit verbreitet, günstig, gute Verschlüsselung |
| GSM (2G) | 55 kBit/s | 35 km | geringe Übertragungsrate, weit verbreitet |
| GPRS | 171,2 kBit/s | 35 km | basierend auf GSM |
| UMTS (3G) | 384 kBit/s | 10 km | höhere Datenrate, geringere Reichweite |
| HSDPA | 13,98 MBit/s | 10 km | sehr hohe Datenrate, geringere Reichweite |
| LTE (4G) | 300 MBit/s | 2 km | in der Einführungsphase |

Es ist durchaus denkbar mehrere der in den Tabellen 3.1 und 3.2 aufgelisteten Kommunikationsmittel im Ladesystem (parallel) einzusetzen bzw. Schnittstellen für deren Einsatz vorzusehen. Denn je nach Einsatzgebiet und aufgrund variabler Randbedingungen sind unterschiedliche Kommunikationstechnologien vorzuziehen. So kann es z. B. günstig sein eine Ladestation an eine bereits vorhandene ADSL-Verbindung anzubinden. Bei einem Betrieb der Ladestation in einer Garage ohne bereits vorhandene Kommunikationsanbindung ist ggf. der Einsatz einer GPRS-Verbindung vorteilhafter. Diese Verbindungsart ist hingegen in Tiefgaragen bei schlechtem GPRS-Empfang nicht ideal.

Auch die direkten und indirekten (laufenden) Kosten der Kommunikationsverbindung müssen berücksichtigt werden. Die direkten Kosten entstehen durch die Anschaffung der Hardware, die Inbetriebnahme- und die Installationskosten. Die indirekten Kosten ergeben sich durch Gebühren für die Nutzung öffentlicher Kommunikationswege, wie das Internet bzw. das Mobilfunknetz und Lizenzgebühren.

3.5.2 Kommunikationswege

In Abbildung 3.3 sind neben den Einheiten des Ladesystems, auf welchen ein Interface zum Einsatz kommen kann, auch die möglichen Kommunikationswege dargestellt. Diese sind mit C_1 bis C_4 bezeichnet. Aus ihnen ergeben sich unter der Annahme, dass die Verbindung zum mobilen Gerät (C_4) bei dessen Einsatz immer existieren muss, acht weitere Kombinationsmöglichkeiten der Kommunikationswege. Diese sind in Tabelle 3.3 aufgelistet und werden in weiterer Folge beschrieben und bewertet.

Tabelle 3.3: Kommunikationswege, Interfacepositionen und Ladungssteuerung durch die Ladestation (LS) oder das Elektrofahrzeug (EV) basierend auf Abbildung 3.3 [KBG⁺11]

| Fall | Kommunikation | | | Benutzerinterface | | | Ladungssteuerung |
|------|---------------|--------------|--------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|
| | C_1 vorhd. | C_2 vorhd. | C_3 vorhd. | I_1 sinnvoll | I_2 sinnvoll | I_3 sinnvoll | |
| 1 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | LS / EV |
| 2 | | | ✓ | ✓ | | ✓ | EV |
| 3 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | LS / EV |
| 4 | | ✓ | | | ✓ | ✓ | LS |
| 5 | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | LS / EV |
| 6 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | LS / EV |
| 7 | ✓ | | | | | ✓ | |
| 8 | | | | | | ✓ | |

Fall 1 – Hier ist sowohl die Kommunikation zwischen Managementsystem und Ladestation, als auch zwischen Ladestation und Elektrofahrzeug möglich. Somit sind alle Einheiten in den Kommunikationsprozess integriert und in der Lage Informationen untereinander auszutauschen. Die Ladestation dient in diesem Fall als Gateway zwischen Elektrofahrzeug und dem Managementsystem. In diesem Szenario ist ein Interface sowohl im Elektrofahrzeug, als auch auf der Ladestation sinnvoll. Auch ein Interface auf einem mobilen Gerät kann eingesetzt werden. Die Steuerung des Ladeprozesses kann sowohl von der Ladestation ausgehen, als auch durch die Ladeelektronik des Elektrofahrzeuges gesteuert werden.

Eine koordinierte Ladung im Zuge eines Ladesystems setzt die Kommunikation zur schaltenden Einheit und die dafür nötige Hardware in dieser Einheit voraus. Diese Anforderungen werden von den derzeit am Markt erhältlichen Elektrofahrzeugen nicht erfüllt. Die Hersteller der Fahrzeuge halten auf Grund von Wettbewerbsvorteilen ihre Systeme geschlossen und erlauben damit keine bzw. nur geringe Erweiterungsmöglichkeiten und wenig Einblicke in die Ladeelektronik der Fahrzeuge.

Somit ist die Steuerung der Ladung an sich durch das Fahrzeug unwahrscheinlich. Eine Ladesteuerung durch die Ladestation ist einfacher zu realisieren, da auf die Herstellung und den Funktionsumfang der Stationen in der Regel Einfluss genommen werden kann. Mit einer Ladestation, welche die Anforderungen für eine koordinierte Ladung erfüllt, kann jedes Elektrofahrzeug beladen werden, welches selbst ebenfalls gewissen Minimalanforderungen wie ein kompatibles Stecksystem u. Ä. genügt.

Fall 2 – In diesem Fall ist lediglich die Kommunikationsverbindung C_3 (zwischen dem Elektrofahrzeug und dem Managementsystem) vorhanden. Die Ladestation ist mit dem Elektrofahrzeug

ausschließlich zum Zweck der Energieübertragung verbunden. Wegen der fehlenden Datenverbindung zur Ladestation ist der Betrieb eines Interfaces dort nicht möglich. Es kommt neben dem Interface auf einem mobilen Gerät daher nur ein Interface im Fahrzeug in Frage. Auch die Ladesteuerung kann ausschließlich vom Fahrzeug aus durchgeführt werden.

Im Fahrzeug ist zum Zweck der Abrechnung ein Energiezähler vorzusehen. Dieser müsste in die Fahrzeugelektronik integriert werden und muss auch gewissen Normungs- und Eichungsanforderungen entsprechen. Aufgrund der bereits erwähnten Abgeschlossenheit des elektrischen Systems von Elektrofahrzeugen ist eine solche Integration eines Zähl- und Steuersystems schwer möglich. Auch eine nötige drahtlose Datenverbindung (siehe Tabelle 3.2) kann mit (Empfangs-)Problemen behaftet sein.

Somit stellt Fall 2 keine ausreichende Lösung für die Realisierung eines koordinierten Ladesystems dar.

Fall 3 – Bei diesem Szenario existiert keine Datenverbindung zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation, jedoch jeweils die Verbindung dieser Einheiten zum Managementsystem. Dies entspricht einer, vom Managementsystem ausgehenden Sterntopologie bei der sowohl die Ladestation als auch das Elektrofahrzeug ein Endgerät darstellen. Es sind somit keinerlei Gatewayfunktionen vorzusehen. Da durch die Sterntopologie jede Einheit eine Datenverbindung aufweist, ist auch auf jeder die Unterbringung eines Interfaces möglich. Die Ladesteuerung kann sowohl durch das Fahrzeug, als auch durch die Ladestation erfolgen.

Es ergeben sich jedoch wieder ähnliche Probleme hinsichtlich der Erweiterung der Fahrzeugelektronik, wie im 2. Fall bereits beschrieben wurde. Da keine direkte Datenverbindung zwischen der Ladestation und dem Fahrzeug existiert, ergibt sich eine zusätzliche Herausforderung betreffend der Zuordnung des Fahrzeuges zur jeweiligen Ladestation. Diese Information ist nicht direkt verfügbar, sondern muss entweder durch den Benutzer am Interface eingegeben werden oder z. B. über zusätzliche Hardware wie Radio Frequency Identification (RFID) oder Global Positioning System (GPS) bestimmt werden.

Fall 4 – Ist nur eine Datenverbindung C_2 zwischen dem Managementsystem und der Ladestation vorhanden, so ist das Elektrofahrzeug nicht in der Lage steuernde Funktionen im Ladesystem zu übernehmen. Da im Großteil der derzeit produzierten Elektrofahrzeuge keinerlei Kommunikationsschnittstellen für Ladesysteme vorgesehen sind, könnte dieser Fall eines der Anfangsszenarien darstellen.

Fehlt jedoch die Datenverbindung zum Fahrzeug, so können Informationen betreffend einer effektiven Ladungsplanung nicht übertragen werden. Dies können z. B. der aktuelle Ladestand des Fahrzeugakkus oder die, für eine Ladung zur Verfügung stehenden, variablen Ladeleistungen sein. Das Ladesystem könnte in diesem Fall also nur mit eingeschränkter Funktionalität betrieben werden.

Fall 5 – Hier ist sowohl die Verbindung C_1 zwischen Ladestation und Elektrofahrzeug, als auch die Verbindung C_3 zwischen Managementsystem und Elektrofahrzeug vorhanden. Damit ist abermals, wie im Fall 1 bereits beschrieben, der Einsatz eines Interfaces auf der Ladestation und im Elektrofahrzeug möglich. Auch die Ladungssteuerung kann sowohl vom Elektrofahrzeug, als auch von der Ladestation übernommen werden. Der einzige Unterschied dieses Szenarios zum Fall 1 ist, dass nun das System im Fahrzeug die Gatewayfunktionen übernehmen muss, um die Daten der Ladestation weiterreichen zu können. Die Sicherstellung dieser Gatewayfunktion ist, bedenkt man, dass verschiedene Fahrzeuge von den unterschiedlichsten Herstellern an das System angeschlossen werden sollen, eine schwierige Aufgabe.

Fall 6 – Der Fall 6 stellt einen Sonderfall dar, da hier alle möglichen Kommunikationswege C_1 bis C_4 eingesetzt werden. Es kann also jeder der anderen sieben Fälle und Kombinationen daraus auf diesen Fall abgebildet werden. Jede Einheit ist redundant mit den anderen Einheiten des Systems verbunden. Dies kann zu erhöhter Ausfallsicherheit und Zuverlässigkeit führen. Es stellt jedoch auch einen höheren Aufwand und ggf. auch erhöhte Betriebskosten aufgrund redundanter Kommunikationswege dar. Es ist wiederum möglich alle drei Interfacevarianten I_1 bis I_3 einzusetzen und die Steuerung der Ladung sowohl durch das Elektrofahrzeug, als auch durch die Ladestation durchzuführen.

Fall 7 – Ist nur die Verbindung C_1 vorhanden, so kann zwar das Elektrofahrzeug mit der Ladestation kommunizieren, jedoch gibt es keine Kommunikationsmöglichkeit zum Managementsystem, welches die Koordination der Lastverschiebung und Ladungssteuerung übernimmt. Nur durch den Einsatz der Verbindung C_1 kann also kein funktionstüchtiges koordiniertes Ladesystem realisiert werden. Auch der Einsatz der Interfaces ist in diesem Fall zwecklos.

Fall 8 – Dieses Szenario stellt ebenfalls einen Sonderfall dar, da keine der Verbindungen C_1 - C_4 zum Einsatz kommt. In diesem Fall kann auch kein funktionstüchtiges Ladesystem realisiert werden.

Nach Bewertung aller acht Möglichkeiten scheint in Anbetracht der vorliegenden Rahmenbedingungen Fall 1 die sinnvollste Realisierungsmöglichkeit darzustellen, da hierbei die Probleme der fehlenden Schnittstellen und der schwierigen Integration eines Ladesteuerungssystems in die Fahrzeugelektronik nicht auftreten. Auch die Kommunikation vom Managementsystem zur fix montierten Ladestation und von dort zum Fahrzeug scheint eines der zielführendsten Modelle zu sein.

Bis die Elektrofahrzeuge in der Lage sind alle, für eine effektive Lastverschiebung benötigten Informationen an die Ladestation über geeignete Schnittstelle (z. B. IEC 15118) zu kommunizieren, ist auch der Betrieb des Systems so wie in Fall 4 beschrieben, denkbar. Dieser Fall stellt eine Vereinfachung zu Fall 1 dar.

Alle anderen Fälle stellen einen höheren Aufwand dar oder ermöglichen den Betrieb eines koordinierten Ladesystems nicht.

3.6 Authentifizierungsmechanismen

Um eine eindeutige Zuordnung und Identifikation der Einheiten im Ladesystem gewährleisten zu können, sind Authentifizierungsmechanismen vorzusehen. Diese sind nötig damit sich der Kunde am Interface, das Fahrzeug an der Ladestation oder das Fahrzeug bzw. die Ladestation am Managementsystem anmelden kann.

Eine Authentifizierung kann primär auf drei Arten, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden, erfolgen. Im Anschluss wird ein weiterer, alternativer Authentifizierungsmechanismus beschrieben.

Authentifizierung durch Wissen

Dieser relativ einfache Ansatz einer Authentifizierung erfolgt z. B. durch die Eingabe eines Passwortes, einer persönlichen Identifikationsnummer (PIN) oder ähnlichen Informationen. Ein solch geteiltes Wissen ermöglicht es dem System einen Kunden, welcher dieses Wissen über ein Geheimnis teilt, eindeutig zu identifizieren. Diese Vorgehensweise findet oft bei Interfaces für das Einloggen der Kunden Anwendung. Hierbei wird jedoch meist nicht direkt das gemeinsame Geheimnis verglichen, sondern aus dieser Information abgeleitetes Wissen. Z. B. wird in Datenbanken oft nicht der direkte Passwort-String abgespeichert und verglichen, sondern ein daraus berechneter Hash-Wert. Diese Vorgehensweise verhindert, dass das Geheimnis durch Dritte ausgespäht werden kann.

Ein Nachteil dieser Authentifizierungsmethode ist, wie bereits erwähnt, dass das Wissen ausgespäht bzw. weitergegeben werden kann. Außerdem ist es im Laufe der Zeit möglich, dass die Information in Vergessenheit gerät [Hos08].

Eine weitere Möglichkeit zur Authentifizierung durch Wissen ist der Einsatz von so genannten „Challenge-Response“-Verfahren. Dabei sendet eine Seite eine Aufgabe (Challenge) an die andere, welche durch ihr Wissen diese Aufgabe löst und die Antwort zurück gibt (Response). Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das gemeinsame Wissen niemals direkt übertragen wird. Dies ist vor allem bei der Verwendung unverschlüsselter Übertragungsmedien vorteilhaft [JWM09].

Authentifizierung durch Besitz

Abstrahiert von der Verwendung eines Fahrzeugs- oder Wohnungsschlüssels erfolgt diese Authentifizierungsmethode durch den Besitz eines speziellen Gegenstandes. Dieser wird meist durch eine dritte, vertrauenswürdige Partei zur Verfügung gestellt.

Der Nachteil ist allerdings, dass solch ein Besitztum verloren gehen kann oder durch Diebstahl entwendet wird. Außerdem kann es vorkommen, dass das Objekt kopiert wird oder (z. B. durch Alterung) seine Schlüsselfunktion verliert. Moderne Beispiele für solche Objekte sind neben dem klassischen Schlüssel oder Ausweis vor allem Chipkarten wie Speicherkarten, Smartcards oder RFID-Chips.

Speicherkarten verfügen ausschließlich über einen nicht flüchtigen Speicherbereich (z. B. EEPROM), auf welchem Daten zur Identifikation hinterlegt werden. Komplexere Formen verfügen zusätzlich über Sicherheitslogik, wie einer PIN-Speicherung und -Überprüfung oder einen Zähler für die Zählung fehlgeschlagener PIN-Eingaben.

Smartcards verfügen neben dem internen, programmierbaren Speicher über einen Mikroprozessor. Sie werden großteils über eine achtpolige Kontaktfläche mit einem System verbunden, welches durch das Anlegen der Versorgungsspannung und eines externen Taktes den Mikroprozessor in der Smartcard aktiviert. Im Anschluss können Daten über einen Kontakt seriell, halbduplex gelesen und geschrieben werden. Im ROM-Speicher einer Smartcard, welcher nur gelesen werden kann, sind kritische Daten wie die PIN-Abfrage, das Betriebssystem und Kryptographieverfahren gespeichert. Zusätzlich verfügt die Smartcard noch über eine CPU (meist ein 8-Bit Mikroprozessor mit CISC-Architektur), sowie RAM- und EEPROM-Speicher [Hos08].

Radio Frequency Identification (RFID) ist ein drahtloses Verfahren, das aus einem RFID-Reader und einer beliebigen Anzahl an RFID-Chips besteht. Ein solcher Chip kann entweder aktiv oder passiv mit Energie versorgt werden. Aktive RFID-Chips besitzen neben einer Antenne und einem

Mikrochip auch eine Batterie, durch welche sie zwar in ihrer Lebensdauer begrenzt sind, jedoch höhere Übertragungreichweiten und Datenraten aufweisen. Durch die interne Energieversorgung ist auch eine erweiterte Funktionalität als bei passiven Chips möglich (z. B. der Einsatz von Kryptographieverfahren). Die passiven RFID-Chips werden mittels Induktion über ihre Antennen mit Energie aus dem, vom RFID-Reader erzeugten elektrischen Wechselfeld betrieben. Der Vorteil der passiven Chips ist, dass sie in unterschiedlichster Bauform und sehr klein und kostengünstig gefertigt werden können und bei passiver Energieversorgung praktisch eine unbegrenzte Lebensdauer aufweisen [Hos08].

Authentifizierung durch Merkmale

Die klassische Art der Authentifizierung durch (Körper-)Merkmale ist die durch den Fingerabdruck oder ein Passbild. Weitere technisch aufwändigere Möglichkeiten sind Gesichtsscanner, Handflächenscanner, Irisscanner, Stimmerkennung oder die Erkennung des Anschlagverhaltens eines Menschen auf einer Tastatur.

Diese Authentifizierungsmethode ist eine der intuitivsten und am längsten durch den Menschen angewandte. Sie ist jedoch technisch nicht ohne weiteres zu realisieren und kann dadurch kostenintensiver ausfallen als die anderen Methoden.

Meist sind aufwändige technische Geräte zur Erkennung der biometrischen Informationen nötig. Ein weiterer Nachteil ist, dass Merkmale teilweise nicht eindeutig zugewiesen werden und somit fehlerhafte Erkennungen biometrischer Eigenschaften auftreten können [Hos08].

Authentifizierung durch den Ort

Alternativ zu den drei bereits erwähnten Authentifizierungsmethoden ist speziell für Ladestationen und Elektrofahrzeuge eine Identifizierung nach dem Standort denkbar. Hat z. B. ein Fahrzeug den selben Aufenthaltsort (die gleichen GPS-Koordinaten) wie eine Ladestation, so kann diese Eigenschaft für dessen Identifizierung und die Zuordnung zur Ladestation herangezogen werden.

Ein weiterer Zugang zur Identifikation durch den Ort stellt die Verwendung von Adressen dar. Dabei kann es sich neben Postanschriften auch um virtuelle Adressen von Geräten (z. B. IP- oder MAC-Adressen) handeln, mit deren Hilfe ein Gerät (z. B. eine Ladestation) eindeutig identifiziert werden kann. Hierbei ist jedoch Vorsicht geboten, da GPS-Daten und Adresse auch gefälscht, fehlerhaft oder ungenau sein können [Hos08].

Kombination von Authentifizierungsmethoden

Um den Problemen und Schwachstellen der zuvor beschriebenen Authentifizierungsmechanismen vorzubeugen, ist eine Kombination der Authentifizierungsmethoden empfehlenswert. Einfach zu realisieren ist z. B. eine Kombination aus wissens- und besitzbasierten Methoden durch den Einsatz einer Chip- oder RFID-Karte mit PIN-Code. Die Kombination der Methoden kann auch dazu verwendet werden um Plausibilitätstests durchzuführen. Beispielsweise kann die Position einer Ladestation, an welcher sich ein Fahrzeug anmeldet nochmals über die GPS-Daten des Fahrzeuges überprüft werden. Damit können Fehler und Angriffe auf das System reduziert werden.

3.7 Zentrale Datenhaltung

Die in den Abbildungen 3.2 und 3.3 als Managementsystem bezeichnete Einheit kann, wie bereits erwähnt, aus mehreren unterschiedlichen Modulen aufgebaut sein, welche durch die Verwendung geeigneter Schnittstellen auch von verschiedenen Institutionen (ggf. örtlich getrennt) betrieben werden können. Eines dieser Module stellt der Aggregator dar, welcher mit Hilfe von Algorithmen und ihm zur Verfügung gestellten Daten unterschiedliche Aufgaben des Ladesystems übernimmt.

Für die Erfüllung dieser Aufgaben werden im Managementsystem weitere Module zur Speicherung, Aufbereitung und Verteilung von Daten benötigt. Dabei kann es sich um einen einfachen Mailserver für die Kommunikation zu den Kunden oder File- bzw. FTP-Server für die Bereitstellung von Daten, sowie um Datenbank- oder Webserver handeln.

Von essentieller Bedeutung für das Ladesystem ist vor allem der Betrieb eines Datenbank-Managementsystems (DBMS). Durch das DBMS werden relevante Daten gespeichert und können mittels Transaktionen durch das Interface, die Ladestationssoftware, den Aggregator oder von externen Einheiten wie Energieversorgern oder Netzbetreibern abgerufen oder verändert werden.

Der Datenbankserver wird für die Speicherung von Benutzerdaten, Anlagendaten, Ladewünschen, Ladebefehlen, Informationen von Energieversorgern und Netzbetreibern, Verbrauchsstatistiken uvm. eingesetzt. Diese Aufgaben können von allen gängigen DBMS erfüllt werden. Diese sind z. B. MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL, Oracle oder IBM DB/2.

Für die Wahl des DBMS gibt es eine Menge an Kriterien zu beachten. Für die Anforderungen des Ladesystems wird, wie zumeist üblich, der Einsatz eines relationalen Datenbanksystems zielführend sein. Es ist jedoch auch denkbar eine objektrelationale Datenbank für die einfachere Handhabung komplex strukturierter Daten zu verwenden.

Weitere Auswahlkriterien sind die Skalierbarkeit, Replizierbarkeit und Partitionierbarkeit des Datenbanksystems, sowie die Möglichkeiten der Anbindung externer (ggf. bereits vorhandener) Systeme, sowie die Kosten für das Datenbanksystem.

Sollte eine Interfacevariante als Webinterface ausgeführt werden, so ist hierfür auch der Betrieb eines Webservers im Managementsystem nötig. Die beiden mit Abstand am weitesten verbreiteten Webserver sind der Apache HTTP Server und der Internet Information Service (IIS) von Microsoft [Pre09]. Grundlegende Anforderungen an den Webserver sind die Möglichkeit der Anbindung an das DBMS, sowie die Möglichkeit die Datenübertragung über eine gesicherte Verbindung durchführen zu können.

Bei dem Betrieb dieser Server ist prinzipiell auf die Verwendung aktueller Software-Versionen zu achten, um den Einsatz moderner Technologien (z. B. IPv6, HTML 5.0, usw.) zu ermöglichen und Sicherheitslücken in veralteten Versionen zu vermeiden.

Es kann festgehalten werden, dass es eine große Anzahl an Realisierungsmöglichkeiten für ein koordiniertes Ladesystem gibt. Aus der Vielfalt an Technologien und Konzepten gilt es, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte wie der Benutzerfreundlichkeit, der Zuverlässigkeit, den Kosten, usw. eine möglichst optimale Auswahl zu treffen.

Im folgenden Kapitel wird eine Implementierungsmöglichkeit ausgewählt und dessen prototypische Implementierung beschrieben. Anschließend folgt eine Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.

4 Auswahl eines Lösungsansatzes und Beschreibung der Implementierung

Ausgehend von den in Kapitel 3 beschriebenen unterschiedlichen Möglichkeiten für die Realisierung eines Systems für die koordinierte Ladung von Elektrofahrzeugen wird im vorliegenden Kapitel die konkrete Realisierung einer ausgewählten Lösungsmöglichkeit beschrieben. Zuvor werden die Kriterien für die Auswahl der Realisierungsmöglichkeit beschrieben.

Die prototypische Realisierung, welche im Zuge der Diplomarbeit in Kooperation mit dem Unternehmen Salzburg AG erfolgte, besteht aus zwei Varianten des Benutzerinterfaces und dem koordinierenden Teil des Managementsystems, dem sogenannten Aggregator. Die restlichen Teile des Ladesystems, z. B. das Elektrofahrzeug und die Ladestationen werden als vorhanden vorausgesetzt.

Nach der Beschreibung der Realisierung werden die Ergebnisse des simulierten Einsatzes der prototypischen Implementierung angeführt und erläutert.

4.1 Auswahl eines Lösungsansatzes

In Kapitel 3.5.2 wurden acht unterschiedliche Kombinationen der Kommunikationswege beschrieben und bewertet. Als Ergebnis dieser Bewertung zeigte sich, dass unter den aktuellen Randbedingungen Fall 1 der zielführendste ist. In diesem Fall besteht sowohl eine Kommunikationsverbindung zwischen dem Managementsystem und den Ladestationen, als auch zwischen den Ladestationen und den Elektrofahrzeugen. Diese Konfiguration wurde auch für die prototypische Implementierung gewählt. Alle anderen Fälle sind entweder aufgrund der schwierigen Erweiterbarkeit der Ladeelektronik von Elektrofahrzeugen oder wegen fehlender Kommunikationswege ausgeschlossen.

Die Wahl dieser Art der Implementierung scheint auch aus dem Grund sinnvoll, da bei ihr keine Anpassungen an den Elektrofahrzeugen vorgenommen werden müssen und auf die Produktion und Funktionalität der Ladestation Einfluss genommen werden kann.

Ersichtlich aus Tabelle 3.3 ist, dass im gewählten Fall 1 ein Benutzerinterface sowohl im Elektrofahrzeug, als auch an der Ladestation und auf einem mobilen Gerät sinnvoll ist. Aufgrund des zum Zeitpunkt der Implementierung nicht vorhandenen Kommunikationsweges vom Batteriemanagementsystem der Elektrofahrzeuge zu den Ladestationen wird auf die Implementierung des

Interfaces im Fahrzeug verzichtet. Folglich ist auch ein Betrieb des Ladesystems mit verminderter Funktionalität, wie er in Fall 4 beschrieben ist, denkbar.

Um das Benutzerinterface auf möglichst vielen Geräten einsetzen zu können, fiel die Entscheidung auf die Implementierung eines Web-Interfaces, welches auf allen HTML-fähigen Geräten (ggf. auch auf den Ladestationen) betrieben werden kann. Zusätzlich wurde ein Interface für mobile Geräte, basierend auf einer Web-Applikation implementiert.

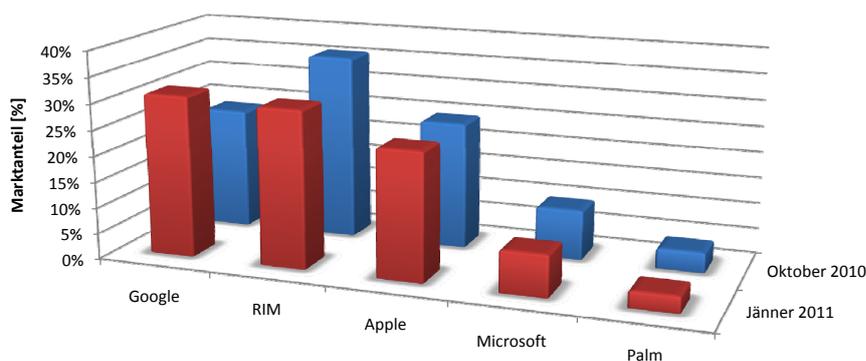


Abbildung 4.1: Marktanteil von mobilen Betriebssystemen im Okt. 2010 und Jan. 2011 (Quelle: [2])

Eine Studie des Marktforschungsunternehmens comScore [2] aus dem ersten Quartal 2011 zeigt, dass die marktführenden Betriebssysteme für mobile Geräte die der Unternehmen Google, RIM und Apple sind. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Aufgrund der rasanten Entwicklungen von mobilen Geräten fiel die Entscheidung bezüglich der eingesetzten Technologien auf die beiden sich am schnellsten verbreitenden und innovativsten Geräteklassen aus dieser Studie. Diese sind Apples iOS Geräte (iPhone, iPod Touch und iPad) sowie Geräte mit Google's Android-Betriebssystem.

Serverseitig wurde die Auswahl der Komponenten aufgrund ihrer sonst sehr ähnlichen Eigenschaften hauptsächlich von den Kosten und Lizenzgebühren abhängig gemacht. Für die Datenspeicherung und -verwaltung wurde ein MySQL-Server ausgewählt. Als Server-Betriebssystem kommt die Linux-Distribution Debian zum Einsatz, welche ausschließlich freie Software beinhaltet und sich in den vergangenen Jahren zum meist genutzten freien Server-Betriebssystem entwickelt hat [6].

4.2 Implementierung eines Systems zur koordinierten Ladung von Elektrofahrzeugen

Der Aufbau des Ladesystems wurde in Kapitel 3.3 bereits kurz beschrieben und ist in Abbildung 3.2 grafisch dargestellt. Wie in der Aufgabenstellung (Kapitel 2.3.2) bereits erläutert wurde, wird davon ausgegangen, dass die Elektrofahrzeuge und Ladestationen vorhanden sind und in der Diplomarbeit der Fokus auf dem Aggregator, von dem das Ladesystem koordiniert wird und auf dem Interface, welches die Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Aggregator bildet, liegen.

Zusätzlich zu diesen beiden Einheiten wird im vorliegenden Abschnitt auch das Back-End, also der Server und die Serverapplikationen und im Speziellen das für das Ladesystem verwendete Datenmodell beschrieben.

4.2.1 Back-End (Server)

Das Back-End für das Ladesystem besteht aus mehreren Einheiten. Für die Speicherung und Verwaltung der Daten wird auf dem Debian-Server eine MySQL-Datenbank betrieben. Für den Betrieb des Web- und Smartphone-Interface wird zusätzlich ein Apache-Webserver eingesetzt.

In Abbildung 4.2 auf Seite 45 ist das Entity-Relationship-Modell der Datenbankstruktur für das Ladesystem dargestellt. Die Datenbankstruktur kann in vier grobe Abschnitte für die Verwaltung der Kundendaten, der Anlagen und der Ladungen gegliedert werden. Zusätzlich ist noch ein Abschnitt speziell hervorzuheben, welcher für die Speicherung der Informationen von Netzbetreibern und Energieversorgern vorgesehen sind.

- **Abschnitt „Kundenverwaltung“**

Im Abschnitt der Kundenverwaltung werden sämtliche für ein Ladesystem relevante Kundendaten gespeichert. In der vorliegenden prototypischen Implementierung sind jedoch nur die nötigsten Informationen in der Tabelle `t_kunden` enthalten. Sie gewährleisten eine Unterscheidung der einzelnen Kunden, die Zuordnung dieser zu bestimmten Berechtigungslevels, sowie ihre Identifikation mittels Passwort. Die Kundenverwaltung eines für den Dauerbetrieb vorgesehenen Systems müsste umfangreicher ausgeführt werden. In diesem Abschnitt befindet sich zusätzlich noch die Tabelle `t_system`, die für die Speicherung von Konfigurationswerten, wie z. B. den Grenzwerten für die Netzreserve vorgesehen ist. Des Weiteren ist auch noch eine Tabelle `t_logs` für das Logging von Systemnachrichten und Fehlermeldungen enthalten.

- **Abschnitt „Anlagenverwaltung“**

In der Anlagenverwaltung werden sämtliche Informationen über die, im Ladesystem vorhandenen Ladestationen verwaltet. Da es sich bei den Anlagen, die in Tabelle `t_anlagen` eingetragen sind, ausschließlich um Heim-Ladestation handelt die nicht öffentlich zugänglich sind, ist jede dieser Stationen genau einem Kunden (`t_kunden`) und einem Standort (`t_locations`) zugeordnet. Der Anlagenstatus aus der Tabelle `t_anlagenstatis` gibt Auskunft darüber, ob die Ladestation momentan eine Verbindung zu einem Elektrofahrzeug hat, ob dessen Batterien ge- oder entladen werden oder sich die Ladestation im Ruhezustand befindet. Es finden sich hier auch alle Informationen betreffend dem Ladestand des verbundenen Fahrzeuges, dessen maximale Reichweite und weitere fahrzeugspezifische Daten. Die gemeinsame Verwaltung dieser Daten mit den Anlageninformationen stellt eine Vereinfachung des Datenmodelles dar.

- **Abschnitt „Ladungsverwaltung“**

Die Ladungsverwaltung ist der größte Abschnitt im Datenbank-Modell und steht mit allen anderen in Verbindung. Jede Anlage aus der Anlagenverwaltung hat vorgegebene Ladeleistungen (`t_ladeleistungen`) zur Verfügung mit denen die Ladungen durchgeführt werden können. Des Weiteren ist es möglich, eine beliebige Anzahl an Ladeprofilen (`t_ladeprofile`) für jede Anlage zu definieren. Diese Ladeprofile stehen selbst wiederum mit den Ladewünschen (`t_ladewuensche`) in Verbindung, aus welchen sich die einzelnen Ladungen in der Tabelle `t_ladungen` ergeben. In `t_tarifarten` sind die Preisinformationen und die möglichen Tarife enthalten.

- **Abschnitt „externe Informationen“**

Dieser Abschnitt enthält nur zwei Tabellen `t_lastprofil` und `t_locations` für die Spei-

cherung externer Informationen. In der erst genannten wird für jeden Standort ein Lastprofil (mit beliebiger Anzahl an Zeit-Slots mit Lastwerten in kW) gespeichert, auf Basis dessen die Ladungen geplant werden. Diese Informationen können z. B. von Energieerzeugern regelmäßig via MySQL-Befehlen aktualisiert werden. Die zweite Tabelle beinhaltet die Standorte (*Locations*) an welchen sich die Anlagen befinden können. Diesen *Locations* ist der Wert für die Netzreserve an dem jeweiligen Ort zugewiesen. Auch dieser Wert kann von externen Einheiten (z. B. den Netzbetreibern) aktualisiert werden und dient damit als Grundlage für die reaktiven Mechanismen des Ladesystems.

4.2.2 User-Interface

Das Interface baut auf den Erkenntnissen eines Kreativ-Workshops auf, welcher im Zuge des Projektes der Smart Grids Modellregion Salzburg „V2G-Interfaces“ durchgeführt wurde. Es stellt dem Anwender folgende Funktionalität zur Verfügung:

- **Auslesen von Statusinformationen:**

- **Status der Ladestation**

Der Status der Ladestation kann einen der folgenden Werte annehmen: „keine Verbindung zur Ladestation“, „kein Fahrzeug verbunden“, „Standby“, „Laden (langsam)“, „Laden (mittel)“, „Laden (schnell)“, „Entladen“.

- **Ladestand des Fahrzeugakkus**

Der Ladestand des Fahrzeugakkus wird in Prozentpunkten angegeben. Dieser Wert kommt vom Batteriemanagementsystem des Fahrzeuges und wird von der Ladestation weitergegeben.

- **geschätzte Reichweite des Fahrzeuges**

Die mögliche Reichweite wird aus der maximalen Reichweite des Fahrzeuges und dem momentanen Ladestand des Fahrzeugakkus bestimmt. Da die Reichweite jedoch von vielen äußeren Einflüssen wie der Temperatur, der Strecke, dem Fahrverhalten usw. abhängt, handelt es sich hierbei nur um eine Abschätzung.

- **Verbrauchsstatistik der letzten Wochen und Monate**

In einem Wasserfalldiagramm wird die verbrauchte Energiemenge nach Wochen und Monaten sowie die gesamte in diesem Zeitraum verbrauchte Energie dargestellt.

- **Netzstatus**

Der Netzstatus ist ein Maß für die Belastung der einzelnen Netzknoten. Er ergibt sich aus der Spannung im betreffenden Knoten bezogen auf die Nennspannung. Um diesen Wert einfach und intuitiv begreifbar zu machen, wird er im Interface durch ein Ampelsystem repräsentiert. Die Darstellung dieser Informationen ist optional.

- **Definition und Bearbeitung von Ladeprofilen:**

Der Anwender kann selbständig Ladeprofile definieren. Dabei unterscheidet er zwischen Sofortladungen und Planladungen. Für jedes Ladeprofil muss die gewünschte Reichweite, die

nach Beendigung der Ladung mit dem Fahrzeug zurückgelegt werden soll eingegeben werden. Zusätzlich muss bei Planladungen die Deadline bis zu welcher die Ladung erfolgt sein soll, eingestellt werden. Bei der Sofortladung wird die Ladung unmittelbar nach Aktivierung des Ladeprofiles gestartet. Bei einer Planladung wird die Ladung so ausgeführt, dass zur vorgegebenen Deadline die gewünschte Reichweite mit dem Fahrzeug zurückgelegt werden kann.

- **Eingabe von Ladewünschen mit Hilfe vordefinierter Profile:**

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Profile kann der Anwender seine Ladewünsche an das System melden. Er ist somit in der Lage, eine Ladung sofort zu beginnen oder diese bis zu einer vorgegebenen Deadline vom System planen zu lassen.

Das Interface wurde sowohl als Webseite, als auch als Applikation für Smartphones realisiert. Es kann auf allen HTML-fähigen Geräten, Apple's iOS-Geräten (iPod-Touch, iPhone, iPad), sowie auf Geräten mit dem Android-Betriebssystem, welche über eine mobile Datenanbindung verfügen installiert und betrieben werden. Dadurch ist es dem Kunden mit Hilfe seines Smart-Phones oder Tablet-PC möglich, von überall auf der Welt Informationen über die Ladung seines Elektrofahrzeuges abzufragen und die Ladung zu steuern. Für die Erstellung des mobilen Interfaces wurde das Framework iWebkit5 (V. 5.04 [15]) verwendet.

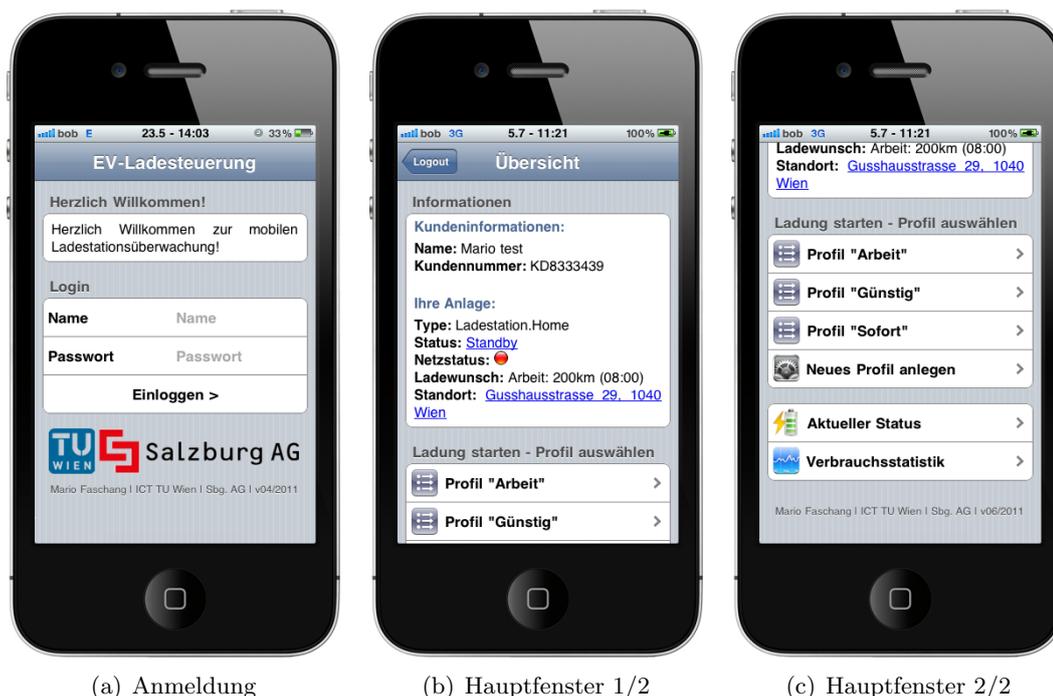


Abbildung 4.3: mobiles Interface am iPhone dargestellt: Anmeldefenster (a) und Hauptfenster (b), (c) mit allgemeinen Informationen und dem Hauptmenü

In den Abbildungen 4.3, 4.4 und 4.5 ist das mobile Interface dargestellt und wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Nach der Identifikation des Benutzers durch die Eingabe von Name und Passwort (siehe Abbildung 4.3(a)) gelangt dieser in das Hauptmenü (vgl. Abbildungen 4.3(b) und 4.3(c)). Das Interface bietet dem Anwender grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten seinen Fahrzeugakku zu beladen.

In jedem Fall definiert er die gewünschte Reichweite in Kilometern, welche er mit seinem Fahrzeug nach Beendigung der Ladung mindestens zurücklegen möchte. Anschließend kann entweder eine Sofortladung gestartet werden oder die Ladung bis zu einer bestimmten Deadline geplant werden. All diese Parameter werden zu Ladeprofilen zusammengefasst und können nach einmaliger Definition direkt aktiviert werden (siehe Abbildungen 4.4(a) und 4.4(b)).



Abbildung 4.4: mobiles Interface am iPhone dargestellt: Eingabe und Bearbeitung (a) von Ladeprofilen (b) und detaillierte Statusanzeige (c)

Mit Hilfe der Statusanzeige, welche in Abbildung 4.4(c) dargestellt ist, erhält der Benutzer jederzeit aktuelle Informationen über den Status der Ladestation und der Ladung. Er wird darüber informiert, ob ein Fahrzeug mit der Ladestation verbunden ist, ob dessen Batterien gerade geladen werden und ob eine Ladung geplant ist. Außerdem werden der Ladestand der Batterie (der sgn. „State-of-Charge“ – SoC) und die prognostizierte Reichweite angezeigt. Zusätzlich gibt es Informationen über den aktuellen Netzstatus um die Bewusstseinsbildung beim Kunden zu fördern und ihn darüber zu informieren, ob die Fahrzeugladung mit maximaler Ladeleistung momentan möglich bzw. günstig ist.

Abbildung 4.5(a) und Abbildung 4.5(b) zeigen die Verbrauchsstatistiken des mobilen Interfaces. Hierbei handelt es sich um zwei Wasserfall-Diagramme, welche die verbrauchten Energiemengen der jeweils letzten vier Wochen bzw. der letzten vier Monate, sowie den jeweiligen Gesamtverbrauch darstellen. Dem Benutzer ist es somit möglich, seinen aktuellen Energieverbrauch mit dem vorangegangener Zeiträume zu vergleichen und zu bilanzieren.

Für die Erstellung des Interfaces kommen serverseitig PHP und HTML5 zum Einsatz. Durch PHP werden die Daten aus den Datenbanken ausgelesen und verarbeitet um diese am Interface darstellen zu können. Die Fenster werden mit HTML5 und teilweise JavaScript aufgebaut. Die Datenübertragung erfolgt via HTML-Requests, POST- und GET-Befehlen über den Port 80 in Klartext. Die Wasserfall-Diagramme in Abbildung 4.5(a) und 4.5(b) sind HTML5 Canvas-



(a) Wochenstatistik

(b) Monatsstatistik

Abbildung 4.5: mobiles Interface am iPhone dargestellt: Verbrauchsstatistik der letzten Wochen (a) und Monate (b)

Elemente in welchen mit Hilfe des RGraph-Frameworks [23] und PHP sehr komfortabel dynamische, interaktive Diagramme erzeugt werden können.

Die Klartextübertragung der Daten kann von Dritten bei Angriffen auf das Netzwerk mitgehört und manipuliert werden. Um solchen böswilligen Angriffen und damit verbundenen ungewollten Veränderungen der übertragenen Informationen vorzubeugen, kann die Datenübertragung über ein virtuelles, privates Netzwerk (VPN) erfolgen. Im Zuge dessen können die übertragenen Informationen verschlüsselt werden. Für die Übertragung der Interfacedaten ist außerdem der Einsatz von HTTPS und eine damit verbundene Datenverschlüsselung möglich.

4.2.3 Aggregator

Der Aggregator bildet das Herzstück des Systems. Er sammelt und verarbeitet alle Informationen der Benutzer, sowie die der Energieversorger und Netzbetreiber und erfüllt die im Folgenden beschriebenen Aufgaben:

1. Verarbeiten von Ladewünschen (proaktives Vorgehen zur Steigerung der Netzqualität)
2. Reaktion auf Netzreservenänderungen (reaktives Vorgehen zur Steigerung der Netzqualität)
3. Kommunikation zwischen Aggregator, Ladestationen, Netzbetreibern und Energieversorgern

Für die Bearbeitung dieser drei Aufgaben verwendet der Aggregator folgende Daten, welche jederzeit über MySQL-Schnittstellen bearbeitet werden können:

- **Netzreserve:**

Jede Ladestation ist einem Standort (*Location*) zugeteilt, an welcher sich beliebig viele Ladestationen befinden können. Die *Location* kann z. B. einen Ortsnetztransformator oder einen Netzabschnitt repräsentieren. Bei der *Location* ist der Wert für die Netzreserve gespeichert. Die Netzreserve resultiert aus der Spannung des betreffenden Messpunktes bezogen auf dessen Nennspannung und wird in Prozentpunkten angegeben (siehe Gleichung 4.1). Der Wertebereich liegt üblicherweise zwischen 90 und 110 %.

$$NR_X = \frac{U_{\text{LocationX}}}{U_{\text{ref}}} * 100 \quad (4.1)$$

- **Lastprofil:**

Für jede der oben angegebenen *Locations* existiert ein Lastprofil. Dieses ist in beliebig lange Intervalle (Zeit-Slots) eingeteilt und repräsentiert die Belastung der *Location* (z. B. des Netzabschnittes, Transformators) zu jedem Tageszeitpunkt in kW. Die Werte können auf historischen oder statistischen Daten beruhen, sind frei konfigurierbar und können jederzeit über eine MySQL-Schnittstelle aktualisiert werden. Ein Beispiel mit 60 Minuten dauernden Zeit-Slots ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es zeigt ein auf 200 Haushalte skaliertes H0-Haushaltslastprofil [Lit09]. Solch ein H0-Lastprofil ist nur für eine Ansammlung von mindestens 100 Haushalten repräsentativ, da somit die zeitlich schwankenden Verbräuche der einzelnen Haushalte vernachlässigt werden können.

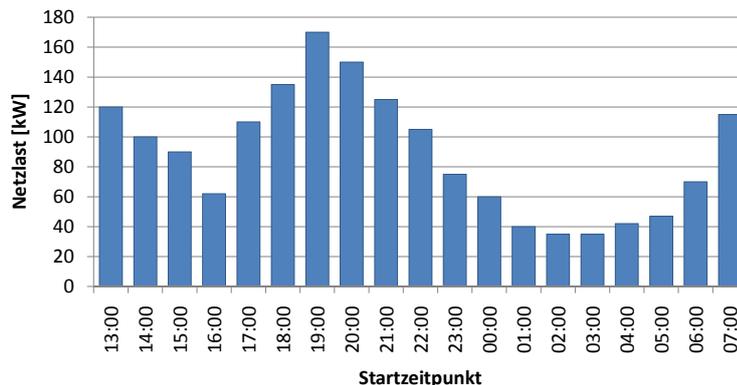


Abbildung 4.6: Lastprofil als Basis für die Berechnungen des Aggregators

Die drei oben angeführten Aufgaben des Aggregators werden durch bestimmte Algorithmen mit Hilfe der Informationen über die Netzreserven und Lastprofile abgearbeitet. Die Vorgehensweise dafür ist in den folgenden drei Unterkapiteln genau erläutert.

Verarbeitung von Ladewünschen

Die Verarbeitung der Ladewünsche stellt ein proaktives Vorgehen zur Steigerung der Netzqualität dar, da die Ladung anhand der vorliegenden Daten von Netzbetreibern und Energieversorgern initiativ so geplant wird, dass dadurch die Netzqualität nicht negativ beeinflusst wird.

Der Ladewunsch wird zum Zweck der Ladungsplanung im Aggregator, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, verarbeitet. Der dargestellte Algorithmus wird durch einen Trigger, welcher durch das Speichern des Ladewunsches in der Datenbank ausgelöst wird, aktiviert. Der SQL-Code für den Trigger für die Aktivierung ist im folgenden Listing 4.1 dargestellt.

```

1 DELIMITER $$
2 CREATE TRIGGER lwInsert AFTER INSERT ON t_ladewuensche
3 FOR EACH ROW
4 IF((SELECT conf_value FROM t_system WHERE conf_name LIKE 'AggEnabled')=0) THEN
5   UPDATE t_system SET conf_value=1 WHERE conf_name LIKE 'AggEnabled';
6   SELECT "PROCESS_LW" INTO OUTFILE '/opt/commands/comm';
7 END IF $$
8 DELIMITER ;

```

Listing 4.1: MySQL-Code für den Insert-Trigger zur Aktivierung des Aggregators

Wie bereits erwähnt, wird dieser Trigger nach dem Einfügen eines neuen Ladewunsches in die Datenbank aktiviert und gibt den Befehl `PROCESS_LW` an den Aggregator weiter. Dies geschieht nur dann, wenn der Aggregator nicht gerade aktiv ist. Um das gleichzeitige Aktivieren des Aggregators zu vermeiden wurde im Trigger ein binärer Semaphor vorgesehen. Dieser wird durch das Setzen des Konfigurationswertes `AggEnabled` in der Tabelle `t_system` realisiert. Nach Abarbeitung des Befehles durch den Aggregator setzt dieser den Semaphor wieder zurück.

Die Vorgehensweise bei der Einteilung der Ladungen hängt primär davon ab, ob es sich um eine Sofortladung oder eine geplante Ladung (mit vorgegebener Solldistanz und Deadline) handelt. Im ersten Abschnitt des Algorithmus (siehe Abbildung 4.7) wird daher zuerst die Art der Ladung unterschieden. Handelt es sich um eine geplante Ladung, die jedoch nicht mehr bis zur Deadline durchgeführt werden kann, so wird sie wie eine Sofortladung behandelt.

Im weiteren Schritt erfolgt die Erstellung eines neuen (Planungs-)Lastprofils aus dem Basislastprofil. Bei einer Sofortladung besteht dieses aus den chronologisch sortierten Zeit-Slots des Basislastprofils beginnend mit dem Eingabezeitpunkt des Ladewunsches. Handelt es sich jedoch um eine geplante Ladung, so wird das Planungslastprofil vom Eingabezeitpunkt bis zur Deadline erstellt. Zusätzlich zur Basislast werden alle bereits geplanten Ladungen in jedem Zeit-Slot aufsummiert und die Slots im Anschluss nach dieser Gesamtlast aufsteigend sortiert.

Im Anschluss erfolgt die eigentliche Verarbeitung des Ladewunsches wie in der zweiten Hälfte der Abbildung 4.7 dargestellt und die damit verbundene Zuteilung der Ladungen mit entsprechender Ladeleistung zu den Zeit-Slots. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ladestation über zumindest zwei unterschiedliche Leistungsstufen zur Ladung des Fahrzeugakkus verfügt. Ist dies nicht der Fall, so wird die Ladung zwar geplant, eine Leistungsreduktion auf eine geringere Leistungsstufe zur Netzentlastung ist jedoch nicht möglich. Die Leistung könnte dann lediglich auf eine Stufe mit der Ladeleistung Null reduziert werden und die Ladung somit unterbrochen werden.

Die weitere Verarbeitung des Ladewunsches ist im unteren Abschnitt der Abbildung 4.7 dargestellt. Bei der Einteilung der Ladungen geht der Aggregator wie folgt vor. Grundsätzlich wird begonnen die Ladungen mit hoher Ladeleistung in die ggf. vorsortierten Slots einzuteilen. Ist die benötigte Energiemenge erreicht, bricht der Algorithmus ab und die Ladung ist fertig geplant. Unter bestimmten Voraussetzungen wird die Ladung jedoch mit reduzierter Ladeleistung eingeteilt.

Für eine solche Reduktion der Ladeleistung gibt es zwei Kriterien. Die Leistung wird dann reduziert, wenn

- a) die Ladung in den aktuell laufenden Zeit-Slot gelegt werden soll und die Netzreserve unter einem kritischen Level (z. B. 95 %) liegt, oder
- b) es sich um eine geplante Ladung handelt und bereits ein bestimmter Grenzwert an Ladeenergie eingeteilt wurde (z. B. wenn bereits 80 % der benötigten Ladeenergie eingeteilt sind, werden die verbleibenden 20 % mit reduzierter Ladeleistung eingeteilt).

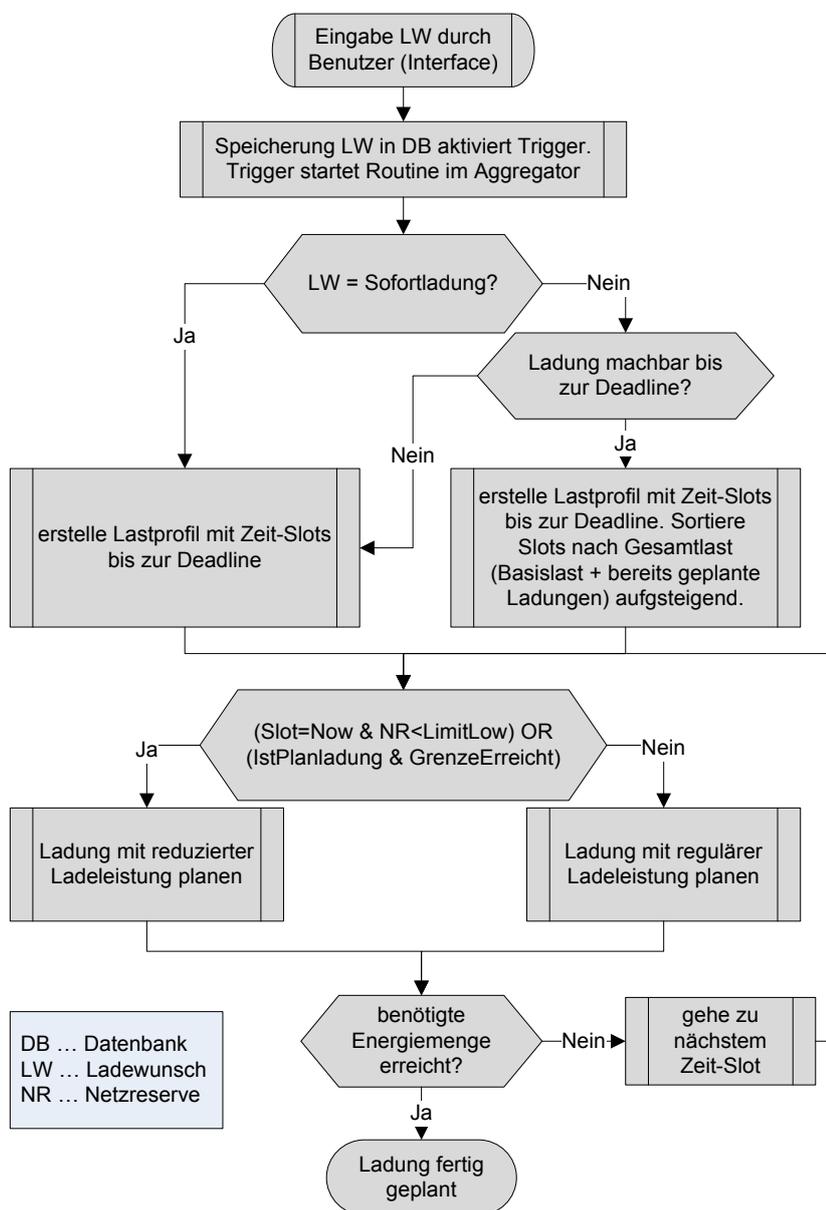


Abbildung 4.7: Algorithmus für die Verarbeitung der Ladewünsche in SDL-Notation

Nach Abschluss des in Abbildung 4.7 dargestellten Algorithmus ist die gesamte zu ladende Energiemenge auf die Zeit-Slots bis zur Deadline mit angepassten Leistungswerten aufgeteilt. Die daraus resultierenden konkreten Ladebefehle werden vom Aggregator an die Ladestationen übertragen und die Ladungen durchgeführt.

Reaktion auf Änderungen der Netzreserve

Die Netzreserve, die für eine *Location* und somit für bestimmte Ladestationen in der Datenbank gespeichert ist, repräsentiert den aktuellen Netzstatus und wird bei der Verarbeitung eines Ladewunsches im momentan aktiven Zeit-Slot berücksichtigt. Für alle anderen Slots kann dies zum Zeitpunkt der Ladungsplanung jedoch nicht berücksichtigt werden, da der Wert der Netzreserve für die in der Zukunft liegenden Zeit-Slots nicht repräsentativ ist.

Sollte sich der Netzstatus an einer *Location* ändern, so wird durch die Aktualisierung des Wertes in der Datenbank ein Trigger ausgelöst und der Aggregator reagiert auf die geänderten Werte nach dem in Abbildung 4.8 beschriebenen Algorithmus. Es handelt sich dabei also um einen reaktiven Mechanismus zur Steigerung der Netzqualität, da erst bei Überschreitung vorgegebener Grenzwerte gehandelt wird.

Der Trigger für die Aktivierung des entsprechenden Algorithmus in der MySQL-Datenbank ist in Listing 4.2 angeführt und beinhaltet, wie in Kapitel 4.2.3 bereits beschrieben, einen binären Semaphor zur Vermeidung mehrfacher, gleichzeitiger Ausführung.

```

1 DELIMITER $$
2 CREATE TRIGGER nrUpdate AFTER UPDATE ON t_locations
3 FOR EACH ROW
4 IF((SELECT conf_value FROM t_system WHERE conf_name LIKE 'AggEnabled')=0 AND
5   ((SELECT COALESCE(
6     (SELECT conf_value FROM t_system WHERE conf_name LIKE 'NR_LIMIT_LOW')
7     ,0)>NEW.lc_nres) OR
8     (SELECT COALESCE(
9       (SELECT conf_value FROM t_system WHERE conf_name LIKE 'NR_LIMIT_HIGH')
10      ,0)<NEW.lc_nres)
11   )) THEN
12   UPDATE t_system SET conf_value=1 WHERE conf_name LIKE 'AggEnabled';
13   SELECT CONCAT("LOCATION_UPDATE_",NEW.idLocation)
14   INTO OUTFILE '/opt/commands/comm';
15 END IF $$
16 DELIMITER ;

```

Listing 4.2: MySQL-Code für den Update-Trigger zur Aktivierung des Aggregators

Im Algorithmus zur Reaktion auf eine Netzreservenänderung wird unterschieden zwischen einer Über- und einer Unterbelastung des Netzes. Ist die Netzreserve geringer als ein vorgegebenes Limit „LimitLow“ (z. B. 95 %), so werden alle Ladungen gesucht welche zum aktuellen Zeitpunkt an der betroffenen *Location* aktiv sind und deren Ladeleistung reduziert werden kann. Diese werden nach deren Ladestand absteigend sortiert und anschließend ihre Ladeleistung reduziert. Bei einer zu hohen Netzreserve (größer als „LimitHigh“ – z. B. 103 %) ist die Vorgehensweise entsprechend angepasst. Es werden alle betroffenen Ladungen gesucht, deren Ladeleistung noch erhöht werden kann und diese sukzessive erhöht. Hierbei ist von Vorteil, dass bei der Ladungsplanung ab einem bestimmten Grenzwert die Ladungen nicht mehr mit voller Ladeleistung geplant werden. Dadurch ergibt sich ein Erhöhungspotential, welches im Fall einer überhöhten Netzreserve ausgenutzt werden kann.

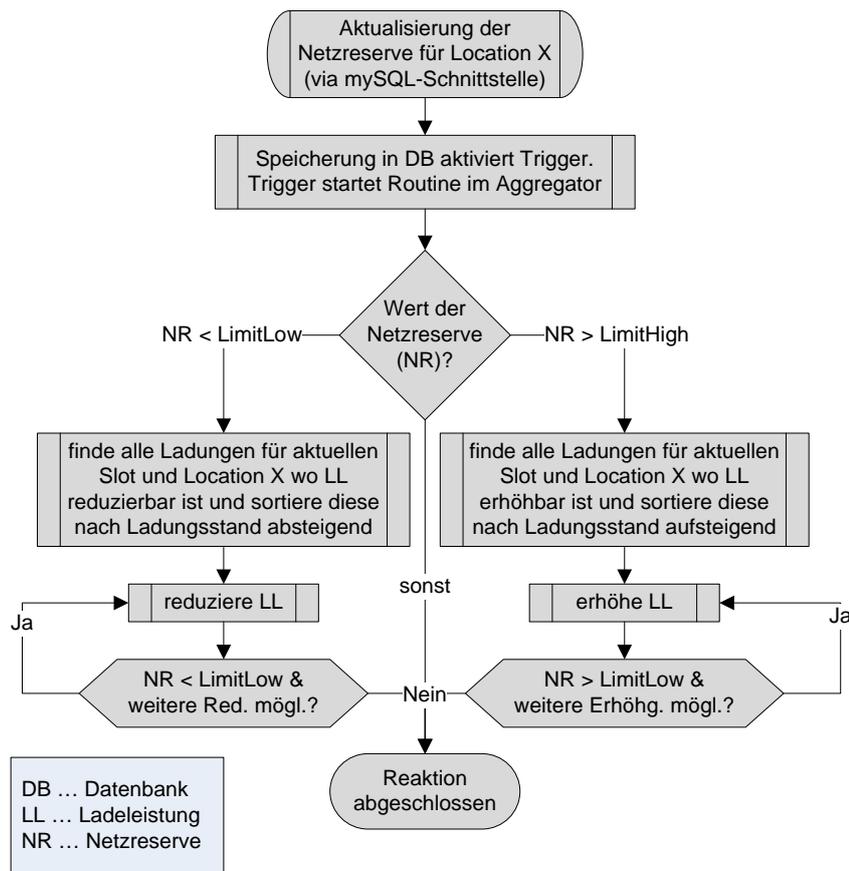


Abbildung 4.8: Algorithmus für die Reaktion auf Änderungen der Netzreserve in SDL-Notation

Da durch die Reduktion der Ladeleistung die geladene Energiemenge der geplanten Ladung ebenfalls sinkt, wird diese im Anschluss durch den in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Algorithmus wieder in die Ladungsplanung aufgenommen.

Bei der Erhöhung der Ladeleistung wird zusätzliche, ursprünglich nicht in der Ladungsplanung enthaltene Energie in den Fahrzeugakku geladen. Dies führt ggf. zu einer früheren Fertigstellung der Ladung. Ist dies der Fall, so werden auch alle noch ausstehenden Ladebefehle als abgeschlossen markiert und die Bearbeitung des Ladewunsches ist beendet.

Kommunikation

Die in den beiden vorangegangenen Abschnitten angeführten Algorithmen beschreiben die Verarbeitung der Ladewünsche und die Reaktion des Aggregators auf eine Änderung der Netzreserve. Daraus resultiert eine Menge an Befehlen für die betreffenden Ladestationen, welche bestimmten Zeit-Slots zugeordnet sind. Diese Ladebefehle enthalten genaue Informationen über den Ladezeitraum, die Ladeleistung, die betreffende Ladestation, usw.

Zur Übertragung dieser Informationen an die Ladestationen und zum Auslesen von Statusinformationen erfolgt eine regelmäßige Request-/Response-Kommunikation vom Aggregator zu den Ladestationen mittels Sockets über TCP/IP-Verbindungen.

In jeder Ladestation läuft dazu eine Server-Applikation welche auf einem bestimmten Port folgende Befehle akzeptiert und als Rückgabewert eine Sammlung von Statusinformationen sendet.

- **Befehle:**

- LADEN1!: Laden mit geringer Ladeleistung
- LADEN2!: Laden mit mittlerer Ladeleistung
- LADEN3!: Laden mit hoher Ladeleistung
- ENTLADEN!: Energie wird ins Netz zurück geliefert
- BETRIEBSZUSTAND!: fordert die Ladestation auf, ihren Zustand zu übermitteln (siehe Rückgabewerte)
- STANDBY!: versetzt die Ladestation in den Standby-Zustand (stoppt die Ladung / Entladung)

- **Rückgabewerte:**

- Ladestand: der Ladestand des Fahrzeugakkus in Prozentpunkten (0 - 100 %)
- Stationsstatus: Status der Station (LADEN1, LADEN2, LADEN3, ENTLADEN, STANDBY)
- Zählerstand: Stand des „AMIS-Zählers“ in der Ladestation
- Fehlermeldung: etwaige Fehlermeldungen der Ladestation

Durch die regelmäßige Kommunikation werden die Ladebefehle an die Stationen kommuniziert. Ist die Ladung abgeschlossen (100 % SoC erreicht), so wird der Ladebefehl als verarbeitet markiert und abgeschlossen.

Für das Aktualisieren der Lastprofile und der Netzreserven durch die Energieversorger und Netzbetreiber können einfache SQL-Befehle an die Datenbank gesendet werden. Dies hat üblicherweise über den Port 3306 nach erforderlichem Login zu erfolgen.

Der Befehl für das Aktualisieren der Netzreserve kann aus Listing 4.3 entnommen werden. Es handelt sich dabei um einen üblichen SQL-Update-Befehl.

```
1 UPDATE 'sbgag'.'t_locations'  
2 SET 'lc_nres' = '0.98'  
3 WHERE 't_locations'.'idLocation' = 1  
4 LIMIT 1;
```

Listing 4.3: MySQL-Befehl für das Aktualisieren der Netzreserve

Das Speichern eines neuen Wertes der Netzreserve einer *Location* löst den in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Trigger (siehe Listing 4.2) und den damit verbundenen Algorithmus (Abbildung 4.8) zur Verarbeitung der Netzreservenänderung aus.

Ähnlich dem SQL-Code für die Aktualisierung der Netzreserve aus Listing 4.3 ist der für das Aktualisieren der Werte der Lastprofile. Der Code aus Listing 4.4 beispielsweise aktualisiert den Lastwert 22 für die *Location* 1 auf den Wert 126 kW.

```

1 UPDATE 'sbgag'.'t_lastprofil'
2 SET 'lw_last' = '126'
3 WHERE 't_lastprofil'.'lw_nummer' = 22 AND id_location = 1
4 LIMIT 1;

```

Listing 4.4: MySQL-Befehl für das Aktualisieren der Lastprofilwerte

Der aktualisierte Wert im Lastprofil wird bei der nächsten Ladungsplanung oder Reaktion auf eine Netzreservenänderung berücksichtigt. Die beiden SQL-Codes können von berechtigten Einheiten, wie den Energieversorgern und Netzbetreibern beliebig oft aktualisiert werden. Somit ist eine Schnittstelle geschaffen um die Interessen dieser Einheiten bei der Ladungsplanung zu berücksichtigen.

4.3 Ergebnisse

Das in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene prototypische System für die koordinierte Ladung von Elektrofahrzeugen wurde einem Testlauf unterzogen, um die Funktionalität der Algorithmen und des Kommunikationssystems zu testen. Es wurde sowohl die Verarbeitung der Ladewünsche, als auch die Reaktion auf Änderungen der Netzreserve untersucht. Für die Untersuchung der Reaktion auf Netzreservenänderungen wurde ein simulierter Ladungsverlauf eines Netzabschnittes mit externer Einspeisung herangezogen.

4.3.1 Verarbeitung der Ladewünsche

Im aktuellen Kapitel wird die Vorgehensweise des Aggregators anhand dreier Demoladungen demonstriert. Das daraus resultierende Lastprofil ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Dieses Lastprofil repräsentiert die Gesamtbelastung eines Netzabschnittes mit 200 Haushalten inklusive der geplanten Belastung durch die Fahrzeugladungen und wird in Abbildung 4.10 im Messpunkt A gemessen. Die Demoladungen und die Vorgehensweise des Aggregators sind im Weiteren beschrieben:

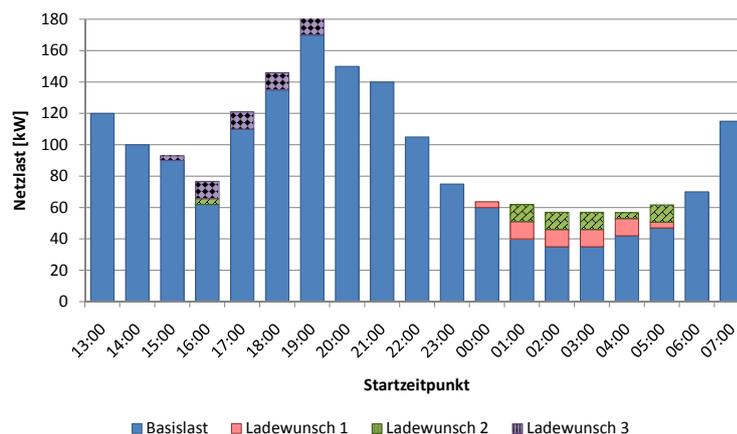


Abbildung 4.9: Basislast und resultierendes Lastprofil durch die Einteilung dreier Ladewünsche

- **Ladewunsch 1:** eingegeben um 13:10 Uhr; Solldistanz 200 km; Deadline 06:00 Uhr:
Da es sich um eine Planladung mit Deadline um 06:00 Uhr handelt, erstellt der Aggregator ein Planungslastprofil vom 13:00-Uhr-Slot bis zum 05:00-Uhr-Slot. Er sortiert die Zeit-Slots

aufsteigend nach der Gesamtbelastung (in diesem Fall nur nach der Basislast, da noch keine anderen Ladungen vorhanden sind). Aus der vorgegebenen Solldistanz von 200 km und dem Batterie-Ladestand von 0 % bestimmt der Aggregator die zu ladende Energiemenge. Zu Beginn werden die ersten 80 % der Ladung mit hoher Ladeleistung in die vorsortierten Zeit-Slots eingeteilt (02:00, 03:00, 01:00, 04:00). Anschließend geschieht die Einteilung der letzten 20 % der Ladung mit reduzierter Ladeleistung (05:00, 00:00).

- **Ladewunsch 2:** eingegeben um 13:50 Uhr; Solldistanz 200 km; Deadline 08:00 Uhr:
Da es sich um eine Planladung mit Deadline um 08:00 Uhr handelt, erstellt der Aggregator ein Planungslastprofil vom 13:00-Uhr-Slot bis zum 07:00-Uhr-Slot. Er sortiert die Slots aufsteigend nach der Gesamtbelastung (Basislast plus der bereits eingeteilten Ladungen aus Ladewunsch 1). Aus der vorgegebenen Solldistanz von 200 km und dem Batterie-Ladestand von 0 % bestimmt der Aggregator die zu ladende Energiemenge. Es werden die ersten 80 % der Ladung mit hoher Ladeleistung in die vorsortierten Slots eingeteilt (02:00, 03:00, 01:00, 05:00). Anschließend erfolgt die Einteilung der letzten 20 % der Ladung mit reduzierter Ladeleistung (04:00, 16:00).
- **Ladewunsch 3:** eingegeben um 15:10 Uhr; Solldistanz 180 km:
Der Aggregator erstellt ein Planungslastprofil beginnend mit dem 15:00-Uhr-Slot. Bei dem Ladewunsch handelt es sich um eine Sofortladung. Die Ladung soll also unmittelbar nach Eingabe des Ladewunsches (also noch im 15:00-Uhr-Slot) beginnen. Die Netzreserve für die *Location* an der sich die betreffende Ladestation befindet ist jedoch zu diesem Zeitpunkt unter dem kritischen Wert von 95 % der Nennspannung. Um das Netz nicht noch stärker zu belasten, wird die Ladung im aktuellen Slot mit reduzierter Ladeleistung eingeteilt. Der Rest der Ladung wird vorerst mit voller Ladeleistung geplant, bis die benötigte Energiemenge erreicht ist.

Bei der Verarbeitung der Ladewünsche erzeugt der Aggregator aus den Detailinformationen der Ladewünsche, den Werten für die Netzreserve und dem Lastprofil eine Menge an konkreter Ladebefehle, welche mit bestimmten Zeit-Slots in Verbindung stehen. In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der Ladungsplanung dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Koordination der Ladungen zu einem „Auffüllen“ der Täler im Tageslastprofil führt. Einzig die Sofortladungen können zu einer weiteren Erhöhung der Lastspitzen führen. Es ist daher empfehlenswert, den Anwender durch (finanzielle) Anreize dazu zu bewegen, die Ladung der Fahrzeugbatterien großteils als Planladung bis zu einer bestimmten Deadline durchführen zu lassen.

4.3.2 Reaktion auf Änderungen der Netzreserve

Nachdem die Ladungen geplant sind, werden die daraus resultierenden einzelnen Ladebefehle vom Aggregator sukzessive an die jeweiligen Ladestationen kommuniziert. Sollte jedoch aufgrund unerwarteter dezentraler Einspeisung (z. B. durch starkes Windaufkommen oder hohe Sonneneinstrahlung) eine Überspannung (d. h. aus Sicht der Ladestationen eine erhöhte Netzreserve) oder durch plötzliche starke Belastung eine Unterspannung (reduzierte Netzreserve) im Netz auftreten, so reagiert der Aggregator darauf. Mit dem in Kapitel 4.2.3 in Abbildung 4.8 beschriebenen Algorithmus veranlasst er eine Änderung der Ladeleistungen der betroffenen Ladestationen um das Netz, abhängig von der Netzreserve stärker oder geringer zu belasten.

Für die Simulation dieser reaktiven Mechanismen des Aggregators zur Spannungshaltung wurde ein Modell eines strahlenförmigen Netzabschnittes des Niederspannungsnetzes mit 50 Knoten

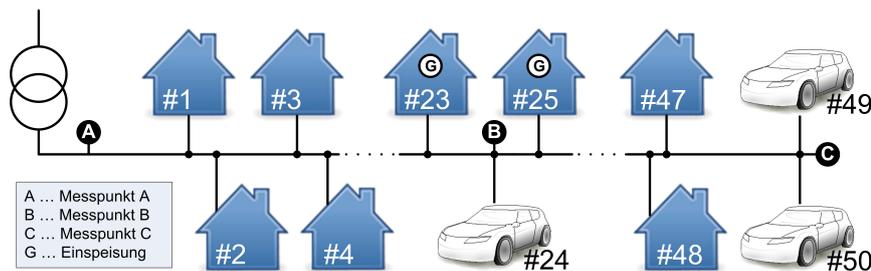


Abbildung 4.10: simulierter Abschnitt eines Niederspannungsnetzes mit 50 Knoten, dezentraler Einspeisung und drei koordinierten Ladestationen für Elektrofahrzeuge

eingesetzt, welches in Abbildung 4.10 dargestellt ist. In diesem Netzabschnitt befinden sich drei Ladestationen für Elektrofahrzeuge, sowie 47 Haushalte, zwei davon mit Blockheizkraftwerken (Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) für die Erzeugung elektrischer Energie.

Die dargestellten Spannungsverläufe wurden mittels eines, vom Institut für Computertechnik der Technischen Universität Wien entwickelten Lastfluss-simulators für strahlenförmige Niederspannungsnetze generiert. Die Simulation erfolgte auf Basis des Newton-Raphson-Verfahrens und wurde im vorliegenden Fall für ein 4-Leiter-Modell durchgeführt. Der Simulationsalgorithmus bietet ein Markov-kettenbasiertes 3-Phasen-Lastmodell für Haushalte mit der Besonderheit, dass bei der Simulation einer großen Anzahl an Haushalten im Modell tatsächlich das H0-Profil resultiert.

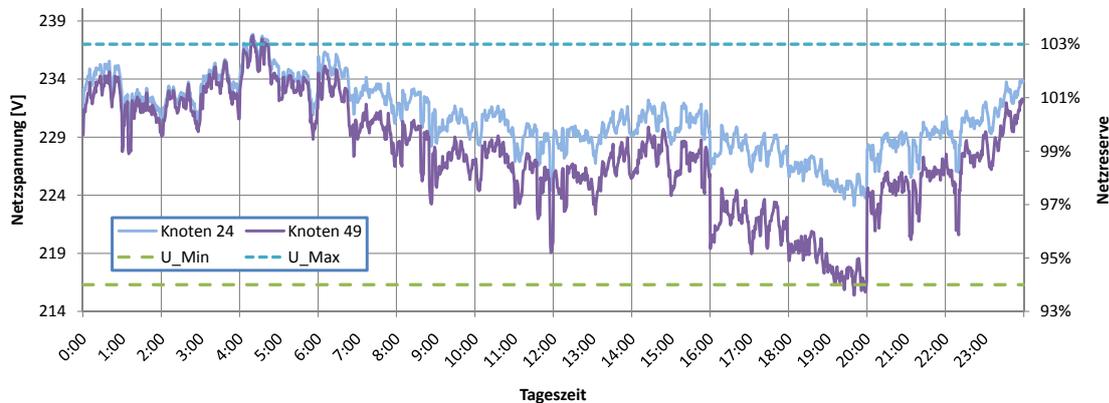


Abbildung 4.11: simulierter Spannungsverlauf eines Netzabschnittes mit dezentraler Einspeisung

In Abbildung 4.11 ist ein simulierter Spannungsverlauf des in Abbildung 4.10 dargestellten Netzabschnittes mit dezentraler Einspeisung zu sehen. Die Kurven wurden in der Mitte des Netzabschnittes bei Knoten 24 (Messpunkt B) und am Ende bei Knoten 49 (Messpunkt C) aufgenommen. Sie ergeben sich aus dem Energiekonsum der Haushalte und der in Kapitel 4.3.1 eingeteilten Fahrzeugladungen ohne den Einsatz der reaktiven Mechanismen des Aggregators. Hinzu kommt auch noch die erzeugte Energie zweier Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die in Abbildung 4.10 mit G bezeichnet wurden.

Die Spannungsverläufe beider Messpunkte übersteigen um 4:40 Uhr aufgrund der dezentralen Einspeisung den Grenzwert von 103%. Nach Übermittlung des überhöhten Wertes der Netzreserve an den Aggregator reagiert dieser auf die Änderung nach dem in Kapitel 4.2.3, Abbildung 4.8 beschriebenen Algorithmus und erhöht die Ladeleistung von Ladewunsch 2. Somit wird der Netzabschnitt stärker belastet und der Überspannung entgegengewirkt. Zum Zeitpunkt 19:45

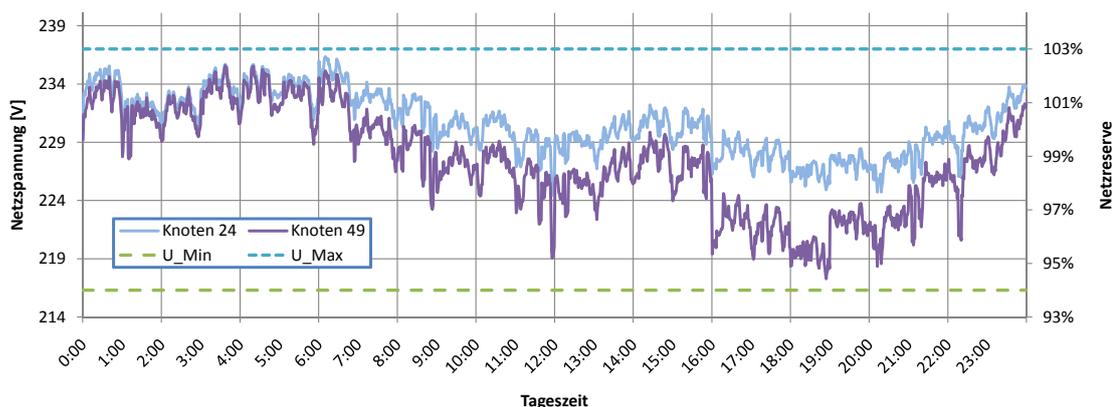


Abbildung 4.12: simulierter Spannungsverlauf eines Netzabschnittes mit dezentraler Einspeisung und Spannungshaltung durch reaktive Mechanismen des Ladesystems

wird der untere Grenzwert der Netzreserve aufgrund zu starker Belastung des Netzabschnittes unterschritten. Als Reaktion auf die Meldung der Unterschreitung reduziert der Aggregator die Ladeleistung von Ladewunsch 3 und plant die Nachladung der, durch die Reduktion verlorenen Energiemenge im nächsten freien Zeit-Slot.

Die aus diesen Reaktionen resultierende Ladungsplanung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Änderungen sind in der reduzierten Ladeleistung im 19:00-Uhr-Slot, in der erhöhten Ladeleistung im 04:00-Uhr-Slot und in der zusätzlichen Ladung im 20:00-Uhr-Slot ersichtlich. Diese stellen den Unterschied zum ursprünglich geplanten Lastgang aus Abbildung 4.9 dar. Die resultierenden Spannungsverläufe im Knoten 24 (Messpunkt B) und 49 (Messpunkt C) sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Grenzwerte der Netzreserve liegen hierbei bei 94 bzw. 103 % und sind aus [ALS09] für Niederspannungsnetze entnommen.

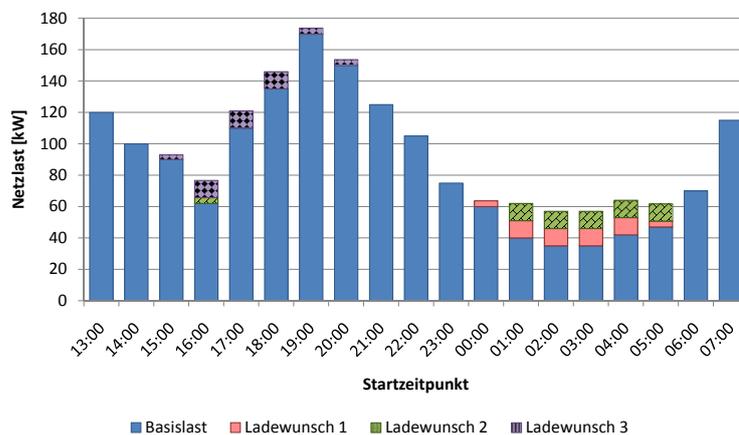


Abbildung 4.13: Basislastgang mit veränderten Ladungen aufgrund schwankender Netzreserve

Es zeigt sich, dass durch die reaktiven Algorithmen im Aggregator auf unerwartete Änderungen im Netz reagiert werden kann. Somit ist eine Vermeidung von Über- oder Unterspannungen in den Netzabschnitten und eine effektivere Nutzung alternativer, dezentraler Energiequellen möglich. Die Voraussetzung dafür ist die Verbreitung von Elektrofahrzeugen in Verbindung mit steuerbaren Ladestationen und ein, dem Energienetz überlagertes Kommunikationssystem.

5 Resümee

In den folgenden beiden Abschnitten werden die Erkenntnisse der Arbeit festgehalten und kritisch diskutiert. Durch die prototypische Implementierung wurden einige Erkenntnisse gewonnen die für einen Praxiseinsatz des Systems noch genauer untersucht werden sollten bzw. einer Verbesserung bedürfen.

5.1 Zusammenfassung

Mobilität ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sowohl die Bevölkerungsanzahl, als auch die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen je Haushalt ist stetig steigend. Ähnlich der daraus resultierenden Steigerung des Mobilitätskaufkommens entwickelt sich jedoch auch der Ölpreis, bedingt durch die Verknappung fossiler Brennstoffe und der politischen Instabilität einiger OPEC-Mitgliedsstaaten (vgl. Kapitel 1.1.1).

Um der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen als Treibstoff für unsere Mobilität und der Klimaveränderung entgegenzuwirken, kommen vermehrt Elektrofahrzeuge und Fahrzeuge mit Hybridantrieb zum Einsatz. Derzeit ist das Aufkommen elektrisch betriebener Fahrzeuge auf Österreichs Straßen zwar noch gering, Schätzungen prognostizieren jedoch bis zum Jahr 2020 einen Anstieg des Anteils der Elektrofahrzeuge auf bis zu 25 Prozent [Kor10] [Hel09].

Die Energie für das Laden der Batterien dieser Fahrzeuge kann vom österreichischen Stromnetz zwar bereitgestellt werden (+ 6,3 % Energiebedarf bei 20 % Durchdringung mit Elektrofahrzeugen; vgl. Tabelle 1.4), jedoch ergeben sich erhebliche Probleme durch die Gleichzeitigkeit des unkontrollierten Ladens. Diese Vorgänge können lokal zur Überlastung einzelner Netzabschnitte führen. Da ein Großteil der Ladungen während der Mittags- und Abendstunden erfolgen wird, werden sich die Lastspitzen zu diesen Zeitpunkten weiter erhöhen. Der starke Leistungsbedarf, welcher für die Ladungen benötigt wird, kann zu Schiefasten und Spannungsproblemen im Netz führen. Doch nicht nur der Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge, auch die dezentrale Energieerzeugung und Einspeisung aus alternativen Energiequellen, wie Sonnen- und Windkraftanlagen, führt zu steigenden Anforderungen an die Stromnetze.

Um notwendig werdende Netzausbauten vermeiden zu können und die Nutzung alternativer Energiequellen effizienter zu machen und die Verwendung dieser damit zu fördern, kommt ein System für die Koordination der Fahrzeugladung zum Einsatz. Dieses System besteht aus dem Aggregator, der die Aufgaben der Informationssammlung und -verarbeitung, sowie der Koordination der Ladungen übernimmt. Weitere Bestandteile des Systems sind die steuerbaren Ladestationen,

von denen die Elektrofahrzeuge mit Energie versorgt werden, sowie Benutzerinterfaces, mit deren Hilfe die Fahrzeughalter ihre Ladewünsche eingeben und Statusinformationen auslesen können.

Dem Kunden ist es anhand dieser Interfaces möglich, die Ladung zu steuern und seine Präferenzen an das Ladesystem zu übermitteln. Mit Hilfe des Interfaces hat der Kunde außerdem die Möglichkeit Verbrauchsstatistiken der letzten Wochen und Monate abzufragen und die konsumierten Energiemengen zu vergleichen. Die eigentliche Koordination der Ladung übernimmt der zentral betriebene Aggregator. Dieser empfängt über Schnittstellen Informationen von Energieversorgern und Netzbetreibern mit deren Hilfe er über Algorithmen die Ladung möglichst optimal plant. Die Ladung wird so geplant, dass sie sowohl zu unterschiedlichen Zeitpunkten, als auch mit unterschiedlicher Ladeleistung erfolgt und bis zu einer vom Kunden vorgegebenen Deadline abgeschlossen ist.

Zusätzlich zu dieser Ladungsplanung, die primär der Vermeidung von Lastspitzen dient, verfügt das Ladesystem auch über reaktive Mechanismen zur Vermeidung von Über- oder Unterspannungen im Verteilnetz. Wird an den Aggregator eine Verletzung vordefinierter Spannungsgrenzen gemeldet, so reduziert oder erhöht dieser die Ladeleistung der betroffenen Ladestationen und wirkt somit der Grenzwertüberschreitung entgegen.

5.2 Diskussion

Der Einsatz des koordinierten Ladesystems hat gezeigt, dass durch die vorausschauende Planung der Fahrzeugladung Lastspitzen vermieden werden können und bei Meldung von Über- oder Unterspannungen eine Reduktion bzw. Erhöhung der Belastung einer Grenzwertüberschreitung entgegengewirkt werden kann. Der effiziente Einsatz des Systems setzt jedoch voraus, dass der Kunde die Ladung seines Fahrzeugakkus durch das System planen lässt und dazu die gewünschte Distanz und die Deadline für die Ladung eingibt. Verwendet er nur die Sofortladung, so kann keine Reduktion der Lastspitzen erfolgen.

Auch die Informationen über den Netz- und Energiestatus, welche für eine erfolgreiche Ladungsplanung von essentieller Bedeutung sind, müssen von geeigneten Stellen gemessen und regelmäßig an den Aggregator übermittelt werden. Erfolgt die Messung der Netzspannung nicht, so kann auch auf etwaige kritische Änderungen nicht reagiert werden. Bei ungenauer oder falscher Messung kann sich das Verhalten des Systems sogar negativ auf die Netzqualität auswirken. Denkbar wäre, die Ladestationen technisch so auszurüsten, dass diese selbst in der Lage sind, die Netzspannung zu messen und diese an den Aggregator zu übertragen. Weitere Erkenntnisse aus der prototypischen Implementierung sind die Anforderungen an die Ladestationen für den erfolgreichen Einsatz dieser im Ladesystem.

- **Kommunikationsfähigkeit:** Die Ladestation muss in der Lage sein, Informationen über eine entsprechende Schnittstelle senden und Befehle von einer externen Einheit empfangen zu können. Außerdem ist es für eine genaue Ladungsplanung nötig, Informationen wie den State of Charge o. Ä. aus dem Fahrzeug auslesen zu können.
- **Energiezählung:** Für die Abrechnung und eine genaue Ladungsplanung bedarf es einer internen Zählung der geladenen und ggf. auch der in das Netz zurück gespeisten Energiemenge.
- **Steuerbarkeit:** Die Ladung muss durch externe Befehle jederzeit gestartet und gestoppt werden können. Zusätzlich ist die Variation der Ladeleistung für die Reaktion auf die Netzreservenänderung vorteilhaft.

Diese Voraussetzungen wurden von den eingesetzten Ladestationen noch nicht vollständig erfüllt. In dem Fall, dass die Kommunikation zum Fahrzeug nicht möglich ist, muss der Ladestand der Batterien bei der Ladungsplanung mit Null angenommen werden. Dies führt zur Planung einer zu großen Energiemenge. Durch die damit verbundene vorzeitige Fertigstellung der Ladung werden die noch verbliebenen Ladebefehle zwar abgebrochen, die prognostizierte Gesamtbelastung des jeweiligen Netzabschnittes wird jedoch durch diese Vorgehensweise verfälscht und die Planung der anderen Ladungen kann dadurch nicht optimal durchgeführt werden.

Die Ladewünsche werden im Aggregator sofort nach deren Einlangen verarbeitet. Die Informationen werden folglich nach dem „first come, first served“-Prinzip behandelt. Eine Vergabe von Prioritäten für Nutzergruppen ist nicht möglich. Es ist daher auch nicht festgelegt, welche Ladestationen bei einer Unterschreitung der Netzreserve zuerst ihre Ladeleistungen reduzieren bzw. abgeschaltet werden. Aus diesem Grund kann es beispielsweise vorkommen, dass durch hohe Netzbelastung die Ladeleistung der Fahrzeugladung eines Arztes reduziert wird und darum dessen Ladung bis zur Deadline nicht fertig gestellt wird, während die Batterien des Drittwagens des Nachbarn voll beladen werden. Als Erweiterung des Systems wäre somit die Einführung eines Prioritätensystems und der Ersatz des „first come, first served“-Algorithmus durch einen dauerhaft regelnden Algorithmus, welcher auch später eintreffende Ladewünsche mit hoher Priorität vor reiht, vorteilhaft.

Der Algorithmus des Aggregators, der die Reaktion auf die Verletzung der Spannungsgrenzwerte behandelt, beinhaltet momentan keinerlei Mechanismen für die Vermeidung von instabilem Verhalten. Es kann daher vorkommen, dass bei Überschreitung der Grenzwerte die Leistung der Ladestationen reduziert wird. Folgt aus dieser Reduktion eine Überspannung am betreffenden Netzabschnitt, so reagiert der Aggregator abermals und erhöht die Ladeleistung der Ladestation wieder. Im schlimmsten Fall entsteht somit instabiles Verhalten und die Leistungen der Ladestationen springen dauerhaft zwischen zwei Pegeln. Es wäre daher eine Erweiterung des Algorithmus für die Vermeidung solch instabilen Verhaltens empfehlenswert.

Die Übertragung der Daten zwischen dem Interface, den Ladestationen und dem Aggregator erfolgt über TCP/IP-Verbindungen im Klartext, z. B. über das HTTP-Protokoll. Bei Angriffen auf die Netzwerkverbindung könnten Daten ausgespäht werden bzw. durch sgn. „man-in-the-middle“-Angriffe auch verändert und z. B. gefälschte Ladebefehle oder Zählerdaten übermittelt werden. Für die Vermeidung solcher Angriffe sollte die Datenübertragung über gesicherte Verbindungen z. B. mittels HTTPS erfolgen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verbindung der Ladestationen und Interfaces mittels eines virtuellen, privaten Netzwerkes (VPN) und die damit verbundene Verwendung der Verschlüsselungsmethoden des VPNs für eine Absicherung der Datenkommunikation.

Durch den zentralen Einsatz des Aggregators entsteht ein sgn. „single point of failure“. D. h. für den Fall, dass der Aggregator ausfällt, ist das gesamte Ladesystem nicht mehr betriebsbereit. Die laufenden Ladungen bleiben zwar erhalten, jedoch können keine neuen Ladewünsche mehr verarbeitet werden und auch die reaktiven Mechanismen für die Behandlung kritischer Änderungen der Netzreserve sind nicht mehr aktiv. Eine Alternative zum zentralen Einsatz des Aggregators wäre das Ladesystem als dezentrales Agentensystem aufzubauen. Hierbei stellt jede Ladestation einen Agenten dar, welcher mit den anderen kommuniziert um die Ladungen zu koordinieren. Bei einem solchen verteilten System steigen zwar die Anforderungen an die Ladestationen, jedoch entfällt die Gefahr eines Totalausfalls des Systems durch Fehler im Aggregator.

5.3 Resümee

Die prototypische Realisierung des Ladesystems hat gezeigt, dass durch den Einsatz eines dem Energienetz überlagerten Kommunikationssystems und der darauf aufbauenden Koordination der Fahrzeugladung eine Erhöhung der Lastspitzen großteils vermieden werden kann. Der aus den Algorithmen des Aggregators resultierende Lastgang, der in Abbildung 4.13 in Kapitel 4.3 dargestellt und beschrieben ist, zeigt sehr gut die angestrebte Verschiebung der Spitzenlast auf die Niederlastzeiten und deckt sich nahezu mit den Vorgaben der Aufgabenstellung (vgl. Kapitel 2.3.2, Abbildung 2.9(b) auf Seite 24). Einzig durch Sofortladungen bzw. bei Ladungen mit sehr kurzfristigen Deadlines ist eine weitere Erhöhung der Lastspitzen unvermeidbar.

Auch die Funktion des Aggregators auf Über- und Unterspannungen in den einzelnen Netzabschnitten zu reagieren und die Belastung dieser anzupassen stellt eine effiziente Möglichkeit zur Haltung der Netzspannung dar. Insbesondere angesichts der zukünftig nötig werdenden umfangreichen Integration erneuerbarer Energiequellen in Österreichs Stromnetze bietet die Funktion der reaktiven Netzbe- und entlastung eine hervorragende Möglichkeit um auf die fluktuierende Einspeisung durch solche Energieerzeuger reagieren zu können.

Bevor eine großflächige, hersteller- und länderübergreifende Koordination der Ladungen von Elektrofahrzeugen realisiert werden kann, muss jedoch noch eine Menge an Arbeit, besonders in die Vereinheitlichung der Systeme und in die Normierung der Schnittstellen und Kommunikation investiert werden. Die momentan existierenden Ladesysteme arbeiten mit proprietären Kommunikations- und Verwaltungssystemen. Einzig der letzte Abschnitt der Ladung, also von der Ladestation zum Fahrzeug, verfügt über konkrete, angewandte Normen.

Auch die Technologie der Elektrofahrzeuge muss für deren nahtlose Integration in das System noch erweitert und angepasst werden. Insbesondere die Kommunikationsmöglichkeiten zum Batteriemanagementsystem für das Auslesen relevanter Informationen, wie dem State of Charge ist eine zentrale Anforderung an die Fahrzeughersteller. Der Einsatz eines Interfaces auf mobilen Geräten macht die Steuerung der Ladung und das Auslesen von Statusinformationen für den Kunden sehr komfortabel. Aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Smartphones gewinnt diese Art der Bedienung zunehmend an Bedeutung.

In Zukunft wäre die Erweiterung des Ladesystems zu einem allgemeinen Energiemanagementsystem empfehlenswert, im Zuge dessen nicht nur der Energiekonsum geregelt wird, sondern auch Energie aus dem Fahrzeugakku in das Stromnetz geliefert werden kann. Die Fahrzeugbatterien würden dabei einen großen, verteilten Energiespeicher darstellen. Eine solche Integration der Fahrzeugbatterien in das Smart Grid brächte Vorteile für die Integration alternativer Energiequellen mit sich und könnte zur Stabilisierung der Netze beitragen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Überlagerung des Energienetzes mit einem Kommunikationssystem eine Menge neuer Möglichkeiten und Vorteile mit sich bringt. Diese Möglichkeiten gilt es zu nutzen um den steigenden Anforderungen an das Energienetz, bedingt durch den Einsatz von verteilten Energiequellen und der Zunahme der Elektromobilität, Herr zu werden.

Wissenschaftliche Literatur

- [AG03] ALLABY, M. ; GARRATT, R.: *Fog, smog, and poisoned rain*. Facts On File, 2003 (Dangerous weather). – ISBN 9780816047895
- [ALS09] ABART, Andreas ; LUGMAIR, Andreas ; SCHENK, Alexander: Smart metering features for managing low voltage distribution grids. In: *Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on*, 2009. – ISSN 0537-9989, S. 1 –4
- [Amo99] AMOCO, BP: *Statistical review of world energy*. BP., 1999
- [Büh10] BÜHLER, T.: *Biokraftstoffe der ersten und zweiten Generation: Eine umwelt- und innovationsökonomische Potentialanalyse*. Diplomica Verlag, 2010 (Reihe Nachhaltigkeit). – ISBN 9783836682053
- [BL08] BRAUNER, G. ; LEITINGER, C.: Nachhaltige Energiebereitstellung für elektrische Mobilität. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 125 (2008), S. 387–392. – ISSN 0932-383X
- [Bra08] BRAUNER, G.: Infrastrukturen der Elektromobilität. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 125 (2008), S. 382–386. – 10.1007/s00502-008-0585-1. – ISSN 0932-383X
- [Bra09] BRAKE, M.: *Mobilität im regenerativen Zeitalter: Was bewegt uns nach dem Öl?* Heise, 2009. – ISBN 9783936931617
- [DKW11] DALLINGER, D. ; KRAMPE, D. ; WIETSCHER, M.: Vehicle-to-Grid Regulation Reserves Based on a Dynamic Simulation of Mobility Behavior. In: *Smart Grid, IEEE Transactions on* 2 (2011), June, Nr. 2, S. 302 –313. – ISSN 1949-3053
- [EM07] ENSTE, U. ; MÜLLER, J.: *Datenkommunikation in der Prozessindustrie: Darstellung und anwendungsorientierte Analyse*. Oldenbourg Industrieverlag, 2007. – ISBN 9783835631168
- [FLNS10] FERREIRA, H.C. ; LAMPE, L. ; NEWBURY, J. ; SWART, T.G.: *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications Over Power Lines*. John Wiley & Sons, 2010. – ISBN 9780470740309
- [Fre09] FREUDENTHALER, K.: *Der CO₂-Emissionshandel: Bedeutung für die Gesamtwirtschaft und für einzelne Unternehmen*. Diplomica Verlag, 2009. – ISBN 9783836652285
- [GJ10] GLANZ, A. ; JUNG, O.: *Machine-to-machine-kommunikation*. Campus Verlag GmbH, 2010. – ISBN 9783593392240
- [GRR06] GUGELE, B. ; RIGLER, E. ; RITTER, M.: *Kyoto-Fortschrittsbericht Österreich 1990-2004*. Umweltbundesamt, 2006
- [Hel09] HELMERS, E.: *Bitte Wenden Sie Jetzt: Das Auto Der Zukunft*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2009 (Erlebnis Wissenschaft Series). – ISBN 9783527326488
- [Hos08] HOSBACH, S.: *Vergleich aktueller Authentifizierungsverfahren und deren Bewertung*. GRIN Verlag GmbH, 2008. – ISBN 9783638942904

- [HS05] HOMPEL, M.T. ; SCHMIDT, T.: *Warehouse management: automatisierung und organisation von lager- und kommissioniersystemen zweite*. Springer, 2005 (VDI-Buch). – ISBN 9783540225096
- [IEC09] IEC60038, International Electrotechnical Commission T. *IEC standard voltages*. 06-2009
- [JWM09] JAHANKHANI, H. ; WATSON, D.L. ; ME, G.: *Handbook of Electronic Security and Digital Forensics*. World Scientific Pub Co Inc, 2009. – ISBN 9789812837035
- [KBG⁺11] KUPZOG, F. ; BACHER, H. J. ; GLATZ, M. ; PRÜGGLER, W. ; ADEGBITE, A. ; KIENESBERGER, G.: Architectural options for vehicle to grid communication. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 128 (2011), S. 47–52. – 10.1007/s00502-011-0796-8. – ISSN 0932–383X
- [Kel11] KELLER, A.: *Breitbandkabel Und Zugangsnetze: Technische Grundlagen Und Standards*. Springer, 2011. – ISBN 9783642176302
- [KMS10] KAMACHI, M. ; MIYAMOTO, H. ; SANO, Y.: Development of power management system for electric vehicle i-MiEV. In: *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, S. 2949–2955
- [Kor10] KORTHAUER, Reiner: *Handbuch Elektromobilität*. EW Medien und Kongress GmbH, 2010. – ISBN 9783802209765
- [KSWH10] KÄBISCH, S. ; SCHMITT, A. ; WINTER, M. ; HEUER, J.: Interconnections and Communications of Electric Vehicles and Smart Grids. In: *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, 2010, S. 161–166
- [LAS07] LABIOD, H. ; AFIFI, H. ; SANTIS, C.D.: *Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and WiMAX*. Springer, 2007. – ISBN 9781402053962
- [Lit09] LITZLBAUER, M.: Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher mit MATLAB / Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - TU Wien. 2009. – Forschungsbericht
- [LL10] LEITINGER, C. ; LITZLBAUER, M.: AP4-Endbericht aus ADRES Concept - Effizienter Energiebedarf für regenerative Mobilität / Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - TU Wien. 2010. – Forschungsbericht
- [Nau11] NAUCK, Enrico: *Betrachtungen der Informationssicherheit von Smart-Grids am Beispiel der Elektromobilität*. Senftenberg, Hochschule Lausitz, Masterthesis, 8/2011
- [Pre09] PREVEZANOS, C.: *Jetzt lerne ich HTML*. Markt + Technik Verlag, 2009 (Safari Books Online). – ISBN 9783827244383
- [PS08] PLASSMANN, W. ; SCHULZ, D.: *Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. – ISBN 9783834804709
- [PWL10] PÖTSCH, F. ; WINTER, R. ; LICHTBLAU, G.: *Elektromobilität in Österreich - Szenario 2020 und 2050*. Umweltbundesamt GmbH, 2010
- [Qua08] QUASCHNING, V.: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz : Hintergründe - Techniken - Anlagenplanung - Wirtschaftlichkeit*. Hanser, 2008. – ISBN 9783446414440
- [Rs09] REGNER, K. ; ÖSTERREICH, Verkehrsclub: *Potenziale von Elektro-Mobilität*. VCÖ, 2009 (Mobilität mit Zukunft). – ISBN 9783901204616
- [S⁺11] SCHABAUER, D. [u. a.]: Vehicle Grid - Integration of low emission vehicles into the electric distribution grid. (2011)
- [SA10] SALZBURG-AG, KIAL: *Benutzerhandbuch ELIS*. internes, nicht publiziertes Dokument, 2010
- [Sch04] SCHWARZ, K.: *Offene Kommunikation nach IEC 61850 für die Schutz- und Stationsleittechnik*. VDE-Verl., 2004 (Etz-Report). – ISBN 9783800727889
- [ÖVE06] ÖVE. *ÖVE/ÖNORM E 1100-2 - Normspannungen Teil 2: Nennspannungen für Niederspannungs-Stromverteilungssysteme*. 2006

Internet-Referenzen

- [1] CHAdeMO Association. *DC Schnell-Ladestandard*, 2010.
http://chademo.com/pdf/CHAdeMOleaflet_eCarTec2010.pdf.
- [2] comScore Inc. *comScore Reports January 2011 U.S. Mobile Subscriber Market Share*, 2011.
http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/3/comScore_Reports_January_2011_U.S._Mobile_Subscriber_Market_Share.
- [3] European Automobile Manufacturers Association. *The Automobile Industry Pocket Guide*, 2008.
http://www.acea.be/images/uploads/files/20081003_Pocket_Guide.pdf.
- [4] European Automobile Manufacturers Association. *The Automobile Industry Pocket Guide*, 2010.
http://www.acea.be/images/uploads/files/2010924_Pocket_Guide_2nd_edition.pdf.
- [5] everynear. *everynear - Energie ganz nahe*, 2011. <http://everynear.eu>.
- [6] heise open - Das Open-Source-Ressort von c't. *Trendstudie Open Source von Dr. Oliver Diedrich*, 2009.
<http://www.heise.de/open/artikel/Trendstudie-Open-Source-221696.html>.
- [7] IEC - International Electrotechnical Commission. *International Standard IEC 62196-1 Part 1: Charging of electric vehicles up to 250 A a.c. and 400 A d.c.*, 2003.
http://webstore.iec.ch/preview/info_iec62196-1%7Bed1.0%7Den.pdf.
- [8] IEC - International Electrotechnical Commission. *IEC - Newslog - 2011-02-03: A step forward for global EV roll-out*, 2011. <http://www.iec.ch/newslog/2011/nr0411.htm>.
- [9] IEC - International Electrotechnical Commission. *Peter Van den Bossche: Defining and Developing Standards*, 2011. http://www.ecs-five.ch/parkcharge/documents/P_Van_den_Bossche1.pdf.
- [10] Klima- und Energiefonds. *Presseaussendung: Erste Elektroautos ab sofort in Salzburg - Monatliches Sorglospaket zum Fixpreis*, 2010. <http://www.salzburg-ag.at/infomenu/presse/presseaussendungen/presse/article/erste-elektroautos-ab-sofort-in-salzburg-836/>.
- [11] Klima- und Energiefonds. *E-Mobilitätsmodellregion VLOTTE*, 2011.
http://www.e-connected.at/userfiles/2011-01%20KeyFacts_Vlotte_final%281%29.pdf.
- [12] RWE - Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG. *RWE - Smart Station - Die für Sie passende Lösung für öffentlichen Infrastrukturaufbau*, 2011. <http://www.rwe-mobility.com/web/cms/mediablob/de/587890/data/331904/1/rwemobility/produkte/smart-station/RWE-Smart-Station.pdf>.
- [13] Schneider Electric SA. *EV Plug Alliance announces availability of products and new members*, 2010.
http://www2.schneider-electric.com/corporate/en/press-releases/viewer-press-releases.page?c_filepath=/templatedata/Content/Press_Release/data/en/shared/2010/09/20100920_ev_plug_alliance_announces_availability_of_products_and_new_members.xml.
- [14] SMMT - Society of Motor Manufacturers and Traders Limited. *Report on the Current Situation and Future Direction of Electric Vehicle Charger Standards*, 2010.
<http://www.cars21.com/files/papers/smmt-ev-standardisation.pdf>.

- [15] SnippetSpace. *SnippetSpace Web design tools and iWebKit iPhone website framework*, 2011. <http://snippetspace.com/>.
- [16] Statistic Austria. *NAMEA - National Accounting Matrix including Environmental Accounts*, 2011. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/umwelt/namea/index.html.
- [17] Statistic Austria. *Weltbevölkerung 1950 bis 2050 nach Weltregionen*, 2011. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/bevoelkerung/internationale_uebersich/036446.html.
- [18] TEPCO - Tokyo Electric Power Company. *Desirable characteristics of public quick charger - Takafumi Anegawa*, 2011. http://www.emc-mec.ca/pehv/Presentations_en/S12/PHEV09-S12-3_TakafumiAnegawa.pdf.
- [19] US Energy Information Administration - Independent Statistics and Analysis. *U.S. Crude Oil First Purchase Price (US-Dollar per Barrel)*, 2010. http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=F000000__3&f=A.
- [20] VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. *VDE-AR-E 2623-2-2 Plugs, socket-outlets, vehicles*, 2011. <http://www.vde.com/en/dke/std/VDEapplicationguides/Publications/Pages/VDE-AR-E2623-2-2.aspx>.
- [21] Welt-in-Zahlen. *Ländervergleich*, 2011. <http://www.welt-in-zahlen.de/laendervergleich.phtml>.
- [22] Wien Energie AG. *Neue Stromtankstellen*, 2010. http://www.vipress.at/index.php?id=614&meldung_uid=1433&cHash=cf6e245677.
- [23] www.rgraph.net. *RGraph: Javascript charts and HTML5 charts*, 2011. <http://www.rgraph.net/>.