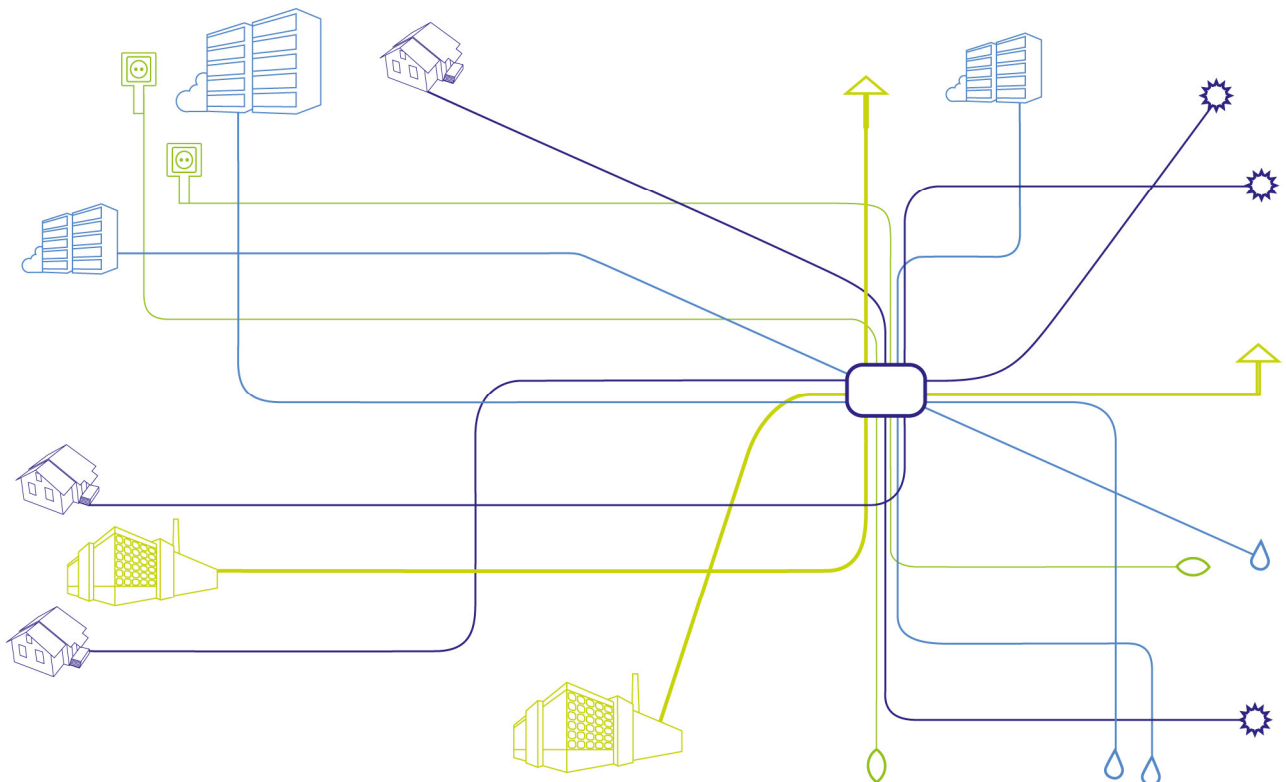




ZENEM

Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

ZENEM

Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität

Autoren:

Technische Universität Wien – Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

DI Markus Litzlbauer

Dr.techn. Andreas Schuster

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DI Hannes Koller

DI(FH) Martin Reinthaler, MSc

Taxi 31300 VermittlungsgmbH:

Nikolaus Norman

Martin Waldbauer

Wien Energie Stromnetz GmbH:

DDI Andreas Bolzer

DI Mario Leitner

Kurzfassung

Zukünftige Stromnetze werden mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Verantwortlich dafür sind u. a. zusätzliche Verbraucher, zu denen auch elektrisch betriebene Fahrzeuge gehören. Diese besitzen eine höhere Effizienz verglichen mit konventionellen PKW und verringern den Energiebedarf sowie Treibhausgasemissionen. Ohne Elektrifizierung des Antriebsstrangs können die hochgesteckten Klimaziele und vorgeschriebenen CO₂-Grenzen im Sektor Verkehr nicht erreicht und die österreichische Ölimportabhängigkeit nicht minimiert werden. Um die Auswirkungen einer hohen Durchdringung von Elektrofahrzeugen auf das Stromnetz zu untersuchen, wird im Projekt ZENEM die Umstellung einer gesamten Funktaxiflotte auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge inkl. Ladestelleninfrastruktur näher analysiert.

Für Zwecke der Vermittlung sind die Funktaxis der betrachteten Wiener Flotte bereits seit 2006 mit GPS-Sendern ausgestattet. Aus den übermittelten GPS-Daten werden die verkehrsrelevanten Merkmale extrahiert und die Anwendbarkeit der Taxistandplätze als Standorte für Ladestationen geprüft. Mittels der drei zu variierenden Parameter „Batteriekapazität“, „Ladeleistung“ und „Ladestellenausbau“ werden verschiedene Szenarien definiert, welche in den anschließenden Analysen unter Zuhilfenahme von Netzrechnungs- und Mathematiksoftware untersucht werden. Die Grundvoraussetzung für die weitere Betrachtung ist die Erfüllung der Mobilitätsanforderungen an die betrachteten Taxis. Im ersten Schritt wird keine Veränderung des derzeitigen Funktaxibetriebes angenommen. Darauf aufbauend werden die szenarienabhängigen, an den Taxistandplätzen auftretenden Summenladeprofile ermittelt und die Niederspannungsnetze in Hinsicht auf Spannungshaltung und Strombegrenzung simuliert. Um qualitativ richtige Aussagen treffen zu können, wird vorher der derzeitige Verbrauch von Haushalten und Gewerbe an diesen Standorten durch Langzeitleistungsmessungen bestimmt.

Mittels vereinfachter thermischer Modelle werden kurzzeitige Überlastungen der elektrischen Netzkomponenten berücksichtigt. Diese temporären Überbelastungen ermöglichen die Versorgung einer starken Ladedurchdringung mit minimalem Netzausbau und können akzeptiert werden, solange die negativen Auswirkungen auf die einzelnen Komponenten vernachlässigbar sind.

Erreichen die Netzbelastungen ein untragbares Ausmaß, so werden netzorientierte Ladestrategien entwickelt, welche die Übertragung nachhaltig ermöglichen. In Folge muss wieder überprüft werden, ob die Mobilitätsbedürfnisse, trotz Änderung der Ladevorgänge, weiterhin im gleichen Maße erfüllt bleiben.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projekts ZENEM sollen dem Netzbetreiber einen minimalen Netzausbau trotz Ladeinfrastruktur ermöglichen und den Unternehmen des Taxigewerbes als Impulsgeber dienen, um mit vermindertem Risiko auf Elektromobilität umzusteigen. Durch den abschließenden Workshop zum Thema ökologische und ökonomische Aspekte und Rahmenbedingungen mit Experten aus Energie, Verkehr und Politik können weiterführende Realisierungsvorhaben nahtlos anschließen.

Abstract

The future electricity grid will be confronted with new challenges. One challenge are additional loads by electrical consumers such as electric vehicles. But on the other side electric vehicles offer higher energy efficiency and have the potential to reduce greenhouse gas emissions. Without electrification of the whole power train the ambitious climate goals cannot be achieved and the Austrian oil import dependence in the transportation sector cannot be reduced.

In the project ZENEM, the impact of a high penetration of electric vehicles on the distribution grid including charging station infrastructure is analyzed under the assumption that a whole Viennese taxi fleet is operated with electric cars.

Since 2006, the observed taxi fleet is equipped with GPS devices for purposes of operation and routing. From this GPS data the relevant transport characteristics are extracted and the feasibility of taxi ranks as locations for charging infrastructure will be examined. By the means of three selectable parameters "battery capacity", "charging power" and "charging stations expansion", various scenarios are defined, which are examined in subsequent analyses using load flow and mathematics software.

The basic requirement for the further considerations is the fulfillment of the mobility needs of taxis. Based on these necessities and frameworks the additional charging profiles at the taxi ranks with charging infrastructure are calculated and the impact on the distribution grids related to voltage stability and overloads is investigated. In order to make a qualitative statement, the current household and commercial electricity loads are identified through long-term measurements.

By using simplified thermal models a temporary overloading of electrical grid components is considered. These temporary overloads allow the supply of a strong electric taxi penetration requiring minimal grid expansion and may be acceptable if the effects on the individual components are negligible.

If the overloads for the electric distribution grid cannot be tolerated, grid oriented charging strategies are developed in order to avoid grid extension. As a consequence, it must be shown that the adapted charging profiles do not negatively impact the fulfillment of the mobility needs.

The results and knowledge of the project ZENEM allow the distribution grid operator to avoid unnecessary expansion of grid infrastructure. In the last phase of the project, a workshop was held on the ecological and economic aspects and frameworks with experts from the energy, transportation and political sector.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Zielsetzungen und Schwerpunkte des Projektes	7
1.2 Aufbau und Methodik des Projektes	8
1.3 Einordnung in das Programm	10
2 Inhaltliche Darstellung	12
2.1 Datengrundlage	12
2.1.1 Mobilität des derzeitigen Funktaxibetriebs	13
2.1.2 Elektrische Komponenten und Verbraucher der betrachteten Niederspannungsnetze	21
2.2 Erfüllungsszenarien	26
2.2.1 Szenarienentwicklung	26
2.2.2 Szenarienauswahl	31
2.2.3 Summenladeprofile	33
2.3 Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz	35
2.3.1 Netzbelastungen und Spannungsverhältnisse	35
2.3.2 Thermische Modellierung	41
2.3.3 Ladesteuerung	43
2.4 Rahmenbedingungen	44
2.4.1 Ökologische Aspekte	44
2.4.2 Ökonomische Aspekte	47
2.4.3 Politische und Bauliche Rahmenbedingungen	49
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	52
4 Ausblick und Empfehlungen	56
5 Literaturverzeichnis	57
6 Anhang	60
6.1 Abkürzungen	60
6.2 Ergänzende Abbildungen	61
7 Kontaktdaten	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung

Entsprechend dem IPCC Bericht [Bern07] besteht die Notwendigkeit, die CO₂-Emissionen bis 2050 um 50 bis 80 % gegenüber dem Basiswert vom Jahr 2000 zu reduzieren, um eine Stabilisierung des Klimawandels bei 2 °C zu erzielen. Dabei erzeugt der Verkehr in Österreich mehr als ein Viertel der hiesigen Treibhausgasemissionen [Ande10]. Zusätzlich ergeben sich weitere Problematiken durch die weltweite Erdölverknappung und den damit verbunden Preisanstieg, welcher den Verkehrssektor besonders stark trifft.

Die beste und nachhaltigste Methode, die oben beschriebenen Probleme zu lösen, ist die Verkehrsvermeidung bzw. der Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel. Dabei besitzt der im Projekt ZENEM betrachtete Taxiverkehr eine Sonderstellung, da er sowohl öffentlichen als auch individuellen Charakter aufweist und das Taxi somit eine notwendige Ergänzung des Mobilitätsangebots darstellt. Die Fahrten des Taxiverkehrs treten vorwiegend in Großstädten, einschließlich der suburbanen Randbezirke auf. Dort könnten durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen lokal Lärm sowie Treibhausgasemissionen verringert werden.

Zukünftige E-Taxis konfrontieren andererseits jedoch die elektrischen Stromnetze, vor allem im Niederspannungsbereich, mit neuen Herausforderungen. Um die Auswirkungen einer hohen Durchdringung von elektrisch angetriebenen Taxis auf das Stromnetz zu untersuchen, wird im Projekt ZENEM die Umstellung einer gesamten Funktaxiflotte auf Elektrofahrzeuge inklusive Ladestelleninfrastruktur näher analysiert.

1.1 Zielsetzungen und Schwerpunkte des Projektes

Die Anforderungen an Taxi-Fahrzeuge sind bedingt durch die große Kilometerleistungen und der ausgehenden Betriebsdauern sehr hoch. Beim Umstieg auf rein elektrisch betriebene Taxis und der Nutzung der limitierten Stehzeiten zum Laden an den vorhandenen Taxistandplätzen ist mit hohen Ladeleistungen je Fahrzeug zu rechnen und Ladesteuerungen können nur im reduzierten Ausmaß angewendet werden. Elektrotaxis verursachen dadurch punktuell an den Ladestationen der Taxistandplätze große Leistungsdichten und können im ungesteuerten Fall die Netzkomponenten der Niederspannungsnetze überlasten. Deshalb werden im Projekt ZENEM die Auswirkungen von rein elektrisch betriebenen Funktaxis auf das Wiener Stromnetz umfassend untersucht.

Dazu werden folgende Teilziele für das Projekt ZENEM formuliert [Schu12]:

- Erstellung der Trajektorien aus aufgenommen GPS-Rohdaten der Vermittlungsgesellschaft Taxi 31300. Daraus werden die Standort- und Standzeitverteilungen extrahiert und der Energiebedarf der betrachteten Funktaxiflotte an ausgewählten Taxistandplätzen berechnet.
- Analyse der bestehenden elektrischen Verbraucher (private Haushalte und Gewerbe) ausgewählter Energienetzbereiche (Niederspannungsebene), in denen Ladestationen der Elektrotaxis modellhaft eingebunden werden. Dabei werden die Leistungsprofile und die dazugehörigen Jah-

resstromverbräuche der bereits im Netz vorhandenen Verbraucher erhoben und diese mittels Langzeitmessungen validiert, um die freien Netzkapazitäten für die Elektromobilität zu erkennen.

- Definition von Szenarien, in denen verschiedene Ladestrategien (gesteuertes und ungesteuertes Laden), Ladeleistungen (Normal- bis Schnellladen) und Ausbaustufen der Ladestelleninfrastruktur berücksichtigt werden, um zu ermitteln, welche Ladeleistungsprofile an den Ladestationen entstehen und in welchen Szenarien eine Durchführbarkeit mit elektrisch betriebenen Taxis möglich wäre.
- Betrachtung der notwendigen Netzintegration und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Netzstabilität und thermischen Belastungen der Niederspannungsebene. Einerseits wird mittels Berechnung der Lastflüsse die Auslastung der Niederspannungsnetzabschnitte in den definierten Szenarien ermittelt. Andererseits soll mit Zuhilfenahme vereinfachter thermischer Modelle das transient thermische Verhalten der relevanten Netzkomponenten simuliert werden.
- Analyse der umweltrelevanten und wirtschaftlichen Gesichtspunkte der Umsetzung von elektrisch angetriebenen Taxis. Dabei soll auf das Potenzial der CO₂-Reduktion für die Region Wien eingegangen und eine Abschätzung der auftretenden Kosten vorgenommen werden. Weiters werden die derzeitigen politischen und baulichen Rahmenbedingungen für einen Umstieg auf elektrisch angetriebene Taxis recherchiert und in einem gemeinsamen Workshop diskutiert.

1.2 Aufbau und Methodik des Projektes

Damit Aussagen über den Energie- und Leistungsbedarf von zukünftigen elektrischen Funktaxis getroffen werden können, muss das Mobilitätsverhalten des derzeitigen Funktaxibetriebs gründlich analysiert werden. Im Projekt ZENEM wird dies auf Basis von GPS-Daten bewerkstelligt. Seit 2006 sind die Fahrzeuge der Funktaxiflotte 31300 mit GPS-Geräten ausgestattet, welche laufend im Abstand von mehreren Sekunden deren Positionsdaten in anonymisierter Form über Funk zu einem zentralen Server senden. Die GPS-Daten liegen für Teilfahrten vor und werden z.B. zur Bestimmung der aktuellen Verkehrslage im Wiener Raum von einem vom Projektpartner AIT entwickelten Programm weiterverarbeitet [Rein07]. Um den Anforderungen des Projekts ZENEM zu genügen, werden die GPS-Positionen für das gesamte Jahr 2011 – ähnlich einem Puzzle – für jede Fahrt computerunterstützt zusammengesetzt. Die Herausforderung dabei ist es, die Datensätze korrekt den tatsächlich gefahrenen Straßen zuzuordnen und die gewählte Route zwischen den Datensätzen zu reproduzieren. Als Resultat ergeben sich zeitlich durchgängige Trajektorien der Funktaxiflotte.

Die resultierenden Trajektorien beinhalten die Abfolge der befahrenen Straßen im zeitlichen Verlauf und werden im Anschluss als Weg-Zeit-Verläufe extrahiert. Diese Vereinfachung ist zulässig, da die exakte gefahrene Route nicht von Interesse ist. Wichtig ist jedoch, wie viele Kilometer zwischen den Standzeiten zurückgelegt wurden und wo sich die Standortpositionen (z.B. Taxistandplatznummer 118, Neuer Markt) genau befinden. Die Ergebnisse der Weg-Zeit-Verläufe und der Standortverteilungen werden in tabellarischer Form festgehalten. Weiters kann der spezifische Energiebedarf je Fahrt mittels hinterlegten E-Fahrzeugmodells berechnet werden. Zusammen ergibt sich daraus der jährliche Energiebedarf der Funktaxiflotte 31300. Mittels Hochrechnungsfaktoren wird zusätzlich auf den Energiebedarf aller Wiener Funktaxis geschlossen. Dies geschieht unter der Annahme, dass der Antriebsstrang aller konventionell

betriebenen Taxis elektrifiziert wird. Durch den Umstieg auf rein batteriebetriebene Elektrotaxis ist es auf Grund der beschränkten Reichweite unmöglich alle Kunden- bzw. Leerfahrten durchzuführen. Durch einen intelligenten Ladeinfrastrukturausbau wird jedoch versucht das Defizit bestmöglich auszugleichen.

Eine Kernaufgabe des Projekts ZENEM stellt die richtige Wahl der betrachteten Szenarien dar. Diese basieren auf einer Kombination aus „Höhe der Ladeleistung“, „Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur“ und „Größe der Batteriekapazität“. Dabei werden Ladeleistungen von 3,67 kW (einphasiges Normalladen) bis über 50 kW (dreiphasiges Schnellladen) berücksichtigt und die Bandbreite des Ladeinfrastrukturausbaus von einem Einstiegszenario mit wenigen Ladestationen bis zu einem gut ausgebauten Ladestationsnetz reichen. Da die Batteriegröße nicht nur die Reichweite, sondern gleichermaßen auch die Investitionskosten beeinflusst, werden die Batteriekapazitäten in den einzelnen Szenarien ebenfalls variiert.

Die verschiedenen Szenarien werden für die gesamte Taxiflotte – mit Hilfe einer im Projekt ZENEM selbst erstellten Routine (verwendete Software MATLAB®) – simuliert. Das bedeutet, dass jedes Funktaxi fiktiv seinen Weg-Zeit-Verlauf abfährt und bei Standorten mit definierter Lademöglichkeit die Batterie auflädt. Das Laden erfolgt vorerst ungesteuert und sofort nach Ankunft am Taxistandplatz. Dabei wird während der gesamten Simulationsdauer der State of Charge (SOC) der Batterie mitgeschrieben und überprüft ob die minimale Grenze unterschritten wird.

Weiters wird bei der Simulation der zeitliche Verlauf das Summenladeprofil je Ladestation am Taxistandplatz durch Addition der Einzelladevorgänge der Fahrzeuge berechnet. Diese Ladeprofile spiegeln den punktuellen Energie- und Leistungsbedarf der Elektrotaxis wider und stellen somit die Grundlage der Netzberechnungen dar. Diese GPS-basierende Berechnung des Ladebedarfs ist zwar komplex und zeitaufwendig, erbringt jedoch im Vergleich zu Modellen, die auf Verkehrsstatistiken mit gemittelten Datensätzen beruhen, qualitativ bessere und vor allem realitätsnähere Ergebnisse.

Aus den Leistungsprofilen der Ladestationen können jene Netzbereiche identifiziert werden, die am stärksten von der Elektromobilität belastet werden. Davon werden fünf Niederspannungsnetzabschnitte ausgewählt. Da die Elektromobilität – wie zuvor beschrieben – genau abgebildet ist, muss der aktuelle elektrische Verbrauch ebenfalls mit hoher Qualität erfasst werden. Zurzeit gibt es noch keinen flächendeckenden Einsatz von „Smart Metern“, die den elektrischen Verbrauch (einzelner Haushalte und Gewerbe) exakt durch Messungen bestimmen. Deshalb werden im Projekt ZENEM die Leistungsverläufe der elektrischen Verbraucher durch Messungen an mehreren Netzknoten (Hausanschlüsse bzw. direkt an den Netztransformatoren) über einen vierwöchigen Zeitraum ermittelt. Mit Hilfe der für das Projekt ZENEM anonymisierten Kundendaten (z.B. Jahresstromverbrauch und Art des Verbrauchers) ist es möglich, die aktuellen Leistungsprofile aller elektrischen Verbraucher der betrachteten Netzabschnitte zu erstellen.

Die fünf Netzabschnitte werden im Lastflussprogramm NEPLAN® mit den angenommenen Ladestationen modelliert. Dafür müssen alle Kenndaten der Netzkomponenten angefangen beim Netztransformator über die verwendeten Kabelleitungen bis hin zu den Verbrauchern in das Programm übernommen werden. Ist das Netz technisch und geografisch abgebildet, wird für die vorweg definierten Szenarien

eine Vielzahl von Analysen durchgeführt. Die Lastflussberechnungen lassen Aussagen über die Belastung der Netzkomponenten und die Einhaltung des Spannungsbandes an allen Netzknoten zu. Darüber hinaus wird das transient thermische Verhalten der Netzkomponenten modelliert, um die möglichen Auslastungsgrenzen genau zu verifizieren. Weitere Berechnungen bezüglich Netzzrückwirkungen, wie Auftreten von Oberschwingungen, Unsymmetrien und Flicker lassen Rückschlüsse auf die Güte der Netzqualität zu.

Kommt es bei der netztechnischen Analyse der Szenarien zu Überlastungen, welche für die Betriebsmittel unzulässig sind bzw. zu Verletzungen des Spannungsbandes führen, muss das Ladeverhalten der elektrischen Taxis gesteuert durchgeführt werden. Die dafür entwickelten Ladekonzepte haben die Aufgabe, das Netz innerhalb seiner erlaubten Zustände zu halten. Die angewandte Form des gesteuerten Ladens wird als netzorientiertes gesteuertes Laden bezeichnet. Werden nun die Ladevorgänge der Elektrotaxis gesteuert, muss wieder überprüft und – in weiterer Folge durch Anpassungen – gewährleistet werden, dass die Mobilitätsbedürfnisse befriedigt sind.

Diese technischen Betrachtungen werden mit einer Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Aspekte abgerundet. Dabei werden Energiefluss und Umwandlungsketten von elektrisch und konventionell angetriebenen Fahrzeugen recherchiert, um die CO₂-Emissionen beider Technologien miteinander vergleichen zu können. Weiters sind die auftretenden Kosten, die sich in Fahrzeug-, Betriebs- und Infrastrukturkosten gliedern, abzuschätzen. Zusätzlich zu den Kosten werden die politischen und baulichen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen, die für einen Umstieg auf elektrisch angetriebene Taxis von Nöten sind, analysiert. Die Ergebnisse stellen die Diskussionsgrundlage in einem nationalen Workshop mit Vertretern der Taxibranche, Energieversorgungsunternehmen und Netzbetreibern, sowie Verkehrs-, Raum- und Stadtplanern dar.

Am Ende des Projekts ZENEM werden Empfehlungen gegeben, welche möglichen Szenarien den Ansprüchen einer zukünftigen E-Funktaxisflotte und des elektrischen Niederspannungsnetzes genügen und welche ökonomische und ökologischen Auswirkungen und Rahmenbedingungen auf die österreichische Wirtschaft zukommen.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Industrielle Forschungsprojekt ZENEM orientiert sich an den drei grundlegenden Ausrichtungen des Forschungs- und Technologieprogramms „Neue Energien 2020“ (4. Ausschreibung):

- intelligenten Energiesystemen,
- effizientem Energieeinsatz und
- erneuerbaren Energieträgern.

Im Projekt ZENEM werden die Kernbereiche der Ausschreibung in einer ganzheitlichen Betrachtung behandelt. Elektrofahrzeuge im Allgemeinen und E-Taxis im Speziellen ermöglichen aufgrund der hohen Effizienz des elektrischen Antriebsstrangs einerseits eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfs

und besitzen andererseits vor allem in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen ein maßgebendes Potenzial zur CO₂-Reduktion. Weiters tragen intelligente Netzsysteme und Ladestationen dazu bei, lokale Überlastungen zu verhindern und einen geregelten Netzbetrieb garantieren zu können.

Zur Erreichung der übergeordneten Ziele des Klima- und Energiefonds wurden entsprechend der Programmausrichtung mehrere Einzelziele definiert. Dabei liefert das Projekt ZENEM einen wesentlichen Beitrag zu den in Abbildung 1 dargestellten Zielen.

In Bezug auf die 4. Ausschreibung wurde im Projekt ZENEM vorrangig das Themenfeld „Energiesysteme, Netze und Verbraucher“ und die folgende darin beinhaltenden Schwerpunkte adressiert:

- Technologiekomponenten für die Integration dezentraler Erzeugung
- Spezielle Technologie-Anforderungen bei der Gesamtintegration in ein intelligentes Energiesystem
- Beiträge zur Realisierung von innovativen Netzen

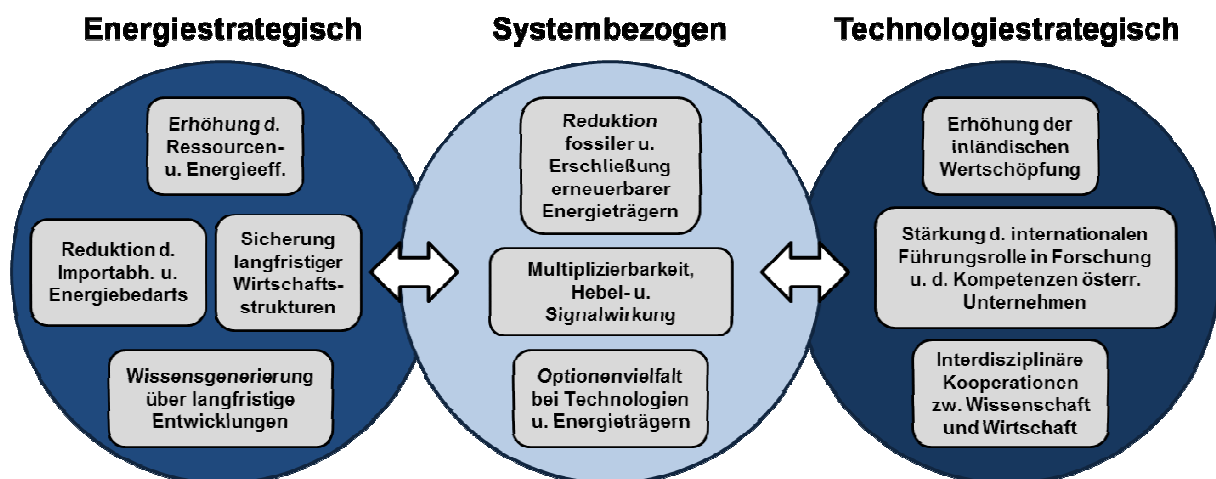


Abbildung 1: Übersicht der angesprochenen Programmmziele durch die Ergebnisse im Forschungsprojekt ZENEM

2 Inhaltliche Darstellung

Mit dem Projekt ZENEM hat man sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkungen von zukünftigen E-Taxis auf das Niederspannungsnetz in Wien umfassend zu untersuchen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die dafür notwendigen Arbeitsschritte, die gewählten Methoden und die resultierenden Ergebnisse detailliert beschrieben. Zu Beginn der inhaltlichen Darstellung wird die Erhebung der Datengrundlagen für das derzeitigen Mobilitätsverhalten von Funktaxis und den heutigen elektrischen Verbrauch in unterschiedlichen Wiener Niederspannungsabschnitten erläutert. Darauf folgt die Definition der Erfüllungsszenarien, also unter welchen Rahmenbedingungen wie viele Taxifahrten möglich sind, und die Modellierung der szenarienabhängigen Summenladeprofile an den Taxistandplätzen. Im Anschluss werden die Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz in Bezug auf Auslastung, Spannungshaltung und Power Quality dargestellt, sowie auf erforderliche Ladesteuerungen eingegangen. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit den ökonomischen und ökologischen Aspekten, wie auch mit den politischen und baulichen Rahmenbedingungen bei einem Umstieg auf elektrisch betriebene Taxis in Wien.

Die grundlegenden Annahmen und Einschränkungen, die das gesamte Projekt ZENEM betreffen, sind folgen punktuell aufgelistet:

- Es wird die Umstellung einer gesamten Wiener Funktaxiflotte auf Elektrofahrzeuge modelliert.
- Die Analyse umfasst dabei keine Hybridfahrzeuge; nur rein elektrische batteriebetriebene Fahrzeuge werden untersucht.
- Das Mobilitätsverhalten von konventionellen Taxis im derzeitigen Funktaxibetrieb bleibt erhalten
⇒ Keine erheblichen Fahrverhaltensänderungen bei der Verwendung von Elektrotaxis.
- Eine Taxifahrt wird als Summe aller Wege zwischen zwei Taxistandplätzen angesehen.
- Nutzung der ermittelten Standzeiten am Taxistandplatz zum Laden der Fahrzeugbatterie
⇒ Ladeinfrastruktur wird nur an Taxistandplätzen berücksichtigt.
- Generell gelten die Aussagen und Erkenntnisse für Funktaxis im Mehrschichtbetrieb
⇒ Taxis ohne Vermittlung und jene im Einschichtbetrieb besitzen abweichende Charakteristiken.

2.1 Datengrundlage

Um Aussagen über die Machbarkeit und die damit verbundenen Rahmenbedingungen einer Umstellung von konventionellen Taxis auf batteriebetriebene Elektrotaxis in Wien treffen zu können, ist eine umfangreiche und naturgetreue Datengrundlage erforderlich. Dies gilt einerseits für den derzeitigen Funktaxibetrieb und dessen Mobilitätseigenschaften und andererseits für das zugrundeliegende elektrische Niederspannungsnetz mit allen darin vorhandenen Komponenten und elektrischen Verbrauchern.

Zur Erhebung des derzeitigen Funktaxibetriebs werden GPS-basierende Daten einer Wiener Funktaxiflotte für ein gesamtes Kalenderjahr herangezogen. Daraus können Kilometerleistungen, Standzeiten und die dafür genutzte Taxistandplätze abgeleitet werden. Weiters wird der Energiebedarf eines zukünftigen E-Taxis abgeschätzt. Dafür steht ein physikalisches bzw. numerisches Fahrzeugmodell zur Verfü-

gung, welches u. a. das Gewicht (Masse), den Strömungswiderstandskoeffizienten (c_W -Wert) und die Stirnfläche eines Elektrofahrzeuges berücksichtigt.

Für die Abbildung der elektrischen Vorbelastung heutiger Wiener Niederspannungsnetze werden Langzeitleistungsmessungen in unterschiedlichen realen Netzabschnitten durchgeführt und die Charakteristiken der Netzkomponenten erhoben.

Nachstehend sind die im Projekt ZENEM verwendeten Datengrundlagen in Bezug auf Herkunft, Merkmale und Einschränkungen erläutert.

2.1.1 Mobilität des derzeitigen Funktaxibetriebs

Das Projekt ZENEM basiert auf der Annahme eine größere Funktaxiflotte modellhaft von konventionellen auf rein elektrische Fahrzeuge umzurüsten. Für dieses Vorhaben konnte die Wiener Vermittlungsgesellschaft Taxi 31300 als Projektpartner gewonnen werden. Ihre Funktaxiflotte umfasst etwas mehr als 800 Taxis¹. Diese Fahrzeuge sind jedoch nicht im Besitz von Taxi 31300, ihr Auftrag ist lediglich die Vermittlung von Kundenfahrten. Dafür müssen sich die Taxilenker während ihrer Schicht am System der Vermittlungsgesellschaft anmelden.

Seit 2006 sind die Fahrzeuge der Funktaxiflotte 31300 mit GPS-Geräten ausgestattet, welche laufend im Abstand von mehreren Sekunden deren Positionsdaten in anonymisierter Form über Funk zu einem zentralen Server senden. Dort werden die GPS-Positionen der Fahrzeuge zur Vermittlung oder z.B. zur Bestimmung der aktuellen Verkehrslage im Wiener Raum weiterverarbeitet ([Rein07], [Widh12]). Dies ist auch der Grund warum die verfügbaren Originaldaten jeder Taxifahrt aus mehreren Teilabschnitten mit unregelmäßigen, lückenhaften Berichtsintervallen (ca. 25 bis 60 s) bestehen. Abbildung 2 veranschaulicht diese Teilabschnitte, die im System als Punktpaare abgespeichert werden.

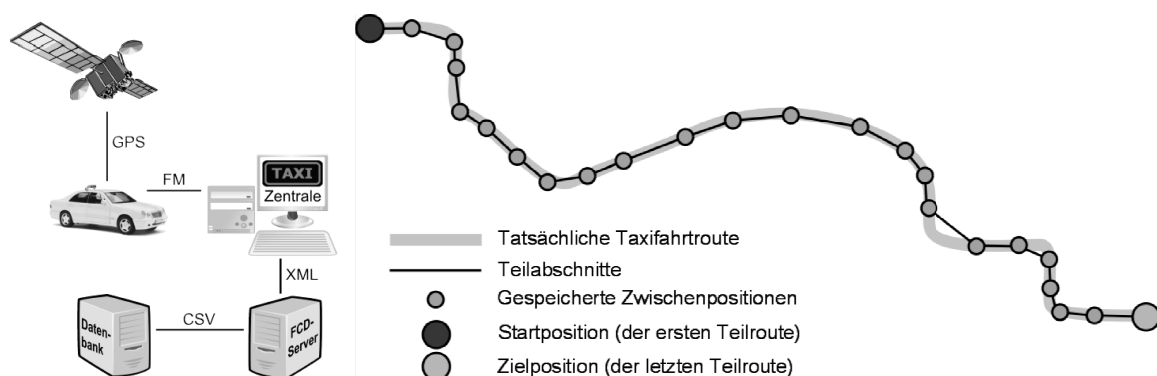


Abbildung 2: (links) Prinzip der GPS-Datenaufzeichnung;
(rechts) Skizzierte Darstellung der gespeicherten GPS-Positionen einer Taxifahrt

Die systembedingten Eigenschaften, die erforderliche Anonymisierung und die Tatsache, dass Fahrzeuge natürlich nur mitgeloggt werden, wenn sie am Vermittlungssystem angemeldet sind, macht es un-

¹ Die gesamte Wiener Funktaxiflotte besteht aus rund 2.500 Fahrzeugen. Mit den zusätzlichen etwa 1.800 Taxis ohne Funk ergeben sich in Wien in Summe ca. 4.300 zugelassene Taxifahrzeuge.

möglich, das Mobilitätsverhalten einzelner Taxis bzw. auf Ebene der Kundenfahrten durchgängig über das gesamte Jahr darzustellen. Durch die Entwicklung einer Synthesemethode konnten jedoch aus den gestückelten Mobilitätsdaten Fahrten² (Trajektorien) zwischen den Taxistandplätzen und darüber hinaus durchgängige Wegeketten modellhaft rekonstruiert werden. Dazu wurden im wesentlichen MapMatching, Routing, Filteralgorithmen und Aggregationsfunktionen angewendet (siehe Abbildung 3).

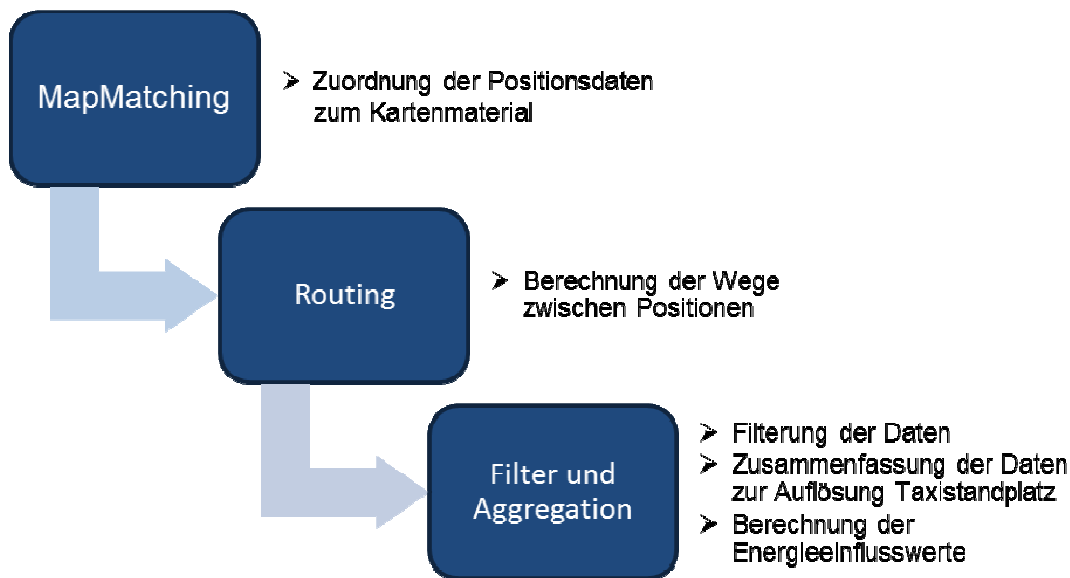


Abbildung 3: Funktionen des Floating Car Servers zur Aufbereitung der Mobilitätsdaten

2.1.1.1 Einflusswerte und Ermittlung des Energiebedarfs

Zur Energierechnung wird ein Fahrzeugmodell verwendet, welches das Gewicht (Masse), den Strömungswiderstandskoeffizient (c_W -Wert) und die Stirnfläche des Elektrofahrzeuges berücksichtigt. Die Funktaxiflotte besteht aus überwiegend (ca. 80 %) „großer“ bzw. „hoher“ Fahrzeuge. Auf Empfehlung der Funktaxivermittlung wurde als Referenz ein Mercedes-Benz der Baureihe 211 gewählt und der Fahrer mit 80 kg angenommen.

Der Besetzungsgrad wird durch zusätzliches Gewicht berücksichtigt. Der Status des Fahrzeuges beinhaltet vor der Datenaggregation die Information, ob es sich um Kundenfahrten handelt. Somit kann für den Anteil der Strecken, die das Fahrzeug mit Kunden fährt, die zusätzliche Masse für den durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Kunden plus Gepäck berücksichtigt werden.

Der zusätzliche Energieaufwand durch Nebenverbraucher kann derzeit nicht genau beziffert werden. Es liegen keine Daten zur Nutzung von Nebenverbrauchern vor. Für das Klima im Fahrzeug (Heizung, Klimaanlage) kann hier zu einem späteren Zeitpunkt ein zusätzlicher Energieaufwand addiert werden.

Die Verkehrslage nimmt Einfluss auf Anzahl und Intensität von Beschleunigungen. Als Datengrundlage wurden Fahrten aus den Verkehrszuständen „frei“, „zähfließend“ und „Stau“ selektiert und die zugehöri-

² Eine Fahrt zwischen zwei Taxistandplätzen repräsentiert in der Realität eine Kunden- oder Leerfahrt bzw. Kombinationen aus beiden. Eine Unterscheidung kann nach der Aggregation jedoch nicht mehr getroffen werden.

gen Beschleunigungszyklen durch das Modell bewertet. Der resultierende unterschiedliche Energieverbrauch je Verkehrszustand kann dann in weiterer Folge bei allen Taxifahrten angewendet werden.

Die Routenwahl, also die Abfolge der befahrenen Straßen, wird ebenfalls bewertet, da für das Abbiegen an Kreuzungen ein höherer Energiebedarf als für geradeausfahren angenommen werden kann. Der Einfluss wird durch die Simulation von Beschleunigungszyklen berechnet und den ermittelten Strecken zugeordnet. Durch diese Vorgangsweise wurde für jede Fahrt der gesamten modellierten E-Taxiflotte der spezifische Energiebedarf berechnet.

Der Median des ermittelten, spezifischen Energiebedarfs der Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen über die gesamte modellierte E-Taxiflotte ergibt sich für das zugrundeliegende Jahr 2011 zu 19,90 kWh/100km. Dabei liegt das 0,1-Quantil bei 17,95 kWh/100km und das 0,9-Quantil bei 22,80 kWh/100km. Für die gesamte berücksichtigte Funktaxiflotte von durchschnittlich 823 Fahrzeugen (Kalenderjahr 2011) wurde ein Energiebedarf (inkl. Ladeverluste, ohne Nebenverbraucher) von insgesamt 8.707,4 MWh/a kalkuliert. In Wien sind aktuell rund 2.500 Funktaxis in Betrieb. Somit erhält man für alle Wiener Funktaxis einen Energiebedarf von hochgerechnet 26,45 GWh/a. Diese Werte gelten natürlich nur unter der theoretischen Annahme, dass alle Fahrten elektrisch durchgeführt werden.

Tabelle 1: Berücksichtigung der Einflussfaktoren zur Energiemodellierung

Einfluss/Kriterium	Einflussgröße/Parameter	Modellierung
Fahrzeugmodell	Gewicht, Luftwiderstand der Stirnfläche	Masse c_w -Wert Stirnfläche
Besetzungsgrad, Beladungszustand	Gewicht	(zusätzliche) Masse
Nebenverbraucher	Zusätzlicher Energiebedarf	-
Verkehrszustand	Beschleunigungen	Beschleunigungszyklen
Routenwahl	Beschleunigungen	Beschleunigungszyklen

2.1.1.2 Kennwerte und Verteilungen der Mobilitätsdaten

Schlussendlich konnte für das Projekt ZENEM ein Mobilitäts-Datenpool generiert werden, welches aus rund 435.000 chronologischen Wegeketten für das Jahr 2011 besteht und insgesamt 1,9 Mio. Einzelfahrten zwischen zwei Taxistandplätzen enthält. Jede Einzelfahrt besitzt zeitliche und räumliche Informationen über Fahrt- und Standdauer, die zurückgelegte Distanz bzw. den ermittelten Energiebedarf, sowie die Positionen der Taxistandplätze (Start und Ziel).

In Bezug auf die Standdauern an den Taxistandplätzen (TSP) und die Distanzen der Fahrten zwischen zwei TSP ergibt sich eine linkssteile, annähernd logarithmische Normalverteilung. In Abbildung 4 ist die prozentuelle Verteilung der Distanzen je Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen über alle Wochentage im Raster von fünf Kilometer dargestellt. Wie schon erwähnt, bestehen Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen aus Kombinationen von Kunden- und Leerfahren. Für das Mobilitäts-Datenpool (2011) zeigt sich eine durchschnittliche Distanz von 14,2 km. Dabei liegen die mittleren 50 % aller Distanzen,

also jene zwischen dem 0,25- und 0,75-Quantil, in einem Bereich von 5,3 bis 17,0 km. Das 0,9-Quantil (90 % aller Werte) beträgt 31,3 km.

Wie beim motorisierten Individualverkehr (MIV), bei dem etwa 95 % der Wege kleiner als 50 km ausfallen [Leit11], sind es nicht die Distanzen der Einzelfahrten, die für einen Umstieg auf Elektrofahrzeuge das Hindernis darstellen. Jedoch stehen dem Taxibetrieb nicht die stundenlangen Standzeiten Zuhause bzw. am Arbeitsplatz zur Verfügung, um die Fahrzeugbatterie wieder aufzuladen. Welche Standdauern an den Taxistandplätzen für einen möglichen Ladevorgang vorhanden sind, ist in Abbildung 5 dargestellt. Diese zeigt analog zu den Distanzen die prozentuelle Verteilung der Standdauer an den Taxistandplätzen über alle Wochentage im Raster von fünf Minuten. Der Mittelwert liegt bei 19,4 Minuten, wobei 50 % der Werte (0,25- bis 0,75-Quantil) in einem Bereich von 6,5 bis 26,7 Minuten liegen. Es zeigt sich, dass 90 % der Stopps am Taxistandplatz weniger als 42,1 Minuten dauern.

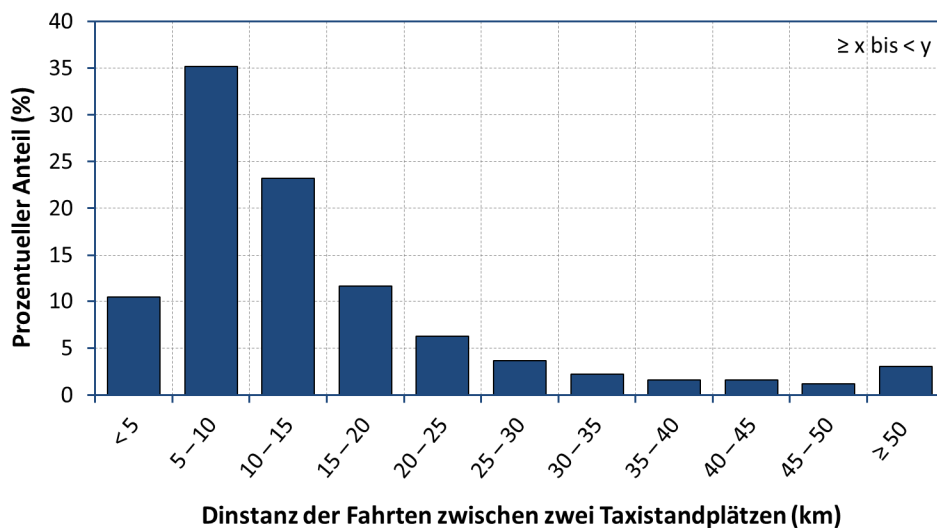


Abbildung 4: Prozentuelle Verteilung der Distanz der Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen über alle Wochentage

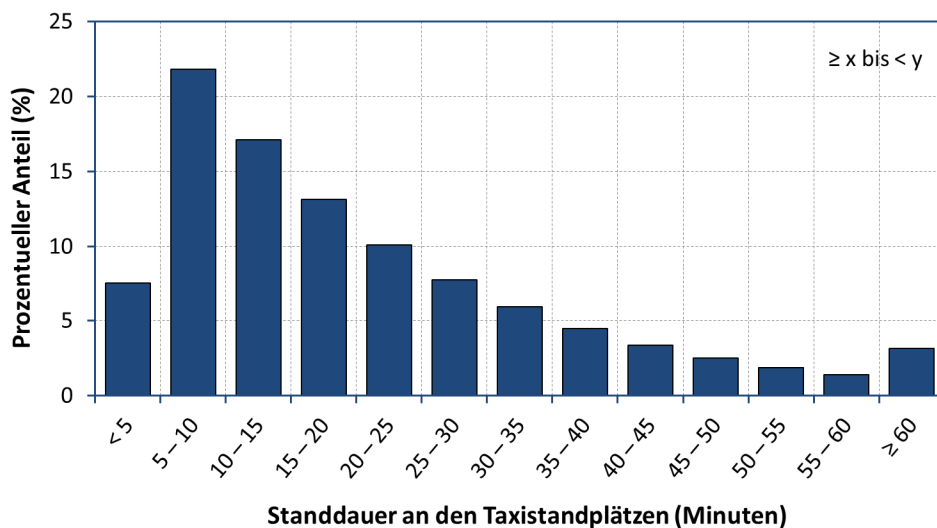


Abbildung 5: Prozentuelle Verteilung der Standdauer an den Taxistandplätzen über alle Wochentage

Wie sich jedoch schon in anderen Forschungsprojekten (z.B. [Leit11], [Schu10], [Schu13a]) gezeigt hat, sind es nicht nur die Einzelfahrten, sondern vor allem die Distanzen der zurückgelegten Wegeketten zwischen zwei Lademöglichkeiten, die für eine elektrische Machbarkeit ausschlaggebend sind. Deshalb ist es äußerst wichtig durchgängige Wegeketten der Funktaxis für die Erfüllbarkeitssimulation zu verwenden. Näheres dazu folgt im Kapitel 2.2.1.4.

Abbildung 7 bis Abbildung 9 stellen die mittleren Standdauern am Taxistandplatz, sowie die mittleren Fahrtauern und zurückgelegte Distanzen zwischen zwei Taxistandplätzen dar. Die Werte in diesen Diagrammen sind je Stunde gemittelt, auf die Maxima (Dauer und Distanz) normiert und für jeden Wochentag aufgetragen.

Seite 17 von 61

nis stark mit der Tageszeit. Die längsten Standdauern wurden an Wochentagen für nachmittags ermittelt.

Von Montag bis Donnerstag zeigt sich für Stand- und Fahrt dauern ein ähnliches Niveau. Tendenziell längere Fahrt dauern ergeben sich am Freitag und niedrigere am Sonntag. Bezüglich Standdauern fällt der Mittelwert Richtung Samstag ab und steigt am Sonntag wieder an. Auch die Interquartilsabstände werden von Montag bis Freitag geringer, was durch eine zum Wochenende hin steigende Kundenfrequenz erklärt werden könnte. Die Wartezeiten der Fahrzeuge am Standplatz werden an diesen Tagen kürzer und somit auch die verfügbaren Ladezeiten in der Simulation.

Die zurückgelegten Distanzen aller Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen wurden je Stunde zu mittleren Wegelängen zusammengefasst und in Abbildung 9 den Wochentagen zugeordnet. Die Wegelängen wurden mit dem Maximalwert im Datensatz skaliert. Die Mittelwerte zeigen einen leichten Anstieg Richtung Sonntag. Hingegen nehmen die Maximalwerte vom Montag bis Sonntag sukzessive ab.

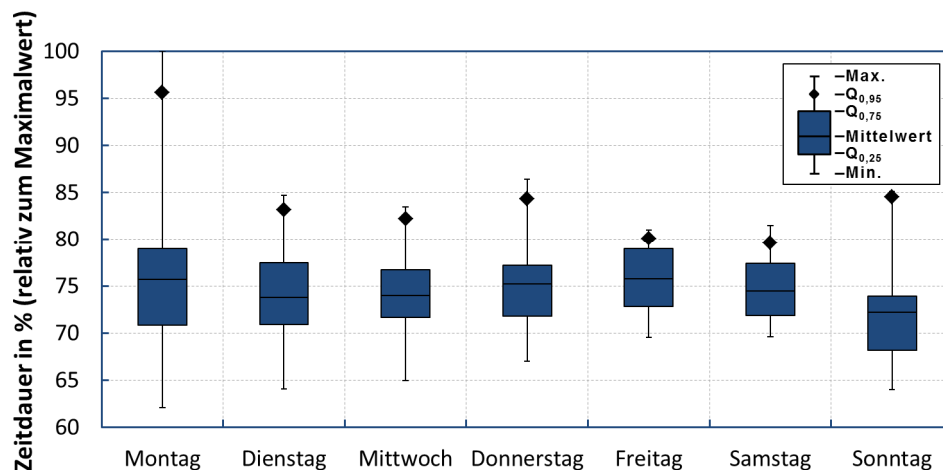


Abbildung 7: Mittlere relative Dauern der Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert)

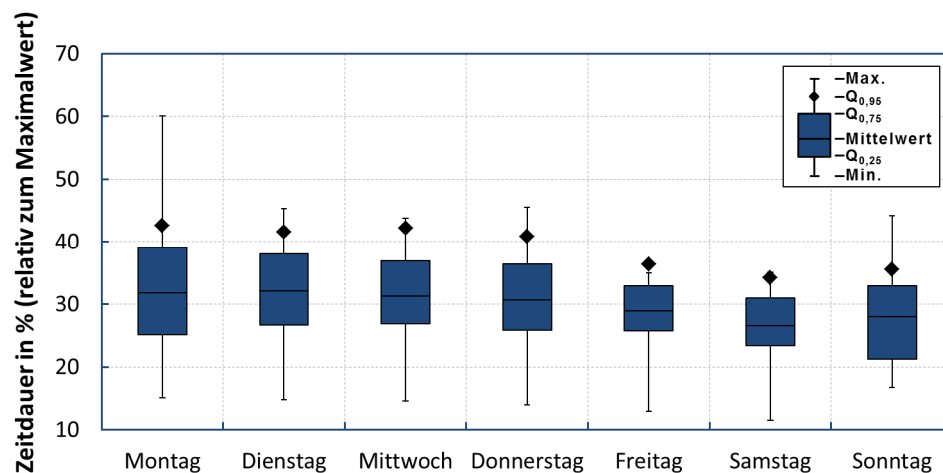


Abbildung 8: Mittlere relative Standdauern an den Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert der Fahrt dauern)

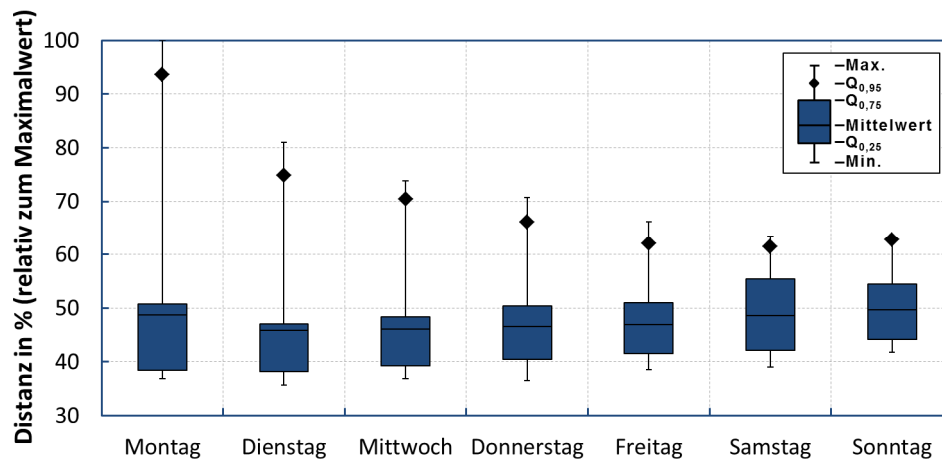


Abbildung 9: Mittlere relative Distanz der Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert)

Für jede Einzelfahrt wurde ferner aus den Merkmalen „Fahrlänge“, „Luftliniendistanz“ und „Vollständigkeit des Routings“ ein Qualitätsindikator gebildet, der durch folgende Charakteristiken bestimmt wird:

- Prozentsatz der Fahrten, die auf den Straßengraphen umgelegt werden konnten
- Verhältnis von Luftlinie (zwischen den GPS-Positionen) und der Länge der berechneten Route am Straßennetzwerk
- Bewertung der berechneten Geschwindigkeiten

Aus diesen Parametern wurde ein Qualitätsindikator zwischen 0 und 100 (0 = geringstes Vertrauen, 100 = höchstes Vertrauen) gebildet. Rund 74 % (50 %) aller Einzelfahrten besitzen einen Qualitätsindikator von über 80 % (90 %). Dieser wird in weiterer Folge (siehe Kapitel 2.2.1.2) für die Anpassung des Mobilitäts-Datensatzes in Abhängigkeit der jeweiligen Simulation verwendet.

2.1.1.3 Mögliche Änderungen des Fahrverhaltens bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen

Die Batteriekapazität, die Ladeleistung und der Ladestellenausbau werden bei der Szenariendefinition festgelegt (siehe Kapitel 2.2.2) und stellen die wesentlichen Einflussgrößen zur erfolgreichen Durchführung von rein elektrischen Fahrten dar. Die limitierte Reichweite von Elektrofahrzeugen (im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren) wird zwar im städtischen Bereich großteils ausreichen, sie kann möglicher Weise aber zu veränderten Strategien, wie Anpassung der Routenwahl und zusätzliches Anfahren von Ladestationen, führen.

Das Projekt ZENEM basiert auf der Annahme, eine größere Funktaxiflotte mit ihrem derzeitigen Funktaxibetrieb auf Elektromobilität umzurüsten, daher konnten lediglich theoretische Überlegungen und Annahmen zur Verhaltensänderung bei Elektromobilität getroffen werden, die in weiterer Folge bei der Definition der Szenarien (siehe Kapitel 2.2.2) berücksichtigt werden. Grundsätzliche Voraussetzungen der Elektromobilität werden betrachtet und nach deren Relevanz im Zusammenhang mit dem Fahrverhalten bewertet. Dafür wurden bereits bestehende Konzepte in Bezug auf Reichweite, Ladestellenausbau, Fahrverhalten und Sicherheit aus anderen Forschungsprojekten zum Thema „Elektromobilität“ recherchiert und berücksichtigt.

Forschungsprojekt „SMART ELECTRIC MOBILITY“ (Neue Energien 2020, Projekt-Nr.: 821886)

Die Ergebnisse des Projekts SEM beschreiben sehr hohe Erfüllbarkeitsraten der Fahrten von privat genutzten Fahrzeugen. Des Weiteren werden die derzeitigen Reichweiten je nach Batterietyp und Beanspruchung mit zwischen 40 und 150 km angegeben [Ste10]. Bei einem Drehstromanschluss von 44 kW benötigt das Aufladen moderner Batteriesysteme mit drei- bis fünfjähriger Lebensdauer rund 1,5 Stunden [EIÖ10]. Ein batterieschonender Normalladevorgang (Vollladung) ist derzeit nicht unter 3,5 Stunden möglich. Zu hohe Ladeströme, wie sie bei Schnellladung auftreten, erhitzen die Batterie stark und bewirken Ladeverluste.

Erkenntnisse für ZENEM: Die Nutzung von privaten Fahrzeugen kann mit den Fahrzeugen der Taxiflotte nicht verglichen werden, die Kilometerleistung/Tag ist bei Taxis meist wesentlich höher. Die Zahlen für Reichweiten, Batteriekapazität und Ladedauer werden aktualisiert bzw. übernommen und in den Szenarien berücksichtigt.

Leuchtturmprojekt „emporA“ (Leuchttürme Elektromobilität, Projekt-Nr.: 825855)

Im Projekt emporA wird an Methoden zum „energieeffizienten“ Routing gearbeitet. Diese berücksichtigen den aktuellen „State of Charge“ (SOC) und geben Empfehlungen zu Ladestationen entlang der Route zu fahren wenn das eigentliche Ziel mit dem SOC nicht erreichbar ist. Energie-Rückgewinnung (Rekuperation) wird dabei durch negative Gewichte für Kanten im Routing-Graphen abgebildet, dazu wurden spezielle Routing-Algorithmen entwickelt. Das System erhält zusätzliche Komplexität durch die Integration eines Reservierungssystems.

Erkenntnisse für ZENEM: Das zusätzliche Anfahren von Ladestationen kann in den Szenarien nicht abgebildet werden, jedoch beinhalten die Szenarien unterschiedliche Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur um die Erfüllbarkeit der realen Taxi-Fahrten zu bewerten. Dazu werden virtuelle Ladestationen definiert, die stellvertretend für ein Gebiet (Region, Bezirk, o.ä.) das Laden ermöglichen.

Forschungsprojekt „E-FFEKT“ (Österr. Verkehrssicherheitsfond, Projekt-Nr.: 199744)

Das Projekt E-FFEKT untersucht die Auswirkungen von E-Cars auf Fahrdynamik und Verkehrskonflikte. Neben der viel diskutierten schlechteren Wahrnehmbarkeit von E-Cars aufgrund der verringerten Lärmemission ist vor allem der Aspekt des sicheren Umgehens mit den veränderten Fahreigenschaften zu beachten. E-Cars weisen aufgrund ihrer Antriebstechnik und des vergleichsweise hohen Eigengewichts veränderte fahrdynamische Eigenschaften auf. Dazu zählen das Beschleunigungs- und Bremsverhalten (Längsdynamik), die Quer- und Vertikaldynamik. Es ist zu klären, ob durch dieses „neuartige Fahren“ das Fahrverhalten so beeinflusst wird, dass dadurch Risiken bzw. Verkehrskonflikte entstehen. Derzeit läuft die empirische Datenerfassung mit konventionellen und elektrisch betriebenen Fahrzeugen.

Erkenntnisse für ZENEM: Die Berechnungsgrundlage für ZENEM stellen die historischen Mobilitätsdaten der Taxis dar. Diese bestehen im Wesentlichen aus GPS-Positionen mit einem Berichtsintervall von 25 bis 60 Sekunden. Die Datengrundlage erlaubt die Berücksichtigung von Geschwindigkeiten, Routenwahl und Verkehrszustand der aufgezeichneten Fahrten von überwiegend konventionellen Fahrzeugen. Spezifische Änderungen im Bereich Fahrdynamik bei Elektrofahrzeugen werden in ZENEM nicht berücksichtigt.

2.1.2 Elektrische Komponenten und Verbraucher der betrachteten Niederspannungsnetze

In diesem Kapitel werden die bestehenden elektrischen Verbraucher (z.B. private Haushalte und Gewerbe) ausgewählter Energienetzbereiche (Niederspannungsebene) – in denen Ladestationen der E-Taxis eingebunden werden sollen – analysiert. Dabei sind die Leistungsprofile und die dazugehörigen Jahresstromverbräuche zu erheben und diese mittels Messreihen zu validieren. Weiters werden die relevanten Kenndaten der Netzkomponenten (z.B. Stromkabel und Netztransformator) für die nachfolgenden Berechnungen ermittelt.

2.1.2.1 Auswahl der untersuchten Netzabschnitte

Ergebnisse aus Vorprojekten (z.B. V2G-Strategien FFG-Nummer: 825417) [Burn12] zeigen, dass zukünftige Elektromobilität hauptsächlich in Niederspannungsnetzen Auswirkungen hervorrufen. Daher ist der Fokus auf diese Netzgebiete zu legen. Aufgrund der vielfältigen Ausprägungen der Niederspannungsnetze sind auch deren Auswirkungen stark unterschiedlich. Repräsentative Ergebnisse werden im Projekt ZENEM durch eine breit aufgestellte Analyse an untersuchten NS-Netzen und unterschiedlichen Summenladeprofilen der Taxistandplätze erreicht.

Die Auswahl der zu messenden Netzabschnitte erfolgte nach Kriterien wie Anzahl der Stellflächen, Kunden- und Fahrzeugfrequenz sowie zusätzlich unter Berücksichtigung der Gegebenheiten vor Ort (Vorhandensein eines Trennanschlusskastens bzw. Schleifenkastens, Ausführung der Trafostation, etc.). In Anbetracht der genannten Kriterien wurde folgende Auswahl getroffen:

- Netz 1 (Wohnen): Wallensteinplatz, 1200 Wien
- Netz 2 (Innenstadt): Kärntner Straße, 1010 Wien
- Netz 3 (Einkaufszentrum): Gablenzgasse, 1150 Wien
- Netz 4 (Wohnen): Neubaugasse/Mondscheingasse, 1060 Wien
- Netz 5 (Wohnen): Siebenbrunnenplatz/Arbeitergasse, 1050 Wien

Es wurde bei der Auswahl der Netzabschnitte u.a. darauf geachtet, dass sie eine Vielfalt an Lastprofilen bieten und sich durch unterschiedlichen Lastbedarf auszeichnen (ein Haushaltslastprofil unterscheidet sich grundlegend von einem Gewerbelastprofil). Nur mittels einer ausreichenden Durchmischung von Haushalt- und Gewerbemessdaten kann eine realitätsnahe Modellierung entwickelt werden.

2.1.2.2 Ermittlung der derzeitigen elektrischen Netzkomponenten und Verbraucher

Für die weiteren Berechnungen wurden die relevanten Kenndaten aller Netzkomponenten erhoben und in das Lastflussprogramm NEPLAN® eingebettet. Dazu gehören die elektrischen und thermischen Nenndaten der verwendeten Stromkabel (meist Kunststoff-Erdkabel mit Aluminiumleitern von je 150 mm² Querschnitt) und Netztransformatoren (630 bzw. 800 kVA) aller fünf Niederspannungsnetzabschnitte (siehe dazu Kapitel 2.3). Weiters wurde die geografische Anordnung der Verbraucher und die daraus resultierenden Leitungslängen für die weiterführenden Lastflussberechnungen ermittelt. In Abbildung 10 ist das Modell für Netz 3 „Einkaufszentrum“ mit angeschlossenem Taxistandplatz dargestellt.

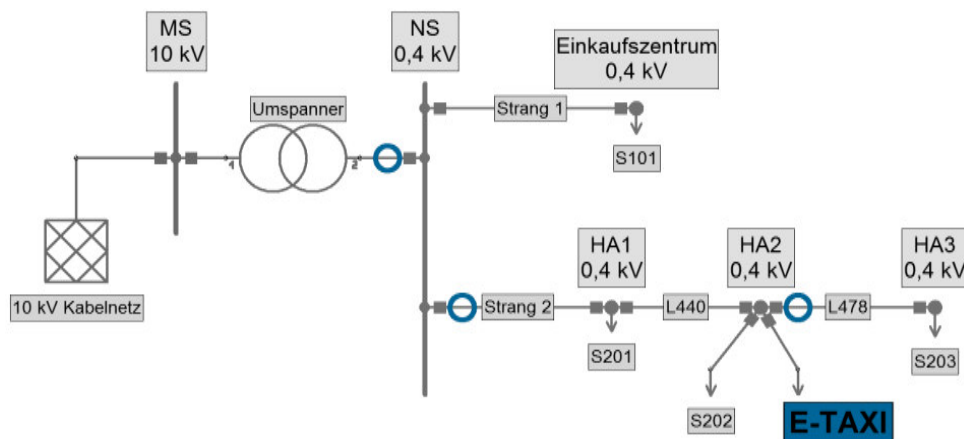


Abbildung 10: Netzmodell des Niederspannungsnetzes 3 (Die blauen Markierungen entsprechen den Messpunkten)

Damit die Auswirkungen von Elektrotaxis auf das Wiener Stromnetz untersucht werden können, müssen die aktuellen Stromkunden erfasst werden. Die aus den Datenbanken der Wienenergie Stromnetz GmbH extrahierten Werte³ umfassen für jeden Kunden den Jahresstromverbrauch sowie das zugehörige Lastprofil (Verbrauchergruppe). Pro Gebäude und in weiterer Folge pro Niederspannungsstrang wurden die Verbrauchswerte akkumuliert.

Abbildung 12 zeigt Kundengruppen eines untersuchten Niederspannungsstrangs. Die G-Profile deuten auf Gewerbe hin, während Haushalte in der Regel mit H0 modelliert werden. Das ULC-Profil beschreibt einen Haushalt mit Nachtspeicherheizung. Die Prozentzahlen beziehen sich hierbei auf den Anteil des jeweiligen Lastprofils an der verbrauchten Jahresenergiemenge im betreffenden Strang.

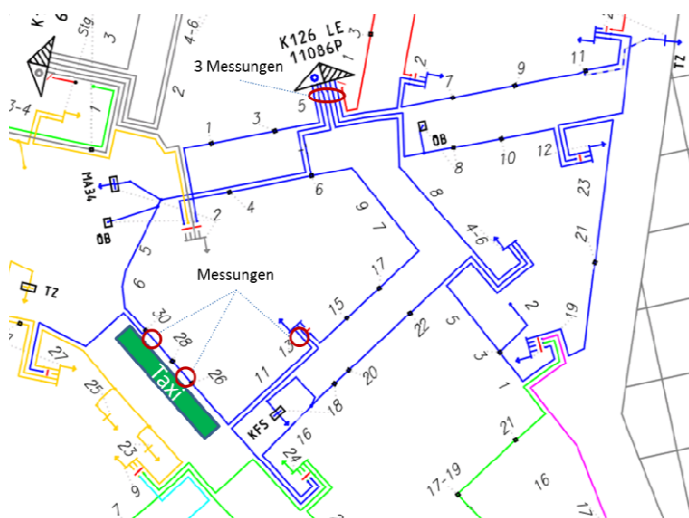


Abbildung 11: Niederspannungsnetzplan für Netz 1 „Wallensteinplatz“

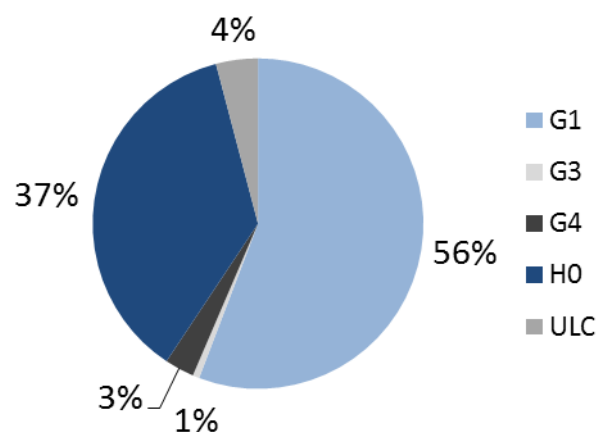


Abbildung 12: Zusammensetzung der Kundengruppen eines Niederspannungsstrangs

Die den Verbrauchergruppen hinterlegten standardisierten Lastprofile (H0, G1, ULC...) stellen den gemittelten zeitlichen Leistungsbedarf für eine große Menge (> 100 Verbraucher je Gruppe) dar. Diese

³ Dabei wurde auf datenschutzrechtliche Aspekte eingegangen und auf die Anonymisierung der Daten geachtet.

werden aber bei kleiner Verbraucherzahl, wie sie in Niederspannungsnetzen auftreten, auf Grund der Mittelung rasch ungenau. Deshalb werden im Projekt ZENEM die Leistungsverläufe der elektrischen Verbraucher durch Langzeitmessungen ermittelt.

Um die Messung fachgerecht durchführen zu können und die relevanten Daten des Netzes zu erhalten, wurden von der Firma DEWETRON sechs Messgeräte mit der Bezeichnung DEWE-638 bestellt. Diese Messgeräte eignen sich aufgrund ihrer Kompaktheit und der kompletten messtechnischen Erfassung wie Strom, Spannung, Leistung sowie Verschiebungsfaktor. Des Weiteren finden sie in jedem Trennanschlusskasten Platz und stören somit auch bei einer Messdauer von 4 Wochen den Alltag der Bewohner nicht.

Die Messmethodik für jeden der fünf Netzabschnitte wurde so angelegt, dass der gesamte Niederspannungsstrang samt Umspanner erfasst wurde. Das bedeutet, dass in der Trafostation alle Stränge des Umspanners und in weiterer Folge der ausgewählte Strang (Anschluss des Taxistandplatzes) bis zum „letzten“ Trennanschlusskasten gemessen wurde. Die Messgeräte erfassten über eine Dauer von je vier Wochen die Spannungen und Ströme pro Phase und berechneten daraus die Leistungen. Die Auflösung der Messdaten wurde dabei mit 1 bis 10 Minuten ausgewählt.



Abbildung 13: Trennanschlusskasten geschlossen / offen / mit Messgerät

Abbildung 11 zeigt den Niederspannungsplans „Wallensteinplatz“ (Netz 1, in blau dargestellt). Anhand dieses Beispiels soll die Methodik der Messung erläutert werden. Das Dreieck im oberen Bereich des Bildes symbolisiert die Transformatorstation, und die Bezeichnung deutet darauf hin, dass die Station über das Mittelspannungskabel K126 vom Umspannwerk Le (Leopoldstadt) versorgt wird. Die blauen Linien stellen die von der Station abgehenden Niederspannungsstränge dar. Der rote Strich bei der

Trafostation repräsentiert eine Niederspannungsleitung einer benachbarten Station⁴, die für Umschaltungen im Rahmen von Störungen verwendet werden kann. Die schwarzen Punkte entlang eines Stranges stellen die Trennanschlusskästen dar (siehe ebenfalls Abbildung 13). Diese Hausanschlüsse versorgen die Gebäude, die im Plan durch die zugehörigen Hausnummern angezeigt werden.

Alternativ zu den Trennanschlusskästen befinden sich im Netzgebiet sogenannte Schleifenkästen (siehe hierzu in Abbildung 11 oben rechts zwischen Hausnummern 1 und 29), mit denen ebenfalls Umschaltungen vorgenommen werden können. Links in der Abbildung 11 ist der Taxistandplatz am Wallensteinplatz eingetragen. Im daran angrenzenden Gehsteig verläuft das Niederspannungskabel, welches im Falle einer Ladestation für E-Taxis diese versorgen könnte. Deshalb wurden besonders in diesem Bereich Messungen für notwendig erachtet, um den Einfluss der Ladevorgänge analysieren zu können.

Grundsätzlich ist durch das ermittelte Messergebnis festgehalten, dass bei allen Netzabschnitten sowohl die Umspanner, als auch die gemessenen Kabelstränge, nicht überlastet sind. Dadurch ist gewährleistet, dass die von Wien Energie Stromnetz vorgeschriebene Netzkopplung im Störfall erfolgen kann. Auf Grund dieser „(n-1)-Struktur“ werden die Netzkomponenten des Wien Energie Stromnetzes (Kabel, Umspanner,...) im Normalbetrieb mit durchschnittlich 60 bis 70 % des thermischen Grenzstroms betrieben bzw. belastet, um gegebenenfalls die erwähnten nötigen Umschaltungen gewährleisten zu können. Um jedoch aus wissenschaftlicher Sicht das maximale Potenzial der Elektro-Taxistandplätze zu ermitteln, wurde bei den nachfolgenden Berechnungen der thermische Grenzstrom der Netzkomponenten als „obere“ Grenze angesetzt (entspricht 100 % Belastung).

2.1.2.3 Validierung der synthetischen Standardlastprofile durch Messreihen

Ein Teilaspekt des Projekts ZENEM liegt im Vergleich der gemessenen Leistungen mit prognostizierten Lasten. Aus der Validierung der Messreihen erhoffte man sich eingangs bei Übereinstimmung von Theorie und Praxis ein wirkungsvolles Werkzeug für die Planung von Niederspannungsnetzen zu erhalten. Durch erwartete Jahresstromverbräuche und Lastprofile ließen sich so Kabelauslastungen vorbestimmen und mittels planerischen Maßnahmen kosteneffiziente Alternativen im Überlastungsfall setzen.

Die Umsetzung der Validierung erfolgte mit Hilfe anonymisierter Kundendaten. Ein normiertes Standardlastprofil basiert auf einem Jahresstromverbrauch von 1000 kWh. Durch Gewichtung mit dem Jahresstromverbrauch wird das prognostizierte Lastprofil für diesen Verbraucher ermittelt. Diese Profile stellen das zeitliche Verbrauchsverhalten eines typischen Endverbrauchers durch normierte kundengruppen- oder branchenbezogene Verbrauchsmuster dar. Dabei wird zwischen Werktagen, Samstagen und Sonntagen sowie zwischen saisonalen Zeiträumen unterschieden.

Wird diese Vorgehensweise für sämtliche Verbraucher eines Niederspannungsstrangs wiederholt, so erhält man ein errechnetes Summenlastprofil. Abbildung 14 verdeutlicht das eben beschriebene. Zusätz-

⁴ Die Wiener Niederspannungsnetze werden aufgrund der „(n-1)-Struktur“ als „offene Ringe“ betrieben, wodurch im Störfall Netzkopplungen durchgeführt werden können.

lich sind die gemessenen Leistungsprofile eingezeichnet. Die Werte wurden hierbei auf Basis der Kategorien „Werktag“, „Samstag“ und „Sonntag“ in ihrem Tagesverlauf gemittelt.

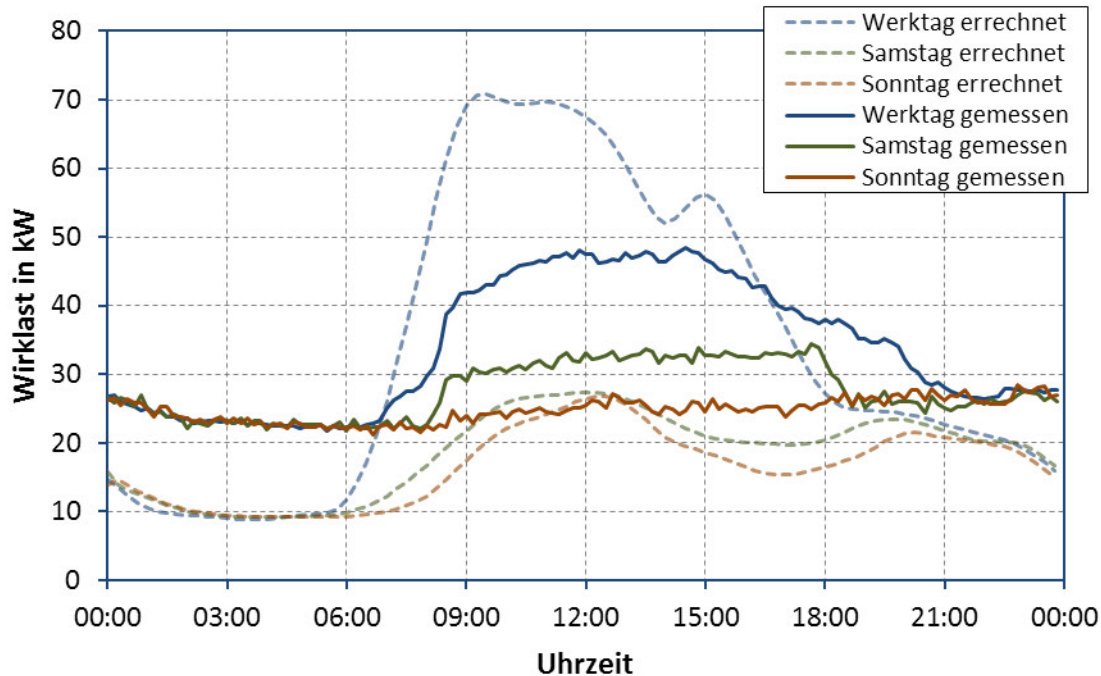


Abbildung 14: Gegenüberstellung von errechneten (synthetischen) und gemessenen Lastverläufen

Die Gegenüberstellungen von errechneten und gemessenen Leistungskurven bilden die Basis für qualitative und quantitative Aussagen über die Gültigkeit der bis dato verwendeten Standardlastprofile. Die Validierung geschah einzeln für jeden Niederspannungsstrang durch Ermittlung und Vergleich von charakteristischen Größen wie beispielsweise Maximalwert, Minimalwert, Zeitpunkt von Maxima, Länge von Leistungsplateaus, etc. aus den prognostizierten und gemessenen Leistungskurven.

Bei der Validierung der Standardlastprofile zeigen sich deutliche Abweichungen der errechneten zu den gemessenen Leistungsverläufen. Je höher der Anteil an Gewerbekunden ist, desto höher ist der Grad der Unzuverlässigkeit. Dies hängt unter anderem mit den längeren Ladenöffnungszeiten der letzten Jahre zusammen.

Als typisch können dabei die Lastkurven in Abbildung 14 gesehen werden. Vormittags laufen die gemessenen Kurven um bis zu drei Stunden den errechneten nach. Nachts ist der gemessene Stromverbrauch meist viel höher als der errechnete, was auf Klimageräte, Beleuchtung, EDV und Geräte im Stand-By-Modus zurückzuführen ist. Überhaupt zeigte sich bei den Messungen eine Abflachung der Lastkurven mit einer Reduktion der Leistungsspitzen. Die Maximalwerte treten dafür über einen längeren Zeitraum auf. Dies wirkt sich positiv auf das Stromnetz aus, das für die Spitzenbelastung ausgelegt werden muss.

Aufgrund der beobachteten Abweichungen wird eine Adaptierung der Standardlastprofile empfohlen. Trotzdem ist deren Verwendung für die Netzplanung immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden,

da zwischen der Erfassung der Jahresstromverbräuche (Zählerablesung) und der Lastprognose meist Monate liegen, in denen sich die Zusammensetzung der Kunden ändern könnte. Insbesondere die Öffnung oder Schließung von Gewerbebetrieben führt zu deutlichen Fehlprognosen.

Als abschließendes Fazit soll hier noch festgehalten werden, dass ein wirkungsvolles Werkzeug für die Netzplanung mit Hilfe von Standardlastprofilen unrealistisch ist. Die Auswertung von Messungen mit intelligenten Stromzählern („Smart Meter“) erscheint als Ansatz für weiterführende Forschungen zielführender.

2.2 Erfüllungsszenarien

In diesem Kapitel wird die Definition der Erfüllungsszenarien – von der Entwicklung bis zur Auswahl – erläutert und die Modellierung der Summenladeprofile der Ladestationen an den Taxistandplätzen beschrieben. Der Begriff „Erfüllbarkeit“⁵ bzw. die dazugehörige Erfüllungssrate gibt in diesem Zusammenhang darüber Auskunft, wie viele einzelne Wege (Fahrten), Wegeketten oder ganze Taxischichten unter den gewählten Rahmenbedingungen (Ladeleistung, Batteriekapazität und Ladestellenausbau, sowie Ladezustandsgrenzen) mit rein elektrisch betriebenen Taxis bewältigt werden könnten.

2.2.1 Szenarienentwicklung

Im Zusammenhang mit der Frage nach einer adäquaten Ladestellenausbau für elektrisch betriebene Funktaxis entwerfen zu können, muss zuerst der Frage nachgegangen werden, an welchen Orten überhaupt Ladeinfrastruktur aufgestellt werden kann. Im Taxibetrieb kommt es an den Taxistandplätzen naturgemäß – auch ohne Änderung des Fahrverhaltens – zu Standzeiten. Diese könnten direkt zum Laden der Batterien genutzt werden. Deshalb verfolgt man im Projekt ZENEM den Ansatz, dass nur an Taxistandplätzen Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht. Dabei werden die aus den GPS-basierenden Mobilitätsdaten (vergleiche Kapitel 2.1.1) ermittelten Standdauern nicht verändert.

2.2.1.1 Modellierung

Ausgehend von den aufbereiteten Mobilitätsdaten und einem im Projekt ZENEM weiterentwickelten MATLAB®-Modell ([Einf11], [Leit11]) konnten die fahrzeugexakten und szenarienabhängigen SOC-Verläufe (SOC...state of charge; Ladezustand), und darüber hinaus auch die Ladeleistungsprofile der abgebildeten E-Taxiflotte in Minutenwerten berechnet werden. In Abbildung 15 sind die dafür verwendeten Eingangsparameter dargestellt. Wird innerhalb einer simulierten Wegekette die untere SOC-Grenze verletzt, dann gilt sie für die gewählten Rahmenbedingungen als „nicht erfüllbar“ (vergleiche dazu Kapitel 2.2.1.4). Als Eingangsgrößen des Modells dienen erstens die mobilitätsspezifischen Daten, wie die zeitlichen Informationen über die Stand- und Fahrzeiten der Taxis und der berechnete Energiebedarf je Fahrt, zweitens die fahrzeugspezifischen Daten, wie die leistungsabhängige Ladecharakteristik der Fahrzeugbatterien, deren Kapazität und die Ladegrenzen und drittens die Eigenschaften der Ladeinfrastruktur, wie Standort und Ladeleistungslevel.

⁵ Die Begriffe „Erfüllbarkeit“, „Machbarkeit“ und „Realisierbarkeit“ können als Synonyme verstanden werden.

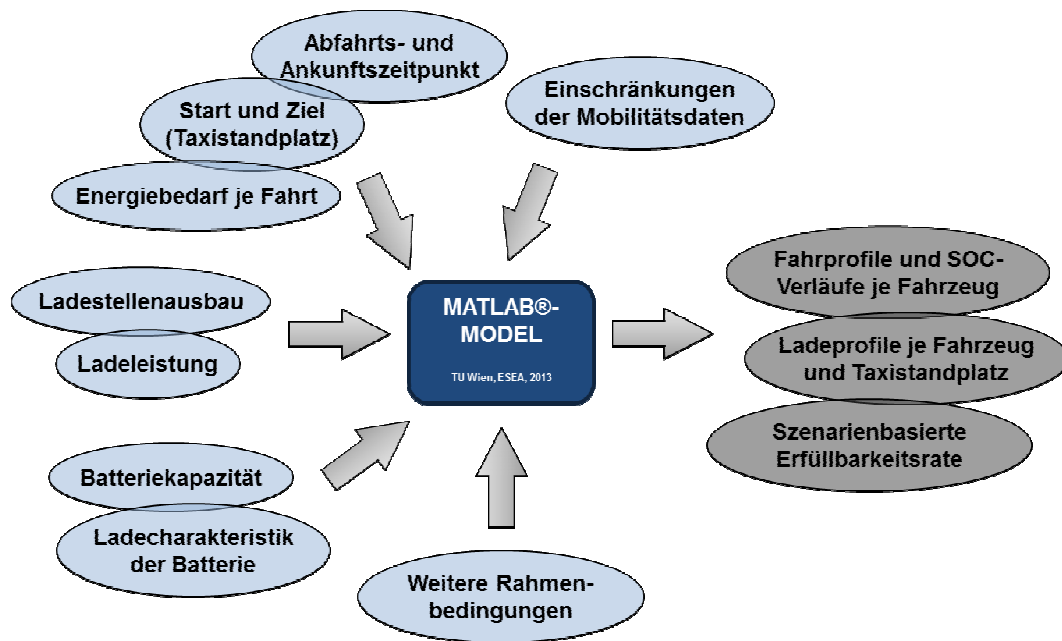


Abbildung 15: MATLAB®-Modell zur Erstellung der Ladeprofile und Ermittlung der Erfüllbarkeitsraten

Zur Einbindung der Elektrofahrzeuge in das MATLAB®-Modell wurden die Batterieeigenschaften und deren Ladecharakteristiken aus den Erkenntnissen der Wissenschaftlichen Begleitforschungen der E-Mobilitäts-Modellregionen „VLOTTE“ [Schu10] und „ElectroDrive Salzburg“ [Schu13a] übernommen. D.h. den E-Taxis wurden Akkumulatoren mit Lithium-Ionen-Technologie⁶ unterstellt und für den Ladeprozess I-U-Kennlinien zugrunde gelegt. Dabei wurde in der Konstantstromphase vereinfacht auch die Ladeleistung als konstant angenommen und in der Konstantspannungsphase ein exponentiell abklingender Leistungsterm berücksichtigt. Für Normalladung (einphasiger Anschluss, 16A) können die verwendeten Formeln und Werte in [Litz09] nachgeschlagen werden.

2.2.1.2 Dateneinschränkung

Wie in Kapitel 2.1.1 erläutert, machen es die systembedingten Eigenschaften der GPS-Datenaufzeichnung unmöglich, einzelne Taxis über das gesamte Jahr durchgängig nachzuverfolgen. Damit man jedoch trotzdem aussagekräftige Ergebnisse in Bezug auf die „Erfüllbarkeit“ bekommt, müssen einige Anpassungen des Mobilitätsdatenpools durchgeführt werden. Erstens wurden nur jene Wegeketten aus dem Datenpool ausgewählt, die gewissen Qualitätskriterien (z.B. obere Geschwindigkeitsgrenze) entsprechen und zweitens zumindest sechs Stunden durchgängig andauern. Wie im Kapitel 2.1.1.2 beschrieben wurde ein Qualitätsindikator für jede Fahrt kalkuliert. Es wurden alle Wegeketten verworfen, die Einzelfahrten mit Qualitätswerten unter 80 % aufweisen. Durch die weitere Entfernung aller Wegeketten mit einer Gesamtdauer von unter sechs Stunden, erhält man jene durchgängigen Wegeketten, die gesamte Taxischichten (Dienste) darstellen. Dadurch reduziert sich einerseits das Mobilitätsdatenpool auf ca. 90.700 Einzelfahrten, welche in Summe rund 13.300 Taxischichten repräsentieren. Andererseits erhöht sich der Median der Anzahl von Einzelfahrten je Wegekette von 3 Fahrten auf

⁶ Es wurde dabei jedoch nicht auf die genaue Spezifikation der Elektrodenmaterialien eingegangen.

7 Fahrten. In Bezug auf die Verteilungen der aggregierten Mobilitätsmerkmale der Fahrten, verschieben sich die Mittelwerte nach oben. Die durchschnittliche Distanz der Fahrten zwischen zwei Taxistandplätze erhöht sich von 12,5 km auf 18,3 km (+ 47 %) und die mittlere Standzeit am Taxistandplatz von 19,2 Minuten auf 22,1 Minuten (+ 16 %).

2.2.1.3 Auswahl der Ladestandorte

Wie eingangs erwähnt, werden im Projekt ZENEM nur Taxistandplätze als mögliche Standorte für Ladeinfrastruktur angesehen. Die dort angenommenen, modellhaften Ladestationen besitzen – entsprechend der in weiterer Folge definierten Szenarien – eine ausreichende Anzahl an Ladepunkten und offerieren den gewünschten Leistungslevel. Wien besitzt über 250 Taxistandplätze⁷ (TSP) [TSV13], welche in ihrer Gesamtheit die Menge aller möglichen Ladeinfrastrukturstandorte bilden. Zur sinnvollen Konzeptionierung eines minimalen Ladeinfrastrukturausbaus wurden nahe aneinander liegende Taxistandplätze zusammengefasst (geclustert), und im Anschluss daran die resultierenden TSP-Cluster bestmöglich nach ihrer „Wichtigkeit“ gereiht.

Clusterung der Taxistandplätze:

Für die TSP-Clusterung wurde die Straßenkarte von Wien in 6-eckige, wabenförmige Cluster mit einem Durchmesser von einem Kilometer unterteilt. Alle in einem Cluster angeordneten Taxistandplätze wurden zusammengefasst und werden in weiterer Folge – in Bezug auf die Ladevorgänge – als ein einzelner betrachtet. Dabei ist in diesem Stadium jedoch noch nicht entscheidend, an welchem Taxistandplatz tatsächlich Ladestellen zu installieren sind. Dies hängt bei einer Realisierung unter anderem von den Faktoren wie z.B. Anzahl der Stellplätze oder Vorbelastung des vorhandenen elektrischen Netzes ab. Für die dadurch teilweise entstehenden „Zusatzwege“ innerhalb der Cluster wird angenommen, dass sie sich im Mittel aufheben und deshalb energetisch vernachlässigbar sind.

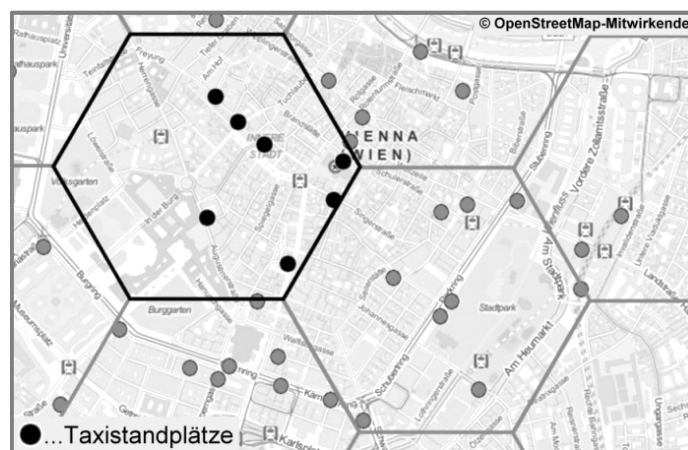


Abbildung 16: Skizze für die Clusterung der Taxistandplätze in Wien mittels Wabenstruktur (Durchmesser: 1 km); Straßenkarten aus „OpenStreetMap.org“

⁷ Etwa zwei Drittel der Taxistandplätze in Wien sind von 0 bis 24 Uhr nutzbar und der restliche Teil besteht aus zeit- oder bedarfsbeschränkten Taxistandplätzen.

Abbildung 16 skizziert die angewendete Methodik der „TSP-Clusterung“. Hierbei kann erwähnt werden, dass maximal neun Taxistandplätze in einem Cluster zusammengefasst werden und die Anzahl natürlicher Weise in Richtung Stadtrand abnimmt. Durch diese Methodik ergeben sich 162 TSP-Cluster mit zumindest einem Taxistandplatz.

Ranking der Taxistandplätze

Um der Frage nachzugehen, welche der 162 TSP-Cluster vorrangig mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden sollen, wurde ein Ranking der zusammengefassten Taxistandplätze durchgeführt. Aus dieser Fragestellung ergibt sich ein kombinatorisches Optimierungsproblem, welches auf Grund der Vielzahl möglicher TSP-Permutationen ($162! = 1,22 \cdot 10^{289}$) und der daraus resultierenden Berechnungsdauer im Rahmen des Projekts ZENEM nicht vollständig ausgewertet werden kann. Deshalb ist hier die Menge aller Taxistandplätze schrittweise in Untermengen aufgeteilt worden. Für alle Teilmengen wurde nach den jeweiligen lokalen Optima gesucht und aus diesen näherungsweise eine Lösung des Gesamtproblems ermittelt. Die Zielfunktion wird dabei durch die schon beschriebene „Erfüllbarkeit“ der Wegeketten gebildet, welche es galt zu maximieren. Die Berechnung wurde mit dem zuvor beschriebenen MATLAB®-Modell durchgeführt und ausgewertet.

Für die nachfolgende Ermittlung der Erfüllbarkeitsraten werden je nach Szenario und dem damit verbundenen Ladeinfrastrukturausbau mehr oder weniger Taxistandplatz-Cluster modellhaft mit Ladestellen ausgestattet. Dabei wird mit dem „Wichtigsten“ TSP-Cluster begonnen und dann der Reihe nach die nächsten herangezogen.

Werden die Taxistandplätze aller Cluster nach dem „Ranking“ gewichtet und ihren Bezirken zugeordnet, dann erhält man ebenfalls eine Reihung der Wiener Gemeindebezirke, an denen vorrangig Ladeinfrastruktur entstehen sollte.

Tabelle 2: Gewichtetes Ranking der Cluster aller Taxistandplätze bezogen auf die jeweiligen Gemeindebezirke

Reihung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wiener Gemeindebezirk	8	4	1	5	9	7	3	16	20	17	6	2
Reihung	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Wiener Gemeindebezirk	18	19	12	14	15	13	21	10	23	22	11	

2.2.1.4 Ermittlung der Erfüllbarkeitsraten

Im Projekt ZENEM wird von der „Erfüllbarkeit einer Wegekette“ eines E-Taxis gesprochen, wenn der Batterieladezustand am Ende der Wegekette (Abmeldung⁸ des Taxis vom System der Vermittlungsgesellschaft) größer oder gleich ist, als jener am Beginn (Anmeldung) und dazwischen niemals seine

⁸ Eine Abmeldung des Taxis vom Vermittlungssystem kann einerseits einen Chauffeurwechsel bedeuten, aber andererseits auch nur eine Pause des Taxilenkers bzw. einen Verbindungsfehler zum System.

Grenze (SOC_{MIN} von 5 % gewählt⁹) unterschritten wird. Für einen SOC_{START} und einen SOC_{END} von 50 % ist die höchste „Erfüllbarkeit“ der Wegeketten gegeben. Bei kleiner bzw. größer gewählten Ladezustandswerten sind die Distanzen der ersten bzw. der letzten Wege für ein schlechteres Ergebnis verantwortlich. Durch Wahl dieser Methodik können beliebige Funktaxischichten miteinander verknüpft werden, ohne den Energiebedarf dabei zu verschleppen bzw. die Energiebilanz zu verfälschen.

Eine weitere Begründung für die Gleichsetzung des SOC_{END} mit dem SOC_{START} ist, dass großteils die Schichten zeitlich nahtlos aneinander folgen und somit nicht die Gelegenheit besteht, das E-Taxi z.B. über Nacht am Abstellplatz wieder vollzuladen. Das bedeutet, dass die Ergebnisse vor allem für Taxis mit Mehrschichtbetrieb gelten.

Bei einem Einschichtbetrieb könnten die SOC-Grenzen deutlich verschoben und die Fahrzeugbatterie besser ausgenutzt werden. Also findet überschlagsmäßig ein rein elektrisch betriebenes Taxi, welches nur von einem Chauffeur gelenkt wird und mit einer Batteriekapazität von 24 kWh (48 kWh) ausgestattet ist sowie nur eine Lademöglichkeit am gesetzlich vorgeschriebenen Abstellplatz [BGB96] besitzt, für Tage mit Fahrleistungen von in etwa 100 km (200 km) auch ohne Schnellladeinfrastruktur an den Taxi-standplätzen das Auslangen.

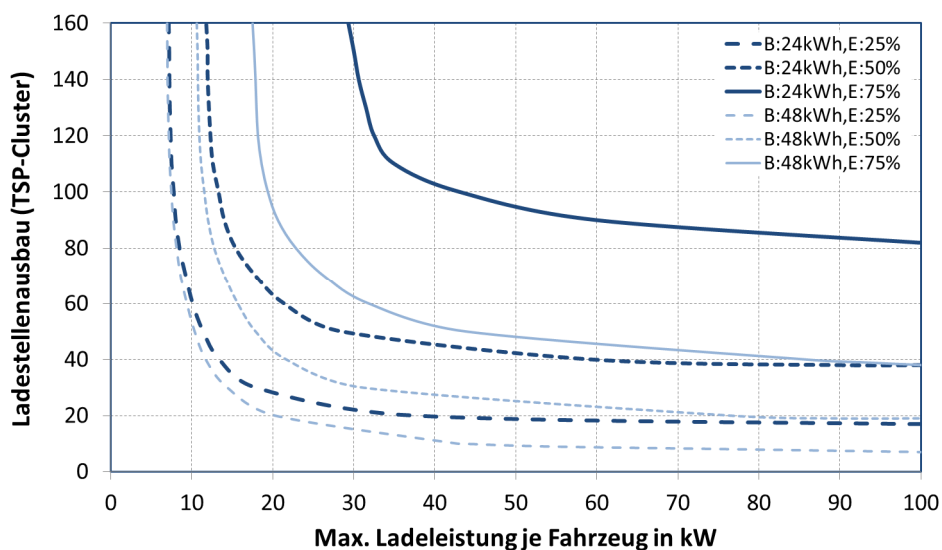


Abbildung 17: Notwendiger Ladestellenausbau bzw. Ladeleistung für unterschiedliche Erfüllbarkeitsraten (E) und Batteriekapazitäten (B)

Zur Berechnung der jeweiligen Erfüllbarkeitsrate wurde der Raum aller möglichen Szenarien durch die Parameter „Batteriekapazität“ (16 bis 48 kWh), „Ladeleistung“ (AC: 3,7 kW bis DC: 100 kW) und „Ladestellenausbau“ (von einigen wenigen TSP mit Ladeinfrastruktur bis zum totalen Ausbau) aufgespannt. Durch kombinatorische Variation dieser Stellgrößen mit diskreten Schrittweiten innerhalb ihrer vordefinierten Parametergrenzen wurde mit Hilfe des MATLAB[®]-Modells die prozentuale Erfüllbarkeitsrate für jeden betrachteten Fall berechnet. Das endgültige, auf Funktaxischichten eingegrenzte, Mobilitätsdaten-

⁹ Die nutzbare wurde im Vergleich zur „verbauten“ Batteriekapazität um 10 % verringert angenommen. Der Wert stammt aus einer Analyse im Rahmen der E-Mobilitäts-Modellregion „ElectroDrive Salzburg“.

pool besteht aus 13.295 durchgängigen Wegeketten. Ergibt die Simulation, dass z.B. 6.000 Wegeketten unter dem gewählten Parameterset und ohne Verletzung der Batteriegrenzen bewältigbar sind, bedeutet das eine Erfüllbarkeitsrate von ca. 45 %.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für die Fälle der Kombination aus zwei Batteriekapazitäten (24 und 48 kWh) und drei Erfüllbarkeitswerten (25, 50 und 75 %). Wird bei festgehaltenen Werten für Batteriekapazität und „Erfüllbarkeit“ der Ladestellenausbau (Anzahl der mit Ladeinfrastruktur ausgestatteten TSP-Cluster) und die max. Ladeleistung (Anschlussleistung je Ladepunkt) variiert, ergeben sich die abgebildeten Kurven.

Für ein Szenario mit einer Erfüllbarkeitsrate von z.B. 25 % und einer Batteriekapazität¹⁰ von 24 kWh¹¹ je E-Taxi müssten, unter den implizierten Rahmenbedingungen, bei einer max. Ladeleistung von 22 kW (AC, 3 x 230 V x 32 A) etwa 26 Taxistandplätze und bei 50 kW (DC, 400 V x 125 A) rund 20 TSP mit Ladestellen ausgestattet werden. Für Szenarien mit einer Erfüllbarkeitswert von z.B. über 75 % und 24 kWh reichen 22 kW, auch bei einem totalen Infrastrukturausbau, nicht mehr aus. Um jedoch den Ausbau innerhalb eines vertretbaren Maßes zu halten, erscheinen Ladeleistungen von 50 kW als vernünftig. Eine weitere Erhöhung auf z.B. 100 kW bringt weniger als eine entsprechende Vergrößerung der Batteriekapazität bzw. Ausweitung der Ladeinfrastruktur (vergleiche dazu Abbildung 17).

Weiters zeigen alle Analysen der „Erfüllbarkeit“ – über den weiten Bereich der Parametervariation – deutlich, dass die gemessenen Standzeiten an den Taxistandplätzen zu kurz sind um mit Normalladen (Anschlussleistung von 3,67 kW, einphasig) den elektrischen Energiebedarf unter den gewählten Rahmenbedingungen zu decken. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Anzahl der mit Ladeinfrastruktur ausgestatteten TSP-Cluster (siehe Abbildung 4).

2.2.2 Szenarienauswahl

Aus den Ergebnissen der Erfüllbarkeitsanalyse wurden fünf zentrale Szenarien gewählt, die in weiterer Folge als Grundlage für die Netzsimulationen dienen (siehe Kapitel 2.2.2).

In Tabelle 1 sind die ausgewählten Parameter der fünf formulierten Szenarien aufgelistet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Szenarien einen weiten Bereich der Erfüllbarkeitsraten abdecken. Beginnend bei einem mit etwa 25 % bis hin zu jenem mit über 80 % „Erfüllbarkeit“ (vergleiche Abbildung 18). Für die Szenarien 1 bis 4 wurde die Ladeleistung je Ladepunkt mit 50 kW (Schnellladen mit Gleichstrom) festgelegt, was aus netztechnischer Sicht den kritischeren Fall darstellt. Weiters wurden in diesen vier Szenarien zwei Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur (20 und 55 TSP-Cluster) definiert und zwei unterschiedliche Batteriekapazitäten (24 und 48 kWh) ausgewählt. Das Szenario 1a deckt den Fall ab, dass geringere Ladeleistungen an den Ladepunkten verfügbar sind. Dabei wurde eine Anschlussleistung von 22 kW (Schnellladen mit Wechselstrom / 32 A) gewählt. Die Reduktion der Ladeleistung wird durch eine Ver-

¹⁰ Die nutzbare Batteriekapazität und der Wirkungsgrad des Lademanagements wurden jeweils mit 90 % festgelegt.

¹¹ Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge besitzen heute unter anderem Batteriekapazitäten von 24 kWh, wie z.B. der Nissan Leaf mit einem Lithium-Mangan-Akkumulator [TDN13].

stärkung des Ladestellenausbaus ausgeglichen. Mit Ladestellen an 26 Taxistandplätzen ergibt sich dieselbe „Erfüllbarkeit“ wie im Szenario 1.

Tabelle 3: Parameterwerte der fünf gewählten Szenarien

Parameter	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 1a
Ladeleistung	50 kW				22 kW
Ladestellenausbau	20 TSP-Cluster		55 TSP-Cluster		26 TSP-Cluster
Batteriekapazität	24 kWh	48 kWh	24 kWh	48 kWh	24 kWh

Es zeigt sich, dass im Szenario 1 mit heute gängigen Batteriekapazitäten von 24 kWh (z.B. Nissan Leaf [TDN13]), aktuell möglichen Schnellladeleistungen von 50 kW (z.B. CHAdeMO®-Standard [CTS13]) und einem Ladestellenausbau an 20 Taxistandplätzen über 25 % der analysierten Wegeketten erfüllt werden können (siehe Abbildung 18). Batteriekapazität und Ladestellenausbau haben naturgemäß den stärksten Einfluss auf die „Erfüllbarkeit“ der Fahrten. Werden 48 kWh je Fahrzeug vorausgesetzt und 55 TSP mit Ladeinfrastruktur ausgestattet, so können sogar 80 % der betrachteten Wegeketten unter den gegebenen Rahmenbedingungen bewältigt werden. Wie in Abbildung 18 ersichtlich, kann ein Erfüllbarkeitswert von 100 % nicht erreicht werden, auch wenn nach jeder Fahrt die Möglichkeit einer Schnellladung geboten wird. Grund dafür ist eine Kombination aus zu langen Einzelwegen (bzw. zu kleinen Batteriekapazitäten) gepaart mit zu kurzen, darauffolgenden Standzeiten.

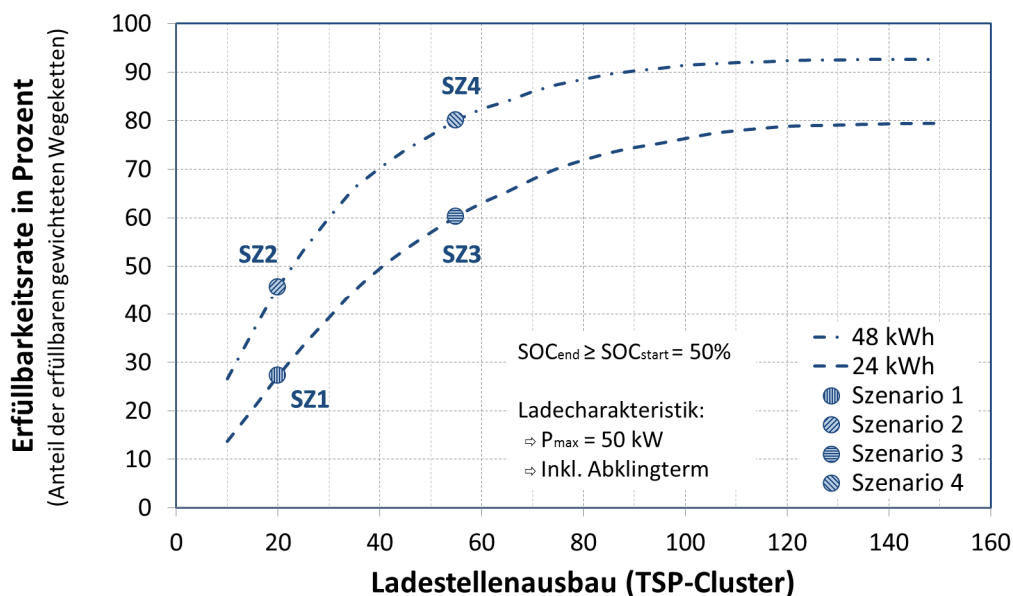


Abbildung 18: Prozentuelle Erfüllbarkeitsrate der vier betrachteten Szenarien [Litz13]

Der Grid-to-Wheel-Verbrauch ist bei einem Elektrofahrzeug nicht nur vom Fahrstil und von der Geschwindigkeit abhängig, sondern u.a. ebenfalls von der Außentemperatur und der Anzahl der eingeschalteten Nebenverbraucher (z.B. Kühlung bzw. Heizung). Variiert man den GTW-Verbrauch und steigert diesen z.B. um 10 % (20 %), so verringert sich der Erfüllbarkeitswert der fünf Szenarien im Mittel um einen absoluten Wert von rund 4 % (8 %).

2.2.3 Summenladeprofile

Jedes Elektrofahrzeug verursacht beim Laden ein zeitabhängiges Leistungsprofil. Wird z.B. an einem Taxistandplatz (TSP) eine Ladestelle mit vier Ladepunkten und einer Anschlussleistung von je 50 kW installiert, dann würde bei ungesteuerten Ladeprozessen das elektrische Netz zusätzlich mit bis zu 200 kW belastet. Da nicht immer alle Ladepunkte belegt sind und die Ladeleistung ab einem gewissen Ladezustand reduziert wird (zum Schutz der Batterie vor Überladung), tritt der max. Leistungswert nicht dauerhaft auf. Für eine „Worst Case“-Betrachtung (nachstehend als „Fall A“ bezeichnet) wurde jedoch genau dieser Sachverhalt, nämlich dass die E-Taxis während der gesamten Aufenthaltsdauer mit max. Ladeleistung geladen werden (unabhängig vom Ladezustand), untersucht. Für die Kategorien „Mo-Do“, „Fr“, „Sa“, „So“, „Feiertag“ und „Tag vor Feiertag“, welche sich durch andersartige Mobilitätseigenschaften unterscheiden (vergleiche Kapitel 2.1.1.2), wurde der max. Leistungswert¹² je Minute (z.B. 17:43 Uhr) berechnet. Im Gegensatz zur Erfüllbarkeitsanalyse wurden bei der Erstellung der Summenladeprofile (Fall A und B) alle Wegeketten – auch jene kleiner als sechs Stunden – berücksichtigt, da sonst der Energie- und Leistungsbedarf der Funktaxiflotte unzulässig verfälscht würde.

Tabelle 4: Mittel- und Maximalwerte der Summenladeprofile aller TSP-Cluster für die fünf gewählten Szenarien (Zeitbasis: Minutenwerte mit $P_{Laden} > 0$, Kalenderjahr 2011)

Szenario	Parameter	Kleinsten Mittelwert (kW)	Größten Mittelwert (kW)	Kleinsten Maximalwert (kW)	Größten Maximalwert (kW)
1	24 kWh / 20 TSP-C. / 50 kW	29,9	37,9	175,1	304,4
2	48 kWh / 20 TSP-C. / 50 kW	44,1	60,1	214,0	351,1
3	24 kWh / 55 TSP-C. / 50 kW	25,5	35,4	128,2	253,4
4	48 kWh / 55 TSP-C. / 50 kW	37,4	54,6	154,9	347,6
1a	24 kWh / 26 TSP-C. / 22 kW	18,0	26,4	73,3	177,2

In der zweiten Betrachtung, dem Fall B („SOC-abhängig“), wurden verglichen zum Fall A („Worst Case“) nicht die Maximalwerte der TSP-Belegung mit der Anschlussleistung je Ladepunkt multipliziert, sondern das zeit- und SOC-abhängige Ladeleistungsprofile für jedes Fahrzeug in Minutenwerten berechnet. Dadurch reduziert sich die Minuten-Leistungswerte im Fall B entsprechend (siehe Abbildung 19). Summiert man diese Einzelladeprofile je Fahrzeug und je Taxistandplatz über das gesamte Jahr 2011, unter Berücksichtigung der gewählten Ladeinfrastruktur, dann ergeben sich die erwünschten Summenladeprofile je Taxistandplatz.

Abbildung 20 zeigt das Summenladeprofil (Fall B) eines beispielhaften TSP. Das Szenario 2 (50 kW je Ladepunkt und 48 kWh je Fahrzeug) besitzt mit 351 kW den höchsten „max. Summenladeleistungswert“ aller TSP-Ladeleistungsprofile. Dabei wurde bei der Ladestelle mit dem höchsten Spitzenleistungswert

¹² Maximalwert der Taxistandplatzbelegung multipliziert mit der Anschlussleistung je Ladepunkt.

an rund 61 % der Zeit gar kein Fahrzeug geladen. Für alle Minutenwerte in denen zumindest ein Fahrzeug lud, ergibt sich für das simulierte Jahr 2011 ein Leistungsmittelwert dieses Taxistandplatzes von 50,6 kW (vergleiche Tabelle 4).

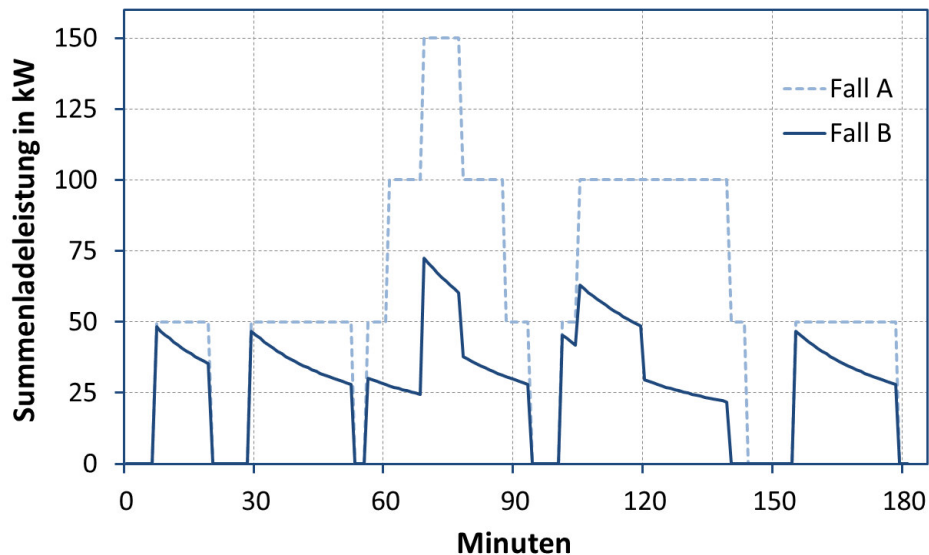


Abbildung 19: Vergleich der TSP-Summenladeprofile der Fälle A und B
(Anschlussleistung je Ladepunkt: 50 kW)

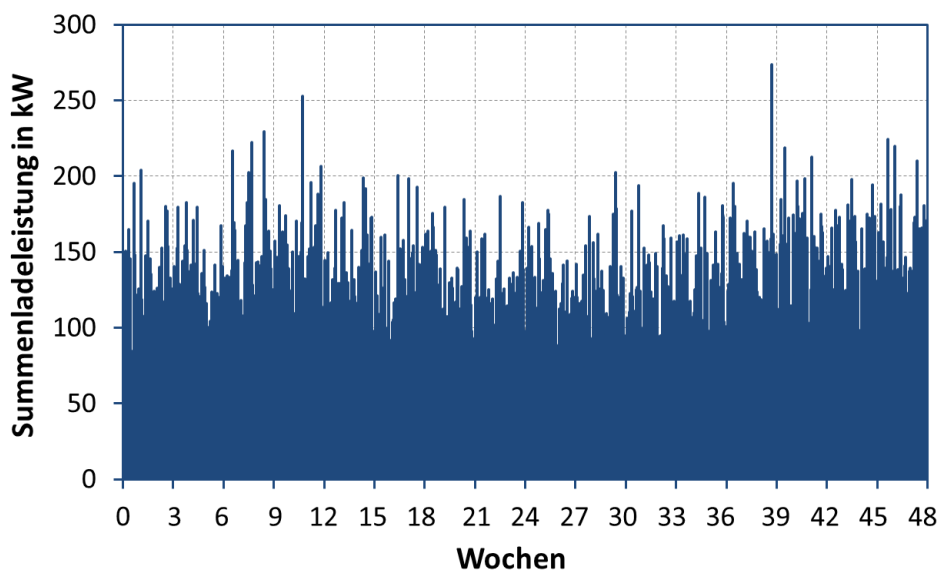


Abbildung 20: Summenladeprofil eines beispielhaften Taxistandplatzes
(Fall B, Anschlussleistung je Ladepunkt: 50 kW)

Die Maximal- und Mittelwerte je TSP ändern sich für die betrachteten Szenarien relativ stark mit der gewählten Batteriekapazität, jedoch nur wenig mit der Anzahl der hinterlegten Ladestellen. Von Szenario 1 (SZ 1) auf Szenario 2 wird die Batteriekapazität verdoppelt und es können dadurch fast 2-mal so viele Taxischichten (Wegekettens) erfüllt werden (vergleiche Kapitel 2.2.1.4). Daraus folgen ein erhöhter Ladebedarf an den betroffenen Ladestellen und ein entsprechender Anstieg der Maximal- und Mittelwerte. Analoges gilt für den Übergang von Szenario 3 auf Szenario 4. Wird jedoch bei gleichbleibender Batte-

riekapazität der Ladestellenausbau erhöht (wie von SZ 1 auf SZ 3 bzw. von SZ 2 auf SZ 4), so kann an zusätzlichen Ladestellen geladen werden und der steigende Energiebedarf verteilt sich. Dadurch bleiben die Maximal- und Mittelwerte fast gleich bzw. sinken unter diesen Rahmenbedingungen sogar leicht, trotz deutlicher Verbesserung der „Erfüllbarkeit“.

Für die im Folgekapitel erläuterten Analyse der Netzauswirkungen, wurden die notwendigen Summenladeprofile je Taxistandplatz für alle fünf Szenarien und weiters für beide unterschiedlichen Fälle A („Worst Case“) und B („SOC-abhängig“) kalkuliert.

2.3 Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den vorhergehenden Kapiteln über den elektrischen Verbrauch und die Ladeszenarien werden nun die Netzintegration und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Netzstabilität und thermischen Belastungen des Niederspannungsnetzes betrachtet. Dies wird mittels Berechnung der Lastflüsse einzelner Szenarien an verschiedenen Netzabschnitten ermittelt. Weiters wird, mit Zuhilfenahme vereinfachter thermischer Modelle, auf die Alterung von Transformatoren und Leitungen bei temporären Überlastungen geschlossen. Eine prinzipielle Alternative der Netzüberlastungen stellt außerdem die Ladesteuerung der E-Taxis dar, welche abschließend beschrieben wird.

Ziel des Projekts ZENEM ist es, die Integration der E-Taxis mit geringstem Netzerneuerungsaufwand zu bewerkstelligen, um Ressourcen zu sparen. Die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Niederspannungsnetze bilden somit die Ausgangssituation der Netzsimulationen. Derzeitige Netzkomponenten des Wiener NS-Netzes werden aus Gründen erhöhter Zuverlässigkeit nicht zur Gänze ausgelastet. Diese „(n-1)-Struktur“ gewährleistet durch die Möglichkeit von Netzkopplungen eine schnelle Wiederversorgung aller Hausanschlüsse bei Kabel- und Transformatorschäden. Da diese Art von Netzmanagement in jedem Netzabschnitt durchgeführt wird, sind alle Netzkomponenten in „Spitzenzeiten“ zu max. 70 % ausgelastet und der Rest steht dementsprechend als Netzreserve zur Verfügung.

Im Projekt ZENEM werden Auslastungen bis max. 100 % (thermischer Grenzstrom) als zulässig definiert, damit das aus wissenschaftlicher Sicht maximale Potential der Elektro-Taxistandplätze ermittelt werden kann. Die „(n-1)-Struktur“ sollte jedoch mit einem etwas komplexeren Management der vielen Netzkopplungsmöglichkeiten immer noch möglich sein.

2.3.1 Netzbelastungen und Spannungsverhältnisse

Die Daten und Informationen der fünf Niederspannungsnetze aus Kapitel 2.1.2 sowie die Summenladeprofile der relevanten Taxistandplätze aus Kapitel 2.2.3 wurden in die Netz-Simulationsumgebung eingepflegt. Diese Umgebung besteht aus mehreren MATLAB®-Routinen¹³, welche NEPLAN®-Simulationen starten und deren Ergebnisse analysiert. Abbildung 21 zeigt schematisch das Zusammenspiel dieser. Die MATLAB®-Routinen erstellen einerseits je nach Betrachtungsfall und -szenario aus den Leistungswerten der Haushalte und E-Taxiladevorgängen Textdateien für die einzelnen NEPLAN®-Lasten. Mithilfe dessen berechnet NEPLAN® die gesuchten Lastflussergebnisse, welche andererseits

¹³ Hierbei wurde auf die Ergebnisse aus [Lann12] aufgebaut.

durch die MATLAB®-Routinen wieder eingelesen und verarbeitet werden. Aufgrund zeitintensiver Simulationsdauer musste dieses Zusammenspiel der zwei Programme automatisiert ablaufen.

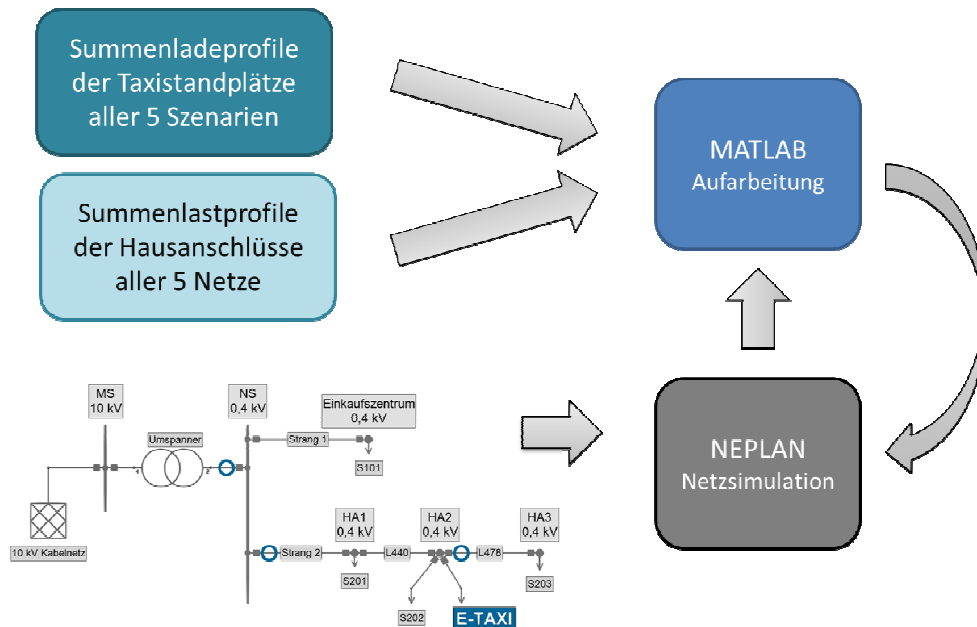


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Simulationsumgebung zur Ermittlung der Netzauswirkungen

Die Netzbelastungen wurden in zwei Fällen (Fall A und B) betrachtet (siehe dazu auch Kapitel 2.2.3). Hauptsächlichster Unterschied dieser zwei Fälle liegt hierbei in den verwendeten E-Taxiladeprofilen. Im Fall A wurden die Ladeleistungsprofile der Maximalbelegungen verwendet. Daraus können Belastungsmaxima in den fünf betrachteten Netzen berechnet werden. Zeitliche Belastungsverläufe sind hingegen damit nicht ersichtlich. Mit den SOC- und szenarienabhängigen Leitungsprofilen (Fall B) sind jedoch auch chronologische Verläufe möglich. Im Folgenden werden die Methodiken und Ergebnisse beider Fälle dargestellt.

2.3.1.1 Spannungshaltung und „Power Quality“ (Fall A)

Der Fall A wurde mit allen betrachteten NS-Netzen (Netz 1 bis 5) in den jeweiligen Messzeitdauern (rund 4 Wochen) simuliert. Da die Netze zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen worden sind, wurden die Maximalleistungsprofile der E-Taxis, welche in den Kategorien „Mo-Do“, „Fr“, „Sa“, „So“, „Feiertag“ und „Tag vor Feiertag“ vorlagen, für jedes Netz einzeln zusammengestellt. Die so ermittelten Ladeprofile des dort gelegenen Standplatzes sowie jene von zwei stark frequentierten Plätzen sind als zusätzliche Last in den Netzen modelliert worden. Die zwei „E-Taxi-Hotspots“ sind bei allen betrachteten Netzen gleich, um somit eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Netzstrukturen zu erhalten.

Um unsymmetrische Simulationen durchführen zu können, wurde auf die Möglichkeit – in NEPLAN® mit sogenannten Messgeräten zu arbeiten – verzichtet. Daher war es notwendig mittels MATLAB®-Routinen Leistungsprofile (Wirk- und Blindanteil je Phase) der einzelnen Hausanschlüsse gemäß den Jahresenergieverbräuchen zu berechnen. Diese Berechnungen sind vergleichbar mit denen unter Zuhilfenahme der NEPLAN®-Messgeräte und besitzen weiters den Vorteil der unsymmetrischen Belastungsergebnisse.

Die Simulationen wurden im Minutenraster durchgeführt sowie die Auslastungen der wichtigsten Komponenten (Trafo/Umspanner und Strangleitungen) und die Spannungshaltung aller Knotenpunkte berechnet. Alle Netzanalysen wurden bei fixer primärseitiger Trafospaltung von + 2 % durchgeführt. Diese Stufenstellereinstellung ist typisch im Wiener NS-Netz, da sich im Allgemeinen nur Verbraucher, aber keine dezentralen Erzeuger, im Netz befinden und daher die Knotenspannungen Richtung Strangende stets abnehmen.

Die Ergebnisse aus dem Fall A zeigen, dass die Spannungshaltung im Allgemeinen keine Problematik darstellt, da die „Stadtnetze“ eine längenmäßig geringe Ausdehnung besitzen. Nur im Netz 1 können bedingt durch die E-Taxis auf ein paar Knoten Unterspannungen (U_n -10%) auftreten. Jedoch nur für sehr kurze Zeitdauern, welche nach DIN EN 50160 noch zulässig sind. Bei Niederspannungsnetzen mit großflächiger Ausdehnung (eher „ländliche“ Netze) oder anderer Stufenstellereinstellungen aufgrund dezentraler Erzeuger könnten allerdings Spannungsproblematiken entstehen. Die Ergebnisse der Stromauslastungen der Netzkomponenten (Umspanner und Strangleitungen) werden folgend anhand des Falls B noch näher erläutert.

Im Sinne der „Power Quality“ wurden die Ergebnisse der Netzanalysen auf die Einhaltung der Pegelwerte nach DIN EN 50160 und den Kriterien aus „VDN-Technische Regeln“ geprüft und bewertet.¹⁴ Die bei diesen Simulationen relevanten Merkmale sind:

- Langsame Spannungsänderungen: 95 % der 10-min-Mittelwerte der Netzspannung
- Spannungsunsymmetrie: 95 % der 10-min-Effektivwerte einer Woche: $U_{\text{gegen}} \leq 0,02 \cdot U_{\text{mit}}$

Simulationsergebnisse des Falls A, welcher die größte Herausforderung an das Netz darstellt, zeigen, dass die Pegelwerte obiger Merkmale in allen Fällen eingehalten werden. Auch mit den maximalen E-Taxiladungen bleiben (in der betrachteten Messperioden von rund 4 Wochen) diese Netzparameter innerhalb der erlaubten Grenzen. Die Güte der elektrischen Versorgung ist daher durch die zusätzlichen Schnellladevorgänge der E-Taxis nicht verändert bzw. beeinträchtigt worden. Bedingt durch die dreiphasigen Ladeanschlüsse der E-Taxis wird die „Power Quality“ (vor allem Spannungsunsymmetrie) im Netz nicht schlechter.

Folgende Analysen des Ladeverhaltens derzeitiger Elektroautos mit Normalladung (max. 3,7 kW) aus der Elektromobilitätsmodellregion „ElectroDrive Salzburg“ stehen außerdem zur Verfügung:

- U-I-Profil
- Leistungsfaktor
- Oberschwingungen
- Zwischenharmonische
- Flicker

¹⁴ Für weitere Informationen siehe [Schl08].

Die detaillierten Ergebnisse sind im Endbericht der Begleitforschung der Elektromobilitätsmodellregion „ElectroDrive Salzburg“ ersichtlich (siehe dazu [Schu13a]).

Als Lösungsansatz zur Reduktion auftretender Netzurückwirkungen, welche aufgrund der Spannungsunsymmetrie entstehen, kann im Allgemeinen ein genereller symmetrischer Anschluss aller Lademöglichkeiten gesehen werden. Im Fall der obig betrachteten E-Taxiladevorgänge ist dies bereits der Fall und daher sind keine weiteren Lösungsansätze notwendig.

2.3.1.2 Stromauslastungen der Umspanner und Strangleitungen (Fall B)

Die Netzanalysen im Fall B wurden auf Basis der fünf ausgewählten Erfüllungsszenarien (siehe Kapitel 2.2.2) aufgebaut. Hierbei wurden Ganzjahressimulationen (ersten 48 Wochen im Jahr 2011) der Auslastungen der Umspanner und der entscheidenden Strangleitungen durchgeführt. Um die E-Taxis im Netz abbilden zu können, wurden je nach Szenario alle Taxistandplatzladeprofile des Jahres 2011 zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 2.2.3). Da die Messperioden der einzelnen Netze rund 4 Wochen waren, wurden diese wiederholend hintereinander gereiht. Somit stehen volle 48 Wochenprofile für Haus- und E-Taxiverbrauch im Ein-Minutenraster zur Verfügung.

Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedlichen Taxistandplatzprofilen ist eine Simulation des ganzen Jahres sehr zeitaufwendig. Zur Lokalisierung der relevanten Profile sollen jedoch alle Profile im gesamten Zeitbereich simuliert werden. Um dies zu bewerkstelligen, wurden die Leistungsprofile auf 15 Minuten gemittelt. Anhand der Ergebnisse wurden im Anschluss (für die thermische Modellierung) weitere genauere Analysen zu Spitzenauslastungen durchgeführt.

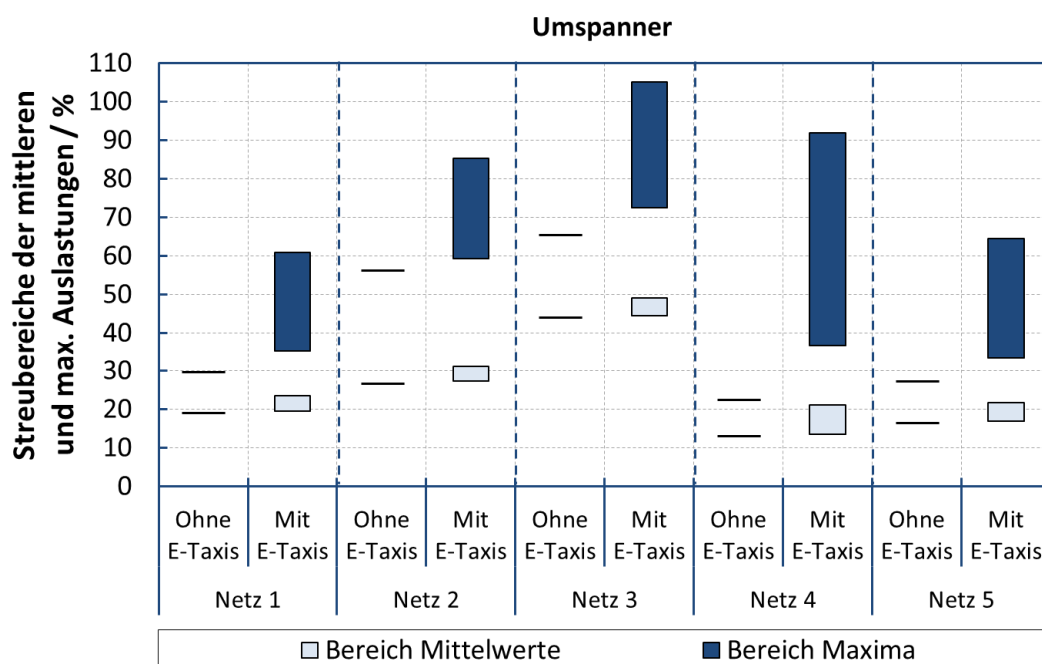


Abbildung 22: Streubereiche der mittleren und maximalen Umspannerauslastungen der Szenarien 1 bis 4 in Prozent der Nennwerte; aufgetragen für die Netze 1 bis 5 ohne und mit ungesteuerten E-Taxis

Die in den betrachteten Netzen verwendeten Transformatoren (Umspanner) besitzen Nennleistungen von 630 bzw. 800 kVA. Diese Umspanner sind in drei der fünf Netze nur sehr gering ausgelastet (Maxima unter 30 %). Einzig im Netz 3 ergeben sich Spitzenauslastungen von rund 65 %. Werden diese Umspanner zusätzlich durch E-Taxiladevorgänge belastet, so erhöhen sich die Auslastungen. Entsprechend den fünf Erfüllbarkeitsszenarien sowie den unterschiedlichen Taxistandplätzen ergeben sich Streubereiche der mittleren und maximalen Auslastungen (siehe Abbildung 22). Diese zeigt die Auslastungen in Prozent der Nennwerte bei derzeitiger Belastung („Ohne E-Taxis“) und mit allen im Projekt simulierten Taxistandplatzprofilen („Mit E-Taxis“). Diese Abbildung fasst hierbei alle fünf NS-Netze überblicksmäßig zusammen.

Durch die Einbindung der ungesteuerten E-Taxis kommt es bei einem Netzumspanner vereinzelt zu Überlastungen, jedoch nur in marginaler Ausprägung (0,06 ‰ der gesamten Simulationsdauer von 48 Wochen) bei speziellen Taxistandplatzprofilen und Szenarien. Alle anderen Spitzenauslastungen erreichen nie die 100%-Marke. Die Maxima der Umspannerauslastungen erhöhen sich um min. 5 % bis max. 70 %. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Auslastungen bedingt durch ungesteuerte E-Taxis an den Umspannern durchwegs im unproblematischen Bereich liegen. In Ausnahmefällen müssen diese Transformatorbelastungen näher betrachtet werden.

Die zweite im Fall B betrachtete Netzkomponente stellt die Strangleitung dar. Diese ist jenes Leitungstück, welches einen Niederspannungsabzweig mit der Sammelschiene des Umspanners verbindet. Folglich fließen alle Ströme der nachfolgenden Verbraucher in Summe durch ihn. Abbildung 23 zeigt analog zum Umspanner wieder die Streubereiche der mittleren und maximalen Auslastungen der relevanten Strangleitungen in Prozent der Nennwerte bei derzeitiger Belastung („Ohne E-Taxis“) und mit allen im Projekt simulierten Taxistandplatzprofilen („Mit E-Taxis“). Zusätzlich stellt die rechte Ordinate die maximale Häufigkeit der auftretenden Überlastung (entspricht einer Auslastung höher 100 %) in Promille der gesamten Simulationsdauer (48 Wochen) dar.

Bei derzeitiger elektrischer Belastung befinden sich alle maximalen Leitungsauslastungen unter 50 %. Im Gegensatz zum Umspanner treten jedoch in den Strangleitungen aller betrachteten Netze und Szenarien starke und relevante Überlastungen im ungesteuerten Fall auf. Die Spitzenwerte liegen im Bereich von 170 % bis fast 200 % (siehe Abbildung 23). Die Bereiche der Maxima reichen durchwegs über die maximale Nennbelastung. Betrachtet man die auftretenden Häufigkeiten, so zeigt sich, dass diese Überlastungen mit maximal 16 ‰ der gesamten Simulationsdauer eher selten auftreten. Für die Ganzjahresbetrachtung ergeben sich daraus in Summe rund 5 Tage. Es gibt vereinzelte E-Taxi-Ladestation, deren Summenladeprofile dennoch zulässig sind, da es durch sie zu keiner Überlastung kommt. In allen Netzen stellen die Summenladeprofile der TSP des „Szenario 2“ die größten Auswirkungen dar, gefolgt vom „Szenario 4“. Die geringsten Netzauswirkungen sind tendenziell im „Szenario 3“ bzw. „Szenario 1a“ zu finden, wie auch Abbildung 26 auf Seite 44 beispielhaft zeigt. Zusammenfassend sind Strangleitungen bei der Einführung der Elektromobilität in Städten via E-Taxis am stärksten betroffen, und in allen der betrachteten Niederspannungsnetze und Szenarien müssen Adaptionen (z.B. Ladesteuerungen) durchgeführt werden.

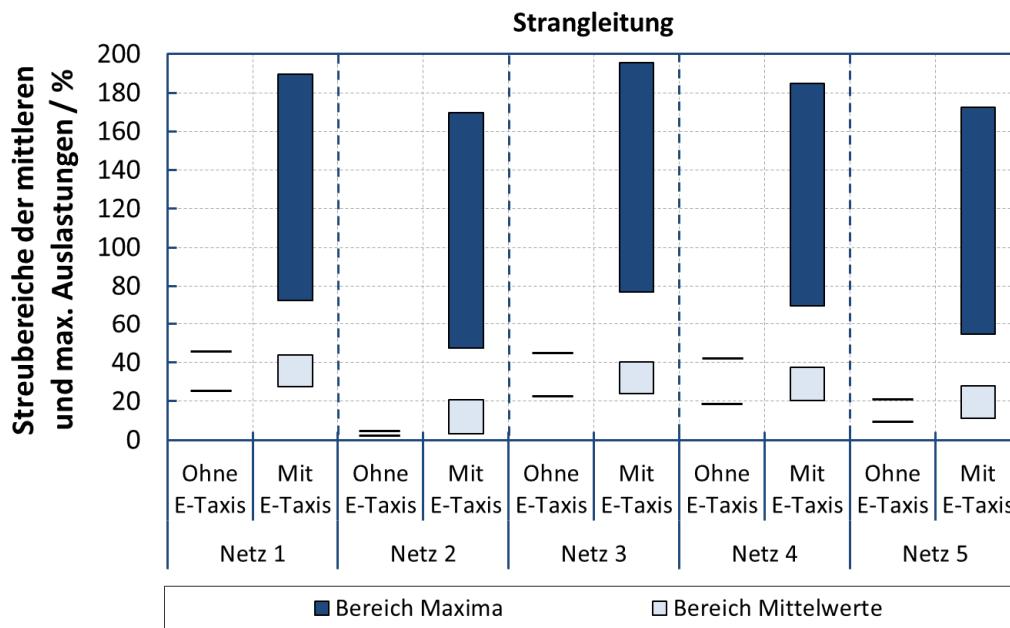


Abbildung 23: Streubreiche der mittleren und maximalen Strangleitungsauslastungen der Szenarien 1 bis 4 in Prozent der Nennwerte; aufgetragen für die Netze 1 bis 5 ohne und mit ungesteuerten E-Taxis

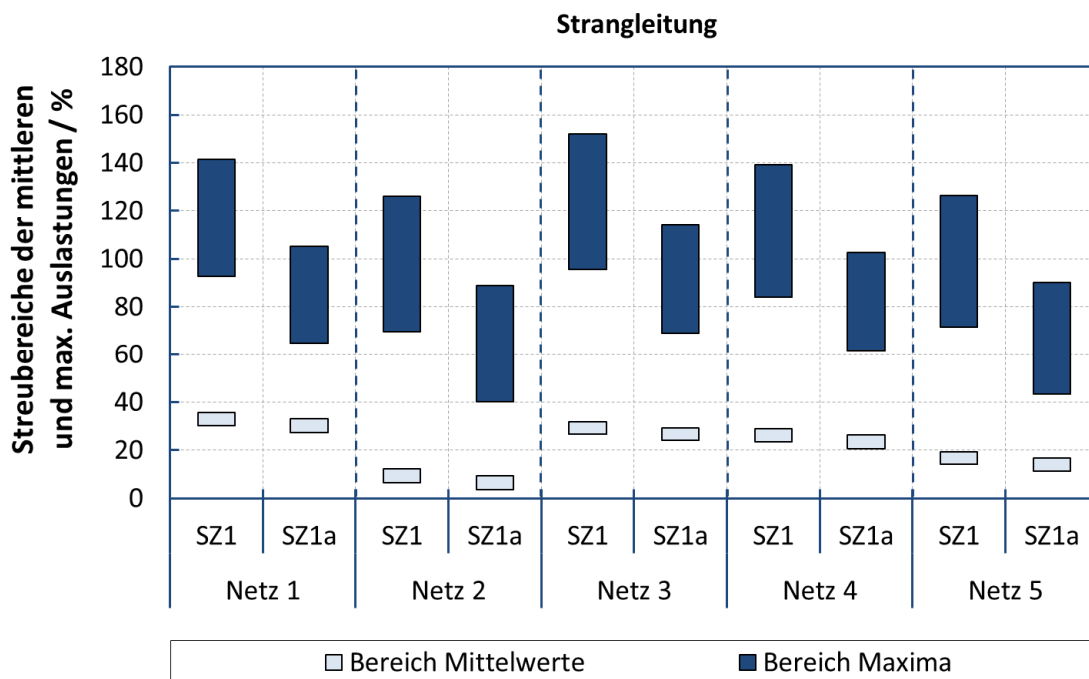


Abbildung 24: Streubreiche der mittleren und maximalen Strangleitungsauslastungen der Netze 1 bis 5 in Prozent der Nennwerte; aufgetragen für die Szenarien 1 und 1a mit ungesteuerten E-Taxis

Ergänzend wurde, wie in Kapitel 2.2.2 bereits beschrieben, ein alternatives Szenario mit geringeren Ladeleistungen (22 kW) je E-Taxi und entsprechend höherer Anzahl an Ladestellencluster simuliert. Die kritischen Strangmaximalauslastungen wurden im Vergleich zum „Szenario 1“ (gleiche Erfüllbarkeitsrate) in allen Netzen um rund 35 % verringert (siehe Abbildung 24). Dadurch reduzieren sich die Häufigkeiten der Überlastungen auf weit unter 0,1 % der Gesamtsimulationsdauer. Auch die maximalen Umspannerauslastungen verringerten sich um bis zu 20 %. Das zusätzlich definierte „Szenario 1a“ mit

reduzierter Ladeleistung und etwas erhöhter Ladestellenanzahl (von 20 auf 26) stellt somit aus netztechnischer Sicht die bessere Lösung (verglichen mit „Szenario 1“) dar, da einerseits die Spitzenladeleistungen geringer ausfallen und andererseits eine höhere Ladestellenclusteranzahl einen gewissen Verteilungseffekt hervorrufen.

Zusammenfassend können in allen fünf Erfüllbarkeitsszenarien Überlastungen an den Strangleitungen auftreten. Welche thermischen Effekte diese Überlastungen für die Erdkabelmaterialien bedeuten, wird im folgenden Kapitel analysiert. Sollen aus Sicherheits- und Zuverlässigkeitsgründen Auslastungen über 100 % in allen Fällen unterbunden werden, so können Ladesteuerungen einen Netzausbau vermeiden. Eine mögliche Ladesteuerung sowie deren Resultate werden in Kapitel 2.3.3 dargestellt.

2.3.2 Thermische Modellierung

Die thermische Modellierung wird in der Literatur mit zwei Varianten beschrieben. Einerseits die klassische Methode, welche stationäre Lösungen bzw. die Belastbarkeit berechnet: Also die Erwärmung durch einen konstanten Strom über einen längeren Zeitraum (siehe dazu [Hein99]). Die Belastbarkeit von Leitungen, das ist der maximal ständig einzubringende Strom ohne Materialschädigungen in Kauf nehmen zu müssen, hängt in erster Linie von der verwendeten Isolation und den spezifischen Wärmewiderständen ab. Der Verbundwerkstoff VPE besitzt die größte Temperaturfestigkeit (90 °C). Papier und PVC sind mit rund 70 °C im Normalbetrieb etwas schlechter. Andererseits die transient thermische Berechnung, welche auch kurzzeitige Belastungen analysieren kann. Bis zum Erreichen der Endtemperaturen bei konstantem Stromeintrag finden transiente Vorgänge in den Materialien statt. Eine dafür hauptverantwortliche Kenngröße ist die spezifische Wärmekapazität. Diese gibt die thermische „Trägheit“ der jeweiligen Substanz wieder. Im eingeschwungenen und stabilen Zustand sind die Ergebnisse beider Modellierungen (transient und stationär) gleich. Somit fußen sie auf den gleichen thermischen Gleichungen. Im Projekt ZENEM muss die zweite Variante (transient thermische Modellierung) gewählt werden, da durch die Elektromobilität es nur zu kurzen Überlastungen kommt. Für die Modellierung wurde die Simulationsumgebung MathWorks-Simulink® ausgewählt, da diese mit Zeitreihenanalysen sehr gut umgehen kann.

Für thermische Modellierungen sind das Kabel, das Bettungs- bzw. Grabenmaterial um das Kabel herum und die von der Kabelwärme unabhängige Umgebungstemperatur von entscheidender Bedeutung. Die Wahl der verschiedenen Werkstoffe bzw. Füllgüter und der betrachteten Jahreszeit beeinflussen die resultierenden Leitertemperaturen maßgeblich.

Das in diesen Analysen verwendete Kabel ist dem E-XAYY 4x150SM mit einer angegebenen Strombelastbarkeit von 275 A (im Erdreich) je Leiter nachempfunden. Um den Aluminiumleiter ist eine PVC-Isolierung zu finden und der schützende Mantel besteht ebenfalls aus PVC. Das Erdkabel befindet sich in einem Bereich von 20 cm Sand und darüber 50 cm Kies bzw. sogenannten Gräber. Den Abschluss bildet eine 2,5 cm hohe Asphaltdecke, welche aus thermischer Sicht den schlimmsten Fall einnimmt. In diesen Betrachtungen wurden etwaige parallel geführte NS- oder MS-Kabel sowie andere thermisch relevante Leitungen ausgespart.

Das transient thermische Modell basiert auf kreisscheibenförmige Wärmeleitung der unterschiedlichen Materialschichten. Daher kann zur Berechnung die Analogie zum Ohm'schen Gesetz und mit Hilfe des sogenannten Wärmewiderstands ähnliche Gleichungen verwendet werden (für mehr Informationen siehe [Schu13b]). Im Modell wurde die Wiener Kabelverlegung realitätsgetreu (PVC-Erdkabel in Sand-Kies-Bettung unter Asphaltdecke) nachgebildet und jede erhöhte Leitertemperatur festgehalten. Alle Analysen wurden unter Normalbedingungen, das heißt, dass keine Netzumschaltungen vorgenommen wurden, und unter Annahme einer realen jahreszeitlichen Umgebungstemperaturverteilung unter Asphalt (siehe Tabelle 5) durchgeführt.

Tabelle 5: Monatsmittelwerte der Umgebungstemperaturen unter Asphaltdecke (Werte aus [Hein99, S. 246])

Monat	Unter Asphaltdecke	Monat	Unter Asphaltdecke
Jän.	-0,4 °C	Jul.	21,1 °C
Feb.	4,1 °C	Aug.	19,6 °C
Mär.	6,7 °C	Sept.	18,5 °C
Apr.	14,8 °C	Okt.	17,4 °C
Mai	14,1 °C	Nov.	4,8 °C
Jun.	23,3 °C	Dez.	1,9 °C

Durch das transient thermische Modell können resultierende Leitertemperaturen der obig beschriebenen Strangstromauslastungen berechnet werden. Abbildung 25 zeigt diese für alle fünf Netze mit jeweils dem Taxistandplatzprofil mit der höchsten Strangauslastung. Aufgrund der verwendeten PVC-Isolationen sind nur Leitertemperaturen unter 70 °C zulässig. Im Kurzschlussfall sind allerdings höhere erlaubt, jedoch sind hierbei die Überlastungen extrem kurz. Für diese Betrachtungen sind daher alle Temperaturen höher als 70 °C nicht zulässig. So auch der Spitzenwert von über 90 °C. Dieser wird in der Jahresbetrachtung fast 40 Minuten (im Gegensatz zu einer Stromüberlastungssummandauer von rund 5 Tagen, wie in Kapitel 2.3.1.2 ersichtlich) lang eingenommen. Die van't Hoff'sche Regel, welche als Faustregel der chemischen Kinetik gilt, besagt, dass chemische Reaktionen doppelt bis viermal so schnell ablaufen, wenn die Temperatur um 10 K erhöht wird [Holl95]. Durch diese können Alterungseffekte der Kabel abgeschätzt werden.

Zwei Netze (2 und 5) überschreiten allerdings niemals den maximal zulässigen Bereich, obwohl diese mit rund 170 % ausgelastet werden. Demnach sind kurzzeitige Stromüberlastungen bedingt durch E-Taxiladevorgänge in einem begrenzten Ausmaß zulässig. Allgemein ist weiters ersichtlich, dass Leitertemperaturen größer 35 °C in allen betrachteten NS-Netzen selten (< 5 %) auftreten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei transient thermischen Betrachtungen gewisse Überlastungen bedingt durch Schnellladevorgänge ohne zusätzliche Alterungseffekte möglich sind.

Abbildung 25 zeigt weiters, dass Strangauslastungen unter 170 % zu keinen thermischen Überbeanspruchungen der verwendeten Erdkabel führen. In dem Fall der Schnellladevorgänge und diesen aus-

gewählten Netztypen sind Auslasten bis zu diesem Wert und somit die ungesteuerte E-Taximobilität möglich. Mehr Ergebnisse sind in [Schu13b] zu finden.

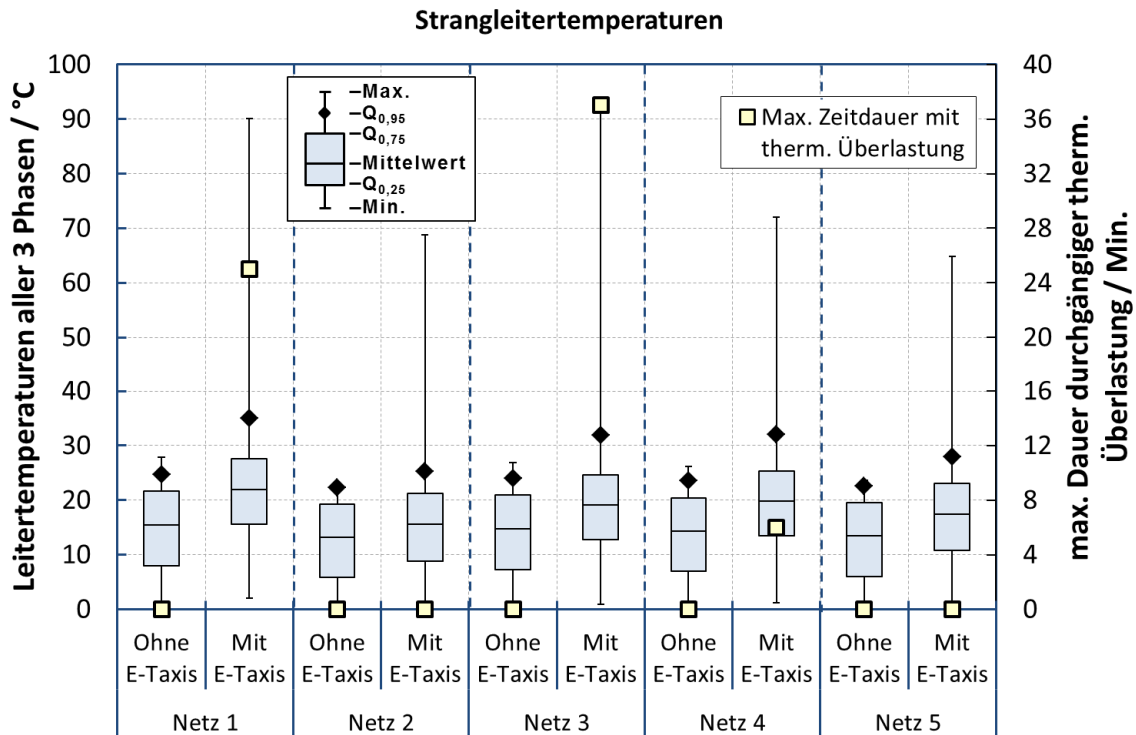


Abbildung 25: Minimum, Mittelwert, Maximum, 25 %-, 75 %- und 95 %-Quantile der Leitertemperaturen (alle 3 Phasen) in Grad Celsius sowie max. Dauer durchgängiger thermischer Überlastung in Minuten aller fünf Netze mit und ohne E-Taxiladevorgänge (rechte Achsenbeschriftung)

Zusammenfassend zeigen transient thermische Analysen noch offene Ressourcen in der möglichen Übertragungskapazität heutiger Stromleitungen auf. Im Gegensatz zur klassischen stationären Berechnung wirken dabei thermische Trägheiten der Materialien. Diese weiterführende thermische Modellierung vergrößert den derzeitigen Horizont der klassischen Betriebsführung elektrischer Netze.

Es sind gewisse Stromüberlastungen infolge von E-Taxiladevorgängen thermisch zulässig, da Leitertemperaturüberlastungen weniger oft auftreten. Auch bedingt durch die zeitlich sehr beschränkten Schnellladevorgänge wirken die thermischen Trägheiten positiv.

2.3.3 Ladesteuerung

Überlastungen im Fall B können wie im Kapitel 2.3.2 beschrieben, zu überhöhten Leitertemperaturen führen. Diese sind unbedingt zu vermeiden, da das Isolationsmaterial dauerhaft geschädigt werden könnte. In diesen Fällen ist eine Ladesteuerung der E-Taxis unumgänglich. Aber auch schon davor können Lastverschiebungen einzelne Komponenten entlasten. Alle diese Steuerungen sollten hingegen die Mobilität der Taxis nicht weiter einschränken.

Das MATLAB®-Tool aus Kapitel 2.2.1.1 wurden mit der Option des „gesteuerten Ladens“ erweitert. Damit sind einfache Ladesteuerungen durchgeführt worden, welche die Ladeleistungsspitzen vor Ort auf

den fixen Wert von 100 kW pro Ladestation begrenzen. Somit können maximal zwei Fahrzeuge gleichzeitig mit annähernd voller Leistung laden. Werden mehr Taxis simultan angesteckt, dann wird die Ladeleistung je E-Taxi bedarfsbasierend vermindert. D.h., je nach momentaner Summenladeleistung der Ladestation und aktuellem Ladestand der einzelnen Elektrofahrzeuge wird die max. Anschlussleistung von 100 kW in Leistungsstufen aufgeteilt und den Fahrzeugen zugewiesen. E-Taxis mit niedrigerem SOC-Wert haben höhere Priorität. Durch diese Reduktion sind alle Netzkomponentenauslastungen unter 100 %, und thermische Überlastungen treten somit nicht mehr auf. Dies wurde mittels zusätzlichen Netzsimulationen bestätigt. Abbildung 26 zeigt dies beispielhaft für das Netz 1. Ebenfalls wurden die resultierenden „Erfüllbarkeiten“ der E-Taxi-Wegekette untersucht und keine merkbare Veränderung (<1 %) durch diese Ladesteuerung herausgefunden.

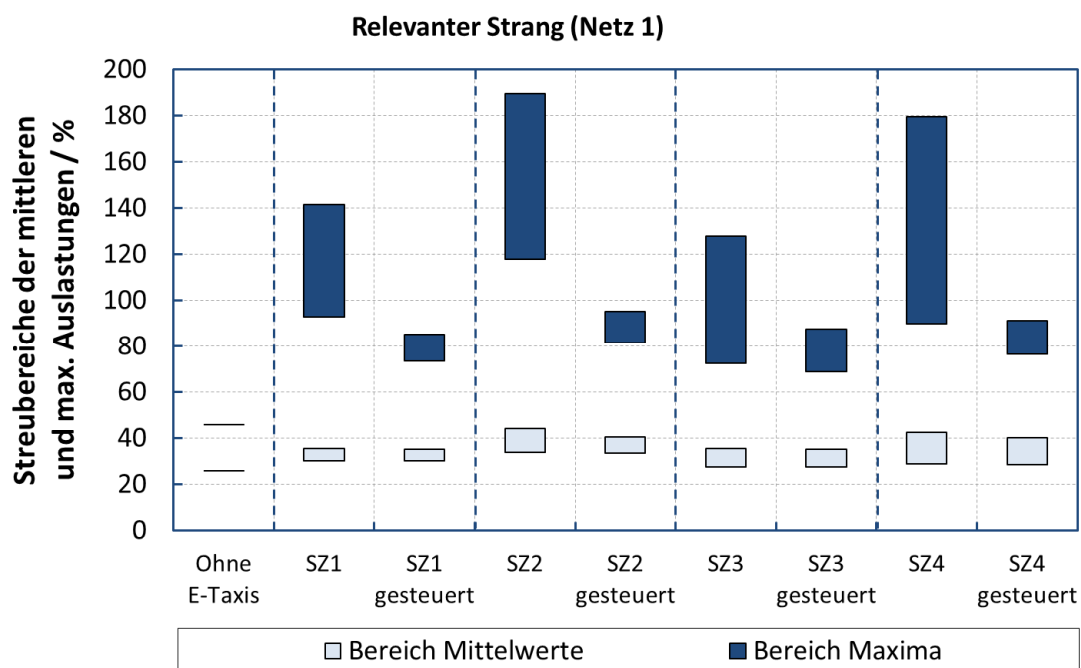


Abbildung 26: Streubereiche der mittleren und maximalen Strangleitungsauslastungen des Netzes 1 in Prozent der Nennwerte; aufgetragen für das Szenario 1 mit ungesteuerten und gesteuerten E-Taxis (+ „Ohne E-Taxis“)

2.4 Rahmenbedingungen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den umweltrelevanten und wirtschaftlichen Gesichtspunkten der Umsetzung von rein elektrisch angetriebenen Taxis. Dabei wird auf das Potenzial der CO₂-Reduktion für die Region Wien eingegangen und eine Abschätzung der auftretenden Kosten vorgenommen. Weiters werden die derzeitigen politischen und baulichen Rahmenbedingungen für einen Umstieg auf elektrisch angetriebenen Taxis diskutiert.

2.4.1 Ökologische Aspekte

Im ersten Schritt wurden als Vergleichsbasis die Gesamtemissionen in Österreich bzw. Wien des Sektors „Verkehr“ für das Jahr 2010 recherchiert und anschließend auf die Berechnung des Potentials der CO₂-Reduktion für die gesamte Wiener Funktaxiflotte (~2.500 Taxis) übergegangen. Um die fahrzeug- bzw. km-abhängigen CO₂-Emissionen zu erhalten wurden die Werte für die Verwendung des Fahrzeu-

ges (Tank-to-Wheel, TTW) und jene für die Herstellung und Verteilung von Fahrzeug und Treibstoff (Well-to-Tank, WTT) getrennt voneinander recherchiert und mittels EXCEL für konventionelle Fahrzeuge und Elektrofahrzeugen kalkuliert¹⁵. Für eine umweltschonende CO₂-Bilanz von rein elektrisch angetriebenen PKW ist vor allem die richtige Wahl der Stromerzeugung ausschlaggebend. Im Projekt ZENEM wurden unterschiedliche Strommische, wie ein rein regenerativer, ein rein fossiler, der österr. und ein europäischer, in die Analysen mit aufgenommen, die resultierenden Emissionen von der Quelle bis hin zur Nutzung (Well-to-Wheel, WTW) berechnet und mit den CO₂-Werten von Diesel-/ Benzin-Autos verglichen. Dadurch konnte das Potential der CO₂-Reduktion für die gesamte Wiener Taxiflotte abgeschätzt werden.

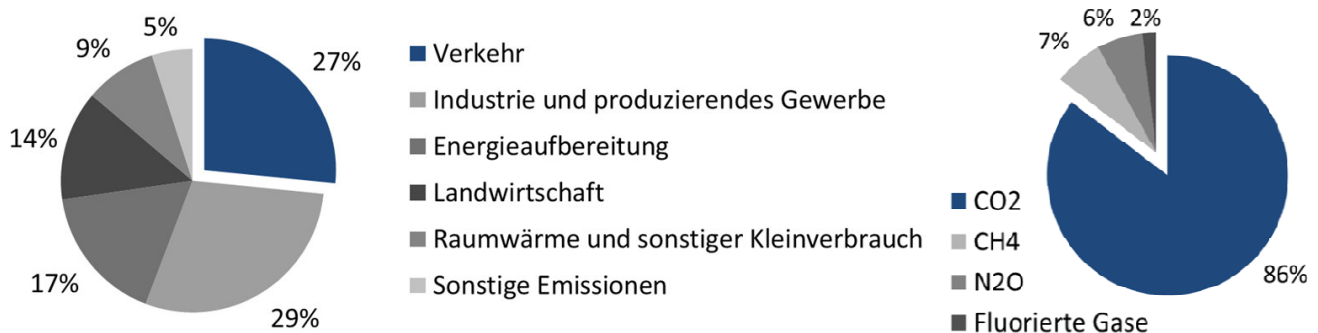


Abbildung 27: Treibhausgas-Emissionen in Österreich 2010: Nach Sektoren (links) und THG (rechts)

Laut Klimaschutzbericht 2012 [Ande10] verursachte 2010 der Sektor „Verkehrs“ 27 % (22,5 Mio. t CO₂-Äq.) an den österr. Treibhausgasemissionen. Dabei betrug der CO₂-Anteil an den heimischen THG-Emissionen rund 86 % (vergleiche dazu Abbildung 27). Dies bedeutet für den Bereich „Straßenverkehr“, verglichen mit dem Jahre 1990, eine Steigerung von 61,4 %. Für das Bundesland Wien ergibt sich laut Bundesländer Luftschadstoffinventur [Ande12] ein Emissionswert von 3,43 Mio. t CO₂-Äq. für den gesamten Verkehrssektor (2010).

Tabelle 6: THG-Emissionen in Österreich 2010 und Veränderung zum Jahr 1990

Hauptverursacher	2010	Veränderung 1990 - 2010
Gesamter Verkehrssektor	22,5 Mio. t CO ₂ -Äq.	+ 60,0 %
Straßenverkehr	97,3 %	+ 61,4 %
davon Güterverkehr	42,1 %	+ 113,4 %
davon Personenverkehr	57,9 %	+ 37,1 %

Reine Elektrofahrzeuge (BEV¹⁶) haben im Betrieb gegenüber Autos mit Verbrennungskraftmotoren u.a. den Vorteil, dass sie lokal keine CO₂-Emissionen verursachen. Vergleiche dazu Abbildung 28 im Anhang. Jedoch bewirkt die Stromerzeugung je nach Primärenergiequelle und Kraftwerksart erhebliche

¹⁵ Als Literaturquelle diente hauptsächlich [Beer10], [Haas09], [Kle109] und [Kloe11].

¹⁶ BEV ... Rein elektrische, batteriebetriebene Fahrzeuge

Emissionswerte. Der österr. Strommix generierte im Jahr 2011 – aufgrund des hohen Wasserkraftanteils – durchschnittlich 192,5 g [Wagn07] bis 272,4 g CO₂-Äq. pro kWh (je nach Gewichtung der Stromimporte). Hingegen ergab der mittlere CO₂-Ausstoß im Gebiet der ENTSO-E¹⁷ deutlich höhere Werte, nämlich 412,8 g CO₂-Äq. pro kWh [SKB12]. Dabei heben Kohlekraftwerke mit äquivalenten CO₂-Emissionen im Bereich von 750 bis 1200 g/kWh die Statistik deutlich an (siehe Abbildung 31 im Anhang).

In Abbildung 28 sind die Ergebnisse der Recherchen und Analysen der spezifischen äquivalenten CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) für unterschiedliche Fahrzeugklassen, Antriebs- und Stromerzeugungsarten dargestellt. Der schraffierte Bereich illustriert das Spektrum der Ergebniswerte. Es ist klar ersichtlich, dass Elektrofahrzeuge mit Strom aus fossil-thermischen Kraftwerken im schlimmsten Fall (Erzeugung mittels Braunkohle-KW) die CO₂-Emissionen von Benzin- und Diesel-PKW um ein Mehrfaches übersteigen.

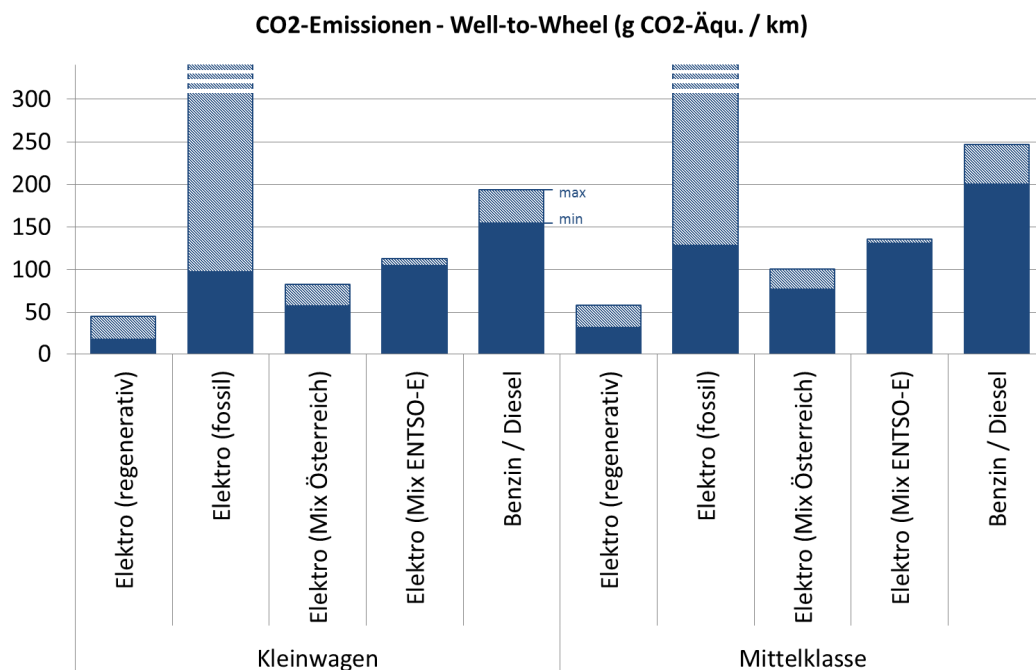


Abbildung 28: Spezifische äquivalente CO₂-Emissionen (WTW) für verschiedene Fahrzeugtypen und unterschiedliche Stromerzeugungsarten

Als Fazit kann daher festgehalten werden, dass Elektrofahrzeuge in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen den deutlichsten Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen leisten können. Dabei ergibt sich bei Verwendung von regenerativer Stromerzeugung ein Potential für die CO₂-Reduktion von bis zu 80 %. Für eine Umstellung von 25 % (50 %) der gesamte Wiener Funktaxiflotte¹⁸ auf Elektrofahrzeuge bedeutet das eine absolute Verringerung von bis zu 5.040 (10.080) t CO₂-Äq. pro Jahr.

¹⁷ European Network of Transmission System Operators for Electricity

¹⁸ Die gesamte Wiener Funktaxiflotte besteht aus rund 2.500 Fahrzeugen; es wurde eine durchschnittliche Kilometerleistung von 50.000 km/a angenommen.

2.4.2 Ökonomische Aspekte

Die auftretenden Kosten wurden in Fahrzeug- und Infrastrukturkosten gegliedert. Wobei diese weiter in Investitions- und Betriebskosten unterteilt sind. Die notwendigen finanziellen Mittel der Ladeinfrastruktur wurden entsprechend der definierten Szenarien (vergleiche Kapitel 2.2.2) mit Hilfe von Literaturrecherchen, Expertengesprächen mit Netzbetreibern und dem Knowhow aus den E-Modellregionen nach Art und Höhe ermittelt bzw. abgeschätzt. Durch analoge Vorgehensweise konnten ebenfalls die Kosten der Fahrzeuge (rein elektrisch und konventionell) erarbeitet und verglichen werden.

2.4.2.1 Ladeinfrastruktur

Die wichtigsten Kostenpunkte für die Ladeinfrastruktur sind, die Ladestation selbst, der Netzzugang, die erforderlichen Grabungsarbeiten inklusive Erdkabel, sowie zusätzliche Kosten für E-Installationen und ein notwendiges Identifikations- und Verrechnungssystem. Die Kosten für den Netzzugang bestehen aus dem Netzbereitstellungsentgelt (Abgeltung es bereits durchgeführten Ausbaus der einzelnen Netzebenen) und dem Netzzutrittsentgelt (Abgeltung der erstmaligen Herstellung eines Anschlusses). Das Netzbereitstellungsentgelt ist dem Netzbetreiber als Pauschalbetrag zu leisten und beträgt in Wien für die Netzebene 7 (bis max. 100 kW) rund 235 €/kW [Huet12]. Die Abschätzung des Netzzutrittsentgelts erweist sich als deutlich komplexer, da es von der lokalen Netzsituation abhängig ist. Das Netzzutrittsentgelt beinhaltet alle anfallenden Kosten des Netzbetreibers von der Verlegung etwaiger neuer Leitungen bis hin zur Errichtung eines neuen Netzübergabepunkts. Reicht die Kapazität der bestehenden Leitungen nicht aus und muss der Netzübergabepunkt über ein neues Erdkabel direkt an der Sekundärwand des NS-Transformators angeschlossen werden, entstehen enorme finanzielle Aufwände, da die Grabungskosten im dichtbebauten Gebiet von Wien in der Größenordnung von 400 bis 500 €/m liegen.

Tabelle 7: Bandbreite der abgeschätzten Kostenpunkte für die Ladeinfrastruktur

Kostenart / Parameter	Bandbreite	
	Minimum	Maximum
Ladestation *)	20.000 €	40.000 €
Wartung der Ladestation	1.200 €/a	7.500 €/a
Identifikation / Verrechnung	200 €/a	600 €/a
E-Installationen	1.000 €	8.000 €
Zu verlegende Kabellänge	10 m	100 m
Grabungsarbeiten inkl. Erdkabel	400 €/m	500 €/m
Netzübergabepunkt	4.000 €	6.000 €
Netzbereitstellungsentgelt (Wien)	235,47 €/kW	
Zinssatz	5 %	
Abschreibungsdauer Ladestation 10 Jahre	10 Jahre	
Abschreibungsdauer Erdkabel 40 Jahre	40 Jahre	

*) Anschlussleistung 100 kW, max. 50 kW je Ladepunkt

In Tabelle 7 ist die abgeschätzte Bandbreite der relevanten Kosten aufgelistet. Basierend auf dieser ergeben sich Investitionskosten (ohne Wartung und Verrechnung) für eine Ladestelle (Anschlussleistung 100 kW, max. 50 kW je Ladepunkt) von rund 56.500 € bis 126.500 €. Die starke Spreizung entsteht vor allem durch die große Streuung der Kosten für die Ladestation selbst und die Kosten des Netzausbaus zur Herstellung des Netzübergabepunkts. Deshalb ist es für einen ökonomischen Ausbau der Ladeinfrastruktur erforderlich, ebenfalls die lokale Netzsituation in die Ausbauplanung der Ladestationen zu integrieren. Nimmt man für alle berücksichtigten Aufwände den Mittelwert und berechnet die jährlichen Kosten¹⁹ für das Szenario 1 mit 20 Schnellladestationen, so ergeben sich Kosten in der Höhe von etwa 294.000 €/a.

2.4.2.2 Elektrofahrzeuge

Es wurden unter anderen die Beträge für Investition, Wiederverkaufswert, Förderung, Versicherung, Wartung und Reparatur, sowie die Energiekosten für ein Elektrofahrzeug auf Basis des Nissan Leaf²⁰ und zwei konventionelle Fahrzeuge (Mercedes-Benz E200 und Skoda Octavia Kombi) abgeschätzt. In Tabelle 8 sind alle verwendeten Kostenarten und -höhen der Fahrzeuge detailliert aufgelistet.

Tabelle 8: Auflistung aller angenommenen Kostenarten- und -höhen für unterschiedliche Fahrzeugtypen

Basis	Mercedes-Benz E200 (ICE)	Skoda Octavia Kombi (ICE)	Elektrotaxi 24 kWh (BEV)	Elektrotaxi 48 kWh (BEV)
Zinssatz	5 %			
Zeitpunkt Autowechsel	5 Jahre			
Zeitpunkt Batteriewechsel	---		3 – 5 Jahre	
Investitionskosten (€) exkl. Batt.	48.000 €	15.000 €	17.000 €	
Spez. Batteriekosten (€/kWh)	---		750 €/kWh	500 €/kWh
Batteriekosten gesamt (€)	---		18.000 €	24.000 €
Wiederverkaufswert (€)	10.000 €	2.000 €	5.000 €	
Einmalige Förderung (€)	---	---	5.000 €	
Versicherung (€/a)	2.000 €/a	1.500 €/a	1.000 €/a	
Wartung und Reparatur (€/a)	1.100 €/a	950 €/a	600 €/a	
Verbrauch (l/100km, kWh/100km)	10 l/100km	7 l/100km	20 kWh/100km	
Sprit- bzw. Strompreis (€/l, €/kWh)	1,4 €/l		0,20 €/kWh	

¹⁹ Für die Lebensdauer der Niederspannungskabel wurde 40 Jahre veranschlagt.

²⁰ Der Nissan Leaf ist das erste rein elektrische Fahrzeug, das in Österreich als Taxi zugelassen ist.

Weiters wurden dem Nissan Leaf entsprechend den Szenarien zwei unterschiedliche Batteriekapazitäten unterstellt: Einmal die in der Realität eingebauten 24 kWh und ein weiteres Mal eine theoretische, nicht am Markt erhältliche, Batteriekapazität von 48 kWh.

Für die Investitionen wurden ihre Annuitäten ermittelt und unter Berücksichtigung aller anderen Beträge die spezifischen Kosten pro Jahr berechnet. Der betrachtete Mercedes-Benz stellt mit rund 17.500 €/a das teuerste Fahrzeug und der Skoda Octavia mit ca. 9.400 €/a das günstigste dar. Beim reinen Elektrofahrzeug sind zwar die Energiekosten deutlich geringer, jedoch verursacht die Batterie enorme Investitionskosten, deren Annuität mit der Lebensdauer entsprechend schwankt. Unterstellt man dem Nissan Leaf eine Batteriekapazität von 24 kWh und eine -lebensdauer von 4 Jahren, dann ergeben sich jährliche Kosten von etwa 10.000 €. In Abbildung 29 sind zusätzlich noch die spezifischen Kosten für einen Nissan Leaf mit 48 kWh und Batteriekosten von 500 €/kWh dargestellt.

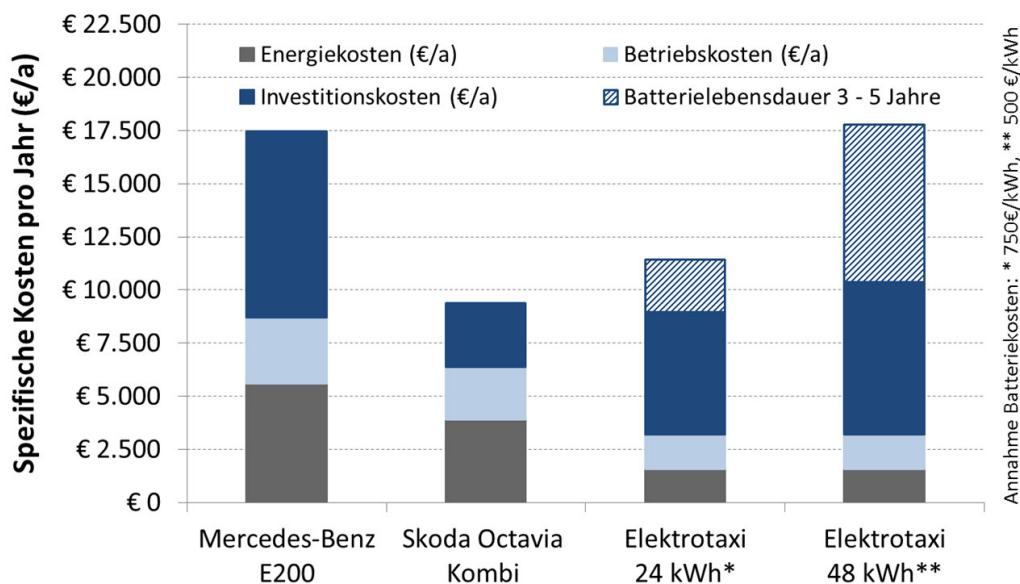


Abbildung 29: Spezifische Energie-, Betriebs- und Investitionskosten unterschiedlicher Fahrzeugtypen

2.4.3 Politische und Bauliche Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Projekts ZENEM wurde ein nationaler Workshop mit dem Titel „Politische und bauliche Rahmenbedingungen für eine zukünftige E-Taxi-Flotte in Wien“ mit rund 30 Vertretern der Taxibranche und der Wiener Stadtwerke, sowie Verkehrs-, Raum- und Städteplanern an der TU Wien veranstaltet. Dabei wurden in Kleingruppen die wichtigsten Rahmenbedingungen für einen Umstieg auf elektrisch angetriebene Taxis erarbeitet. Die gewonnen Erkenntnisse wurden mit den Ergebnissen aus einer Literaturrecherche ergänzt und im Projektkonsortium diskutiert. Für die Erhebung möglicher Contracting-Modelle wurde ebenfalls eine Literaturrecherche angestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse der Recherchen und des nationalen Workshops zum Thema „politische und bauliche Rahmenbedingungen“ sind im Folgenden aufgelistet und in unterschiedliche Problembereiche gegliedert.

Herstellung und Zulassung von Elektrotaxis:

Um ein Elektrofahrzeug als Taxi nutzen zu dürfen, muss es den technischen Normen für Taxifahrzeuge in Österreich genügen. Diese sind auf Ebene der Bundesländer geregelt und beinhalten u.a. Kriterien zu der Anzahl an Türen und Sitzplätzen, den Außenmaßen des Fahrzeuges, dem Kofferraumangebot, der Klimaanlage und den Abgasnormen. Das erste rein elektrisch betriebene E-Taxi in Österreich ist der Nissan Leaf und kommt in der E-Modellregion Eisenstadt zum Einsatz.

Ladeinfrastruktur am Taxistandplatz:

Soll ein hoher Anteil an Taxis auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge umgestellt werden, dann ist der Ausbau von entsprechender Schnellladeinfrastruktur an den Taxistandplätzen zu forcieren. Dieser Infrastrukturausbau ist jedoch mit politischen bzw. baulichen Rahmenbedingungen verknüpft, die im ersten Schritt detailliert geklärt bzw. beim Umstieg eingehalten werden müssen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wurde versucht die wichtigsten Rahmenbedingungen nachfolgend aufzulisten:

- Die finanziellen Mittel für die Ladeinfrastruktur müssen bereitgestellt werden. Direkt von der Gemeinde oder über entsprechende Contracting-Modelle. Auf alle Fälle ist hier von Seiten der Politik Handlungsbedarf gegeben.
- Eine Auswahl des konduktiven Steckersystems muss getroffen (z.B. CHAdeMO® [CTS13] bzw. Combo Ladesystem [Webe12]) und darüber hinaus das entsprechende Fahrzeugangebot mit dem jeweiligen Standard geschaffen werden.
- Die Auswahl der Taxistandplätze für die Ladeinfrastruktur ist nicht nur in Bezug auf eine optimale Erfüllung der Bedürfnisse von Taxiunternehmen und Kunden zu treffen, sondern es muss ebenfalls auf die aktuelle Netzsituation und -auslastung eingegangen werden, um ökonomische Fehlinvestitionen zu vermeiden. Dezentrale netzorientierte Ladesteuerung ist hierbei ein wichtiges Hilfsmittel.
- Die Ladestationen für die Taxistandplätze sind in Hinblick auf Sicherheit und Handhabung mit dem Ladekabel (z.B. „Stolpergefahr für Kunden und Passanten“ bzw. „Nachfahren der Taxis“) entsprechend funktionell zu gestalten.
- Die Vermittlungssysteme sind entsprechend den Anforderungen der E-Taxis zu erweitern. Die Vermittlung sollte basierend auf dem aktuellen Ladezustand der Batterie erfolgen, um ein Liegenbleiben des E-Taxis ausschließen zu können. Fahrbereite Taxis sollten am Taxistandplatz gut sichtbar gekennzeichnet werden (z.B. über eine Anzeige bzw. Signallichter)
- Die Speisung der Ladestation mit erneuerbarer Energie ist zu gewährleisten, damit ein bestmögliches Ausschöpfen des ökologischen Potentials gelingt.

Anreize für Taxiunternehmer und Kunden:

Der erste Modellversuch von E-Taxis in Deutschland mit Mitsubishi i-MiEV (seit ca. einem Jahr in München [TFM11]) hat laut Isar-Funk-Geschäftsführer Christian Hess gezeigt [Tanc11], dass zwar die Kundenakzeptanz gegeben ist, jedoch die Taxi-Lenker über den geringen Komfort lästern. Deshalb sollte ein

Umstieg auf rein elektrisch betriebene Taxis ebenfalls mit direkten bzw. indirekten Förderungen der Taxiunternehmer und Kunden einhergehen. Folgend einige Beispiele:

- Förderung von maßgeschneiderten Komfortpaketen (z.B. Sitzheizung, Lederausstattung).
- Erstellung von attraktiven Batterieleasingmodellen, um die erhöhten Investitionskosten auszugleichen.
- Offensive und breite angelegte Öffentlichkeitsarbeit (z.B. Werbekampagne) zur aktiven Imagepflege der E-Taxis und indirekten Förderung der Taxiunternehmer.
- Berücksichtigung von Bonussystemen

Allgemein:

Der Ladeinfrastrukturausbau sollte ebenfalls mit angrenzenden raumplanerischen Aktivitäten gekoppelt werden, um Synergien zu schaffen bzw. auszunutzen.

Die aktuellen Förderprogramme von Entwicklung und Forschung im Bereich der E-Taxis im Speziellen, aber auch für die E-Mobilität im Allgemeinen, sollen auf nationaler und internationaler Ebene weitergeführt bzw. noch ausgeweitet werden.

Bei der Förderung und Umsetzung von E-Taxi darf das gesamtheitliche Verkehrskonzept der Stadt nicht außer Acht gelassen werden, um eine leistungsfähige und multimodale Mobilität im urbanen Raum zu gewährleisten.

Finanzierungsmöglichkeit:

Hier spielen sogenannte Contracting-Modelle (siehe z.B. [Meix02]) eine wesentliche Rolle. Sie sollen bei wirtschaftlichen Vorhaben allgemein dabei helfen mögliche Hemmnisse in Bezug auf Finanzierung (z.B. Fehlen von Eigenkapital), Organisation (z.B. Mangel an Erfahrung bzw. Qualifikation) und Wirtschaftlichkeit (z.B. fehlende Absicherung des technischen und betrieblichen Risikos) mittels einem „Dritten“ zu überwinden. Im Fall von E-Taxis könnte ein externer „Betreiber“ (z.B. ein Energieversorger) einen Vertrag mit den involvierten Taxiunternehmern abschließen und sämtliche Aufgaben der Energieversorgung übernehmen. Der Betreiber erstellt dann auf eigene Kosten und Risiko die Ladeinfrastruktur und betreibt diese langfristig zur Versorgung der E-Taxis mit Nutzenergie. Die Taxiunternehmer bezahlen dem Betreiber auf der einen Seite die bezogene Energie auf Basis eines verhandelten Preises, dafür übernimmt und garantiert der Betreiber auf der anderen Seite die Finanzierung, den Infrastrukturausbau, Service und Wartung, den Primärenergiebezug und die Abrechnung. Der Betreiber kann durch die ganzheitliche Umsetzung entstehende Synergieeffekte nutzen und erwirtschaftet Kostenvorteile durch Bündelung von betrieblichen und organisatorischen Aufgaben. Hieraus erwachsen Vorteile auf beiden Seiten.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dem Projekt ZENEM hat man sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkungen von zukünftigen E-Taxis auf das Niederspannungsnetz in Wien umfassend zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurde einerseits das derzeitige Mobilitätsverhalten einer Wiener Funktaxiflotte für das gesamte Jahr 2011 erhoben und andererseits der aktuelle elektrische Verbrauch durch Langzeitleistungsmessungen in fünf unterschiedlichen Niederspannungsnetzabschnitten ermittelt.

Dabei zeichnet sich der Funktaxibetrieb durch eine starke Wochentagscharakteristik aus. Werktags fahren die meisten Funktaxis vormittags und die wenigsten sind in den späten Nachtstunden unterwegs. Richtung Wochenende verlagert sich dann das Maximum der gleichzeitig fahrenden Taxis in die Zeit kurz nach Mitternacht. Im Jahr 2011 waren max. 62 % der durchschnittlich 823 Fahrzeuge umfassenden Funktaxiflotte gleichzeitig unterwegs. Eine Fahrt zwischen zwei Taxistandplätzen besteht aus Kombinationen von Kunden- und Leerfahrten und besitzt im Mittel eine Distanz von 14,2 km. Die Standzeiten, welche sich beim Warten an den Taxistandplätzen ergeben, dauern durchschnittlich 19,4 Minuten.

Aufgrund der systembedingten Eigenschaften der anonymisierten Mobilitätsdaten, beziehen sich die folgenden Ergebnisse vor allem auf Funktaxis im Mehrschichtbetrieb. Weiters wurde im Projekt ZENEM angenommen, dass ausschließlich die Standzeiten am Taxistandplatz zum Laden der Batterie genutzt und somit nur an Taxistandplätzen Ladestellen angenommen werden. Außerdem wurden keine Hybridfahrzeuge in den Untersuchungen berücksichtigt.

Der Begriff „Erfüllbarkeit“ gibt in diesem Zusammenhang darüber Auskunft, wie viele Funktaxischichten unter den gewählten Rahmenbedingungen (Ladeleistung, Batteriekapazität und Ladestellenausbau, sowie Ladezustandsgrenzen) mit rein elektrisch betriebenen Taxis bewältigt werden könnten. Dabei wurde versucht die Mobilitätsbedürfnisse des heutigen Funktaxibetriebs zu befriedigen. Die Analyse der dazugehörigen Erfüllbarkeitsrate zeigt deutlich, dass Normalladen (einphasig, 230 V, 16 A) in keiner Weise für die kurzen Standzeiten an den Taxistandplätzen ausreicht. Hingegen erscheint der Leistungsbereich zwischen 22 kW (AC) und 50 kW (DC) als sinnvoll.

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen könnten mit Batteriekapazität von 24 kWh je Funktaxi und einer Schnellladeinfrastruktur an 20 Taxistandplätzen (50 kW) bzw. 26 TSP (22 kW je Ladepunkt) mehr als 25 % der Funktaxischichten erfüllt werden. Verdoppelt man die Batteriekapazität und werden an 55 Taxistandplätzen (50 kW je Ladepunkt) Ladestellen angenommen, dann wären sogar 80 % aller betrachteten Taxischichten elektrisch bewältigbar. Insgesamt wurden fünf Szenarien mit unterschiedlichen Parametervariationen angenommen und basierend auf diesen die Auswirkungen der E-Taxis auf das Stromnetz ermittelt.

Die vierwöchigen Leistungsmessungen der fünf ausgewählten Wiener Niederspannungsnetze – in denen sich auch in der Realität Taxistandplätze befinden – ergaben, dass die vorhandenen Netzkomponenten in keinem Zeitpunkt des Beobachtungszeitraums an ihre thermischen Grenzen stießen. Dabei zeigen sich max. Auslastungen der Umspanner von 65 % und max. 50 % bei den Netzkabeln. Die vor-

handene Netzreserve kann somit u. a. für das Laden der Elektrotaxis herangezogen werden. Um aus wissenschaftlicher Sicht das maximale Potenzial der Ladestationen an den Taxistandplätze zu ermitteln, wurde bei allen Berechnungen der thermische Grenzstrom der Netzkomponenten als „obere“ Grenze angesetzt (entspricht einer Belastung von 100 %).

Aus den durchgeführten Netzsimulationen geht hervor, dass Unterspannungen und Überlastungen der Transformatoren in städtischen Netzgebieten nicht die primären Herausforderungen bei räumlich konzentrierten Ladevorgängen an Taxistandplätzen darstellen. Kernproblem ist jeweils die relevante Strangleitung, welche bei ungesteuertem Laden temporär bis zu 200 % überlastet wäre. Deshalb muss zur Garantie eines dauerhaft geordneten Netzbetriebs eine dezentrale, bedarfsgerechte Ladessteuerung eingesetzt werden, welche ohne nennenswerte Mobilitätseinbußen (<1 %) das Auslangen findet. Im Projekt ZENEM wurde dies durch die Begrenzung der Leistungsspitzen an den Ladestationen auf einen fixen Wert von 100 kW realisiert. Je nach aktuellem Ladestand der einzelnen Elektrofahrzeuge wurde die beschränkte Anschlussleistung stufenweise zugewiesen.

Reine Elektrofahrzeuge leisten in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen einen deutlichen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Dabei ergibt sich ein Potential für die CO₂-Reduktion von bis zu 80 %. Für eine Umstellung von 25 % (50 %) der gesamte Wiener Funktaxiflotte (~2.500 PKW) auf Elektrofahrzeuge bedeutet das eine absolute Verringerung von bis zu 5.040 (10.080) t CO₂-Äq. pro Jahr. Wird hingegen der Strom aus fossilen Kraftwerken erzeugt, dann können die Emissionswerte im Vergleich zu heutigen Verbrennungskraftfahrzeugen sogar um ein Vielfaches ansteigen.

Die Abschätzung der Investitionskosten (ohne Wartung und Verrechnung) zeigt, dass unter den gewählten Vereinfachungen für eine Schnellladestation (Anschlussleistung 100 kW, max. 50 kW je Ladepunkt) im Mittel rund 90.000 € ausgegeben werden muss. Dabei besteht jedoch eine starke Streuung, welche vor allem von den unterschiedlichen, standortabhängigen Aufwänden für den Netzausbau zur Herstellung des Netzübergabepunkts herrührt. Für die jährlichen Kosten (Investition und Betrieb) einer Ladeinfrastruktur mit 20 der beschriebenen Schnellladestationen ergeben sich im Mittel ca. 294.000 €/a.

Elektrofahrzeuge verursachen aufgrund der derzeitigen, noch relativ hohen Batteriepreise, größere Investitionskosten als konventionelle PKW derselben Klasse. Sie besitzen jedoch geringere spez. Energiekosten. Dieser positive Effekt wird durch die hohe Kilometerleistung der Funktaxis von durchschnittlich über 50.000 km noch verstärkt. Die Bewertung der jährlichen Kosten für ein handelsübliches Elektrofahrzeug mit 24 kWh ergibt in etwa 10.000 €/a. Dieser Wert liegt im Bereich eines vergleichbaren Mittelklasseautos.

Folgend sind die wesentlichen Projektergebnisse nochmals in vier konkreten Kernaussagen zusammengefasst.

1) *Ein Umstieg des derzeitigen Funktaxibetriebs auf reine Elektrofahrzeuge ist in Wien realisierbar.*

- Mit der Errichtung von Ladestationen an 25 Wiener Taxistandplätzen (22 kW je Ladepunkt) und heutigen Elektrofahrzeugen (24 kWh) sind zumindest 25 % aller Funktaxischichten ohne Änderung des Fahrverhaltens elektrisch bewältigbar.
- Bei Verdopplung des Ladestellenausbaus, des Ladeleistungslevels und der Batteriekapazität könnten unter diesen Voraussetzungen sogar 75 % aller Funktaxischichten elektrisch erfüllt werden.

2) *Bedarfsgerechte Ladesteuerung der E-Taxis ist notwendig, um lokale Überlastungen zu verhindern und einen geregelten Netzbetrieb garantieren zu können.*

- Ungesteuertes Schnellladen führt in den elektrischen Leitungen der betrachteten Niederspannungsnetze zu unzulässigen thermischen Überlastungen, welche im Extremfall sogar den doppelten Wert der erlaubten Grenze annehmen.
- Dezentrale und bedarfsgerechte Ladesteuerung hilft unerlaubte Leitungsbelastungen zu vermeiden. Teilweise kann sie einen kostenintensiven Leitungsausbau ersetzen, ohne dabei den derzeitigen Funktaxibetrieb negativ zu beeinflussen.

3) *Der Aufbau einer adäquaten Ladeinfrastruktur benötigt Investitionskosten im einstelligen Millionen-Euro-Bereich.*

- Die Abschätzung der jährlichen Kosten zur Errichtung und Instandhaltung von 25 gesteuerten Schnellladestationen (max. 100 kW Anschlussleistung) ergibt eine Annuität von mindestens 220.000 € pro Jahr.
- Ein derzeitiges Elektrofahrzeug (24 kWh) würde im Taxibetrieb etwa 10.000 € pro Jahr kosten (Investition und Betrieb, exkl. Ladeinfrastruktur) und liegt somit im Bereich der Aufwendungen für ein konventionelles Mittelklastaxi.

4) *Elektrotaxis liefern in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Reduktion.*

- Im Vergleich zu einem konventionellen verursacht ein elektrisch betriebenes Taxi bis zu 80 % weniger CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel), wenn zur Stromerzeugung erneuerbare Energiequellen eingesetzt werden.
- Ein Umstieg von 50 % der insgesamt 2.500 Wiener Funktaxis ergibt ein CO₂-Einsparungspotential von ca. 10.000 t CO₂-Äq. pro Jahr.

4 Ausblick und Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen des Projekts ZENEM konnten die relevanten Eckpunkte für eine anschließende Durchführung eines Taxibetriebs mit Elektrofahrzeugen abgeleitet werden. Wie die technischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen zeigen, ist ein Taxibetrieb in Wien mit rein elektrischen Fahrzeugen unter bestimmten Voraussetzungen großteils möglich und würde eine Verbesserungen der gesamtökologischen Situation und der Lebensqualität in Wien bringen. Für eine tatsächliche Umsetzung ist u. a. im Detail noch zu klären, wer die Kosten für die Ladeinfrastruktur trägt und wie eine sichere und funktionale Ladestation in der Realität aussehen muss.

Zur Planung einer adäquaten und kosteneffizienten Ladeinfrastruktur in Bezug auf Eigenschaften und Standort ist es unumgänglich, die lokalen Netzgegebenheiten zu berücksichtigen, da vor allem in Wien die Netzbereitstellung einen wesentlichen Anteil der Investitionskosten ausmacht. Zur Reduktion der Kosten besteht z.B. die Möglichkeit, die Ladestationen für Marketingzwecke ergänzend zu nutzen. Darüber hinaus könnte auch eine Mehrfachnutzung der Ladestellen am Taxistandplatz durch z.B. E-Carsharing an angrenzenden Parkplätzen angedacht werden.

Für die konkrete Realisierung der Ladestationen muss weiters ein geeignetes Ladesystem gefunden werden. Hier stehen konduktive, wie auch in weiterer Zukunft induktive Schnellladestationen zur Verfügung. Diese Möglichkeiten sind jedoch in Hinsicht auf Akzeptanz, Kosten, Nutzerfreundlichkeit und Sicherheit zu überprüfen. Eine Analyse in Bezug auf die Entkopplung von Ladestationen und Taxistandplatz würde ebenfalls relevante Erkenntnisse ergeben und womöglich eine gewinnbringende Alternative darstellen.

Die Wirtschaftlichkeit eines Umstiegs von konventionellen zu rein elektrisch betriebenen Taxis hängt sehr stark mit der Batterielebensdauer und dem Wiederverkaufswert des E-Fahrzeugs zusammen. Bisherige Erkenntnisse diesbezüglich sollten vertieft und detaillierte Modellierungen des Batteriesystems durchgeführt werden.

Um eine effiziente, rein elektrische Funktaxiflotte zu betreiben, ist eine darauf abgestimmte Vermittlung Voraussetzung. Die Nachteile der begrenzten Reichweite und notwendigen Ladezeiten können durch intelligentes Flottenmanagement und Prognosemethoden kompensiert werden. Dabei stellen die ladezustandsabhängige Vermittlung von Kundenfahrten und ein kluges Routing zu verfügbaren Ladestationen zentrale Punkte weiterführender Untersuchungen dar.

Überdies sollte eine Roadmap ausgehend von einem möglichen Einstiegsszenario in Wien erstellt, sowie die notwendigen, konkreten Rahmenbedingungen für die ersten Schritte des Umstiegs geklärt werden. Hier gibt es mit Sicherheit auch Handlungsbedarf für Politik und Wirtschaft.

Das Projektkonsortium empfiehlt aufgrund der im Projekt ZENEM entstandenen, ergänzenden Fragestellungen eine weitere Verfolgung und Förderung des übergeordneten Ziels einer zukünftigen Umstellung auf Elektrotaxis in Wien und plant selbst weitere Schritte in diese Richtung.

5 Literaturverzeichnis

- [Ande10] Anderl, M., et al.: *Klimaschutzbericht 2010*, Umweltbundesamt, Wien, 2010
- [Ande12] Anderl, M., et al.: *Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990–2010*, Umweltbundesamt, Wien, 2012
- [Beer10] Beermann, M., et al.: *Quo Vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeuge in Österreich*, Endbericht, Projektnummer 816075, A3plus - Austrian Advanced Automotive Technology, Graz, 2010
- [Bern07] Bernstein, L., et al.: *International Panel on Climate Change – Climate Change 2007: Synthesis Report*, p. 67, Valencia, 2007
- [BGB96] Bundesgesetz über die nichtlinienmäßige gewerbsmäßige Beförderung von Personen mit Kraftfahrzeugen (Gelegenheitsverkehrs-Gesetz 1996 – GelverkG), StF: BGBl. Nr. 112/1996 (WV), Abschnitt II, § 5
- [Burn12] Burnier de Castro, D., Rezania, R., Litzlbauer M.: *V2G-Strategien – Auswirkung verschiedener Elektromobilitätsszenarien auf die Spannungsqualität von Niederspannungsnetzen unter Betrachtung der Phasenunsymmetrie*, 12. Symposium Energieinnovation, Graz, 2012
- [CTS13] Mobility Technology Group, R&D Center: *CHAdemo technological strengths*, Online im Internet, URL: <http://www.chademo.com>, Abfrage: 01.07.2013 (MEZ 13:33 Uhr)
- [Einf11] Einfalt, A., et al.: *Konzeptentwicklung für ADRES - Autonome Dezentrale Erneuerbare Energie Systeme*, Endbericht, Projektnummer: 815674, FFG-Forschungsprojekt, Energie der Zukunft, 1. AS, Wien 2011.
- [EIÖ10] Austrian Automotive Association Service GmbH (Herausgeber): *Elektromobilität in Österreich. Momentaufnahme der Forschung und Industrie*, Wien, 2010
- [Haas09] Haas, R., et al.: *Elektra - Entwicklung von Szenarien der Verbreitung von Pkw mit teil- und vollelektrifiziertem Antriebsstrang unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen*, Endbericht, Projektnummer 816074, A3plus - Austrian Advanced Automotive Technology, Wien, 2009
- [Hein99] Heinhold, L., Stubbe, R. (Herausgeber): *Kabel und Leitungen für Starkstrom*, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 5. Auflage, 1999.
- [Holl95] Hollermann, A. F., Wiberg, E.: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 101. Auflage, de Gruyter-Verlag, Berlin, 1995.
- [Huet12] Hütter, D., Stigler, H.: *Kosten und Bepreisungsmodelle einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für E-Mobilität in Österreich*, 12. Symposium Energieinnovation, Graz, 2012
- [Klel09] Klell M., et al.: *Wirkungsgrade und CO2-Emissionen verschiedener Energieketten*, Bericht, HyCentA, Graz, 2009
- [Kloe11] Klöss, M.: *Potentials of hybrid and electric cars to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions in passenger car transport*, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (TU Wien), März 2011
- [Lann12] Lanner, M.: *Auswirkungen von Ladesteuerungen elektrischer Fahrzeuge in einem konkreten Verteilnetz*, Diplomarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (TU Wien), März 2012.
- [Leit11] Leitinger, C., et al.: *Smart Electric Mobility – Speichereinsatz für regenerative elektrische Mobilität und Netzstabilität*, Endbericht, Projektnummer: 821886, FFG-Forschungsprojekt, NE2020, 2. AS, Wien 2011.

- [Litz09] Litzlbauer, M.: *Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher in MATLAB*, Diplomarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (TU Wien), Oktober 2009
- [Litz13] Litzlbauer, M., Schuster, A.: *Erfüllbarkeitsszenarien einer E-Taxiflotte – Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM*, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2013
- [Meix02] Meixner, H.: *Contracting - Modelle, grundlegende Konzepte und ihre ökologische Eignung im Überblick*, hessenENERGIE GmbH, Wiesbaden, November 2002, Online im Internet, URL: <http://www.hessenenergie.com>, Abfrage: 01.07.2013 (MEZ 16:34 Uhr)
- [Rein07] Reinthaler, M., et al.: *Evaluation of speed estimation by Floating Car Data within the research project dMOTION*, Vortrag, 13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Beijing, China, 2007
- [Schl08] Schlabbach, J., Mombauer, W.: *Power Quality: Entstehung und Bewertung von Netzrückwirkungen; Netzanschluss erneuerbarer Energiequellen*, Berlin: VDE-VERLAG, 2008.
- [Schu10] Schuster, A., et al.: *Begleitforschung der TU Wien in VLOTTE – Endbericht*. Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (TU Wien), April 2010.
- [Schu12] Schuster, A., Litzlbauer M., Reinthaler, M.: *Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität – Überblick der Projektziele*, 12. Symposium Energieinnovation, Graz, 2012
- [Schu13a] Schuster, A., Litzlbauer, M.: *Begleitforschung der TU Wien in ElectroDrive Salzburg – Endbericht*, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe (TU Wien), Jänner 2013.
- [Schu13b] Schuster, A.: *Ladeinfrastruktur und Verteilnetzbelastungen durch Elektromobilität*, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (TU Wien), April 2013.
- [Schu13c] Schuster, A., Litzlbauer, M., Gawlik, W.: *Auswirkungen einer E-Taxiflotte auf das städtische Verteilnetz – Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM*, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2013
- [SKB12] Energie-Control Austria (Herausgeber): *Stromkennzeichnungsbericht 2012*, Energie-Control Austria, Wien, 2012
- [Ste10] Steinkemper, H.: *Wettlauf um die zweite Erfindung des Automobils. Elektromobilität als Baustein einer nachhaltigen Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik*, Internationales Verkehrswesen (62), S. 17ff, März 2010
- [Tanc11] Tan, C.: *Interview mit Christian Hess, Geschäftsführer des IsarFunk und Betreiber des ersten Elektrotaxis*, Online im Internet, URL: <http://www.grueneautos.com>, Stand: 11.08.2011, Abfrage: 01.07.2013 (MEZ 14:21 Uhr)
- [TDN13] Nissan Österreich (Herausgeber): *Technische Daten des Nissan Leaf*, Online im Internet, URL: <http://www.nissan.at>, Abfrage: 01.07.2013 (MEZ 13:18 Uhr)
- [TFM11] HUSS-VERLAG GmbH (Herausgeber): *Das erste E-Taxi fährt in München*, TAXI HEUTE-Fachmagazin, Seite 25, Ausgabe 8, 2011
- [TSV13] Taxiinnung Wirtschaftskammer Wien (Herausgeber): *Wiener Taxistandplatzverzeichnis*, Online im Internet, URL: <http://portal.wko.at>, Abfrage: 01.07.2013 (MEZ 12:41 Uhr)
- [Wagn07] Wagner, H., et al.: *CO₂-Emissionen der Stromerzeugung – Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken*, BWK Das Energie-Fachmagazin, Bd. 59 (2007) Nr. 10, Seite 44 – 52, 2007
- [Webe12] Weber, R.: *Combined Charging System*, Präsentation, 5th International Congress on Charging Technology for Electric Vehicles, Berlin, Dezember 2012

- [Widh12] Widhalm, P., et al.: *Robust Road Link Speed Estimates for Sparse or Missing Probe Vehicle Data*, Vortrag, Intelligent Transportation Systems Conference 2012, Anchorage (USA), 2012

6 Anhang

6.1 Abkürzungen

AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
BEV	Rein elektrisches, batteriebetriebenes Fahrzeug (engl. Battery electric vehicle)
c_w	Strömungswiderstandskoeffizient
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
EV	Elektrofahrzeug (engl. electric vehicle)
FZ	Fahrzeug
HEV	Hybrid-Elektrofahrzeug (engl. Hybrid electric vehicle)
KW	Kraftwerk
MIV	motorisierter Individualverkehr
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PHEV	Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeug (engl. Plug-in hybrid electric vehicle)
PKW	Personenkraftwagen
PVC	Polyvinylchlorid
SOC	Ladezustand (engl. state of charge)
SZ	Szenario
THG	Treibhausgasemissionen
TSP	Taxistandplatz
TTW	„vom Tank bis zum Rad“ (engl. Tank-to-Wheel)
WTT	„von der Quelle bis zum Tank“ (engl. Well-to-Tank)
WTW	„von der Quelle bis zum Rad“ (engl. Well-to-Wheel)

6.2 Ergänzende Abbildungen

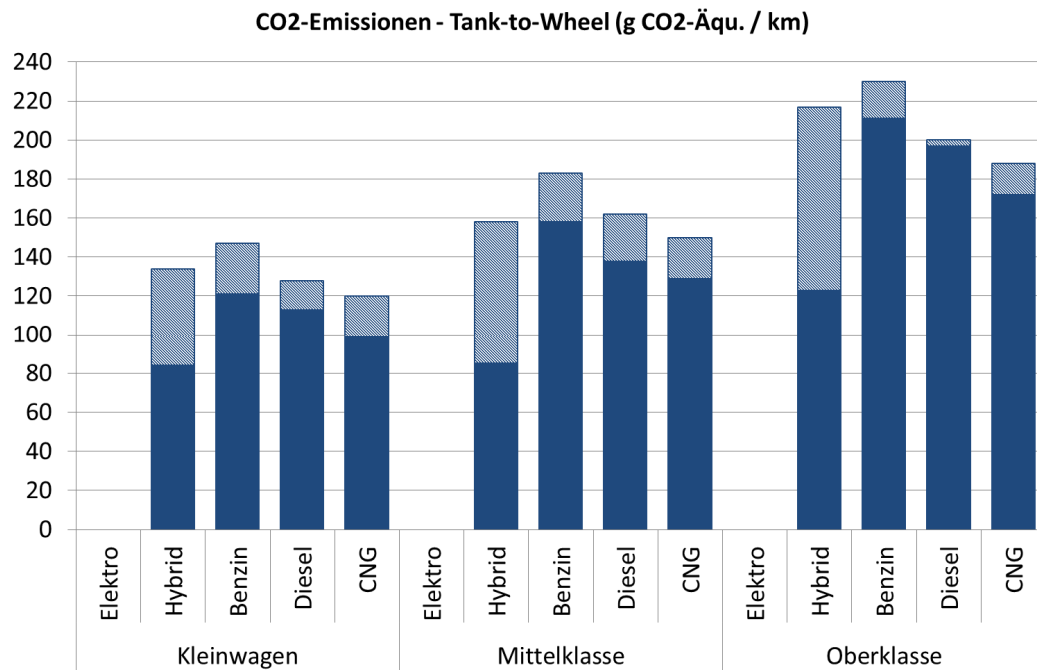


Abbildung 30: Spezifische äquivalente CO₂-Emissionen (TTW) für unterschiedliche Fahrzeugtypen

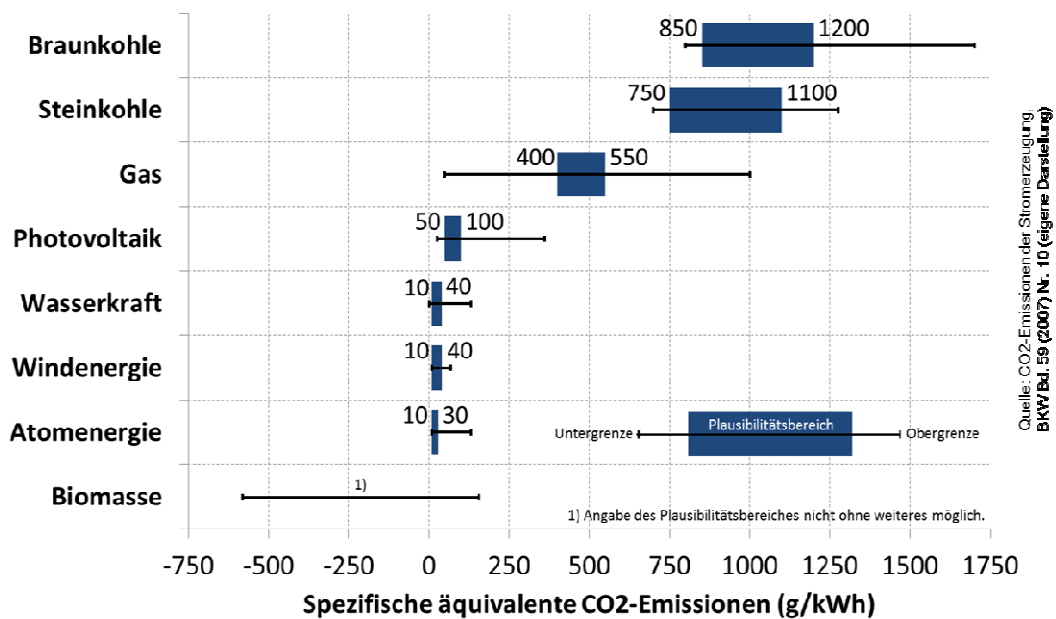


Abbildung 31: Spezifische äquivalente CO₂-Emissionen für unterschiedliche Stromerzeugungsarten

IMPRESSUM

Verfasser

Technische Universität Wien
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
Gußhausstraße 25 / E370 - 1
Wolfgang GAWLIK
Tel: +43 (0)1 58801 370 111
Fax: +43 (0)1 58801 370 199
E-Mail: wolfgang.gawlik@tuwien.ac.at
Web: www.ea.tuwien.ac.at/projekte/zenem/

Projektpartner

- AIT Austrian Institute of Technology GmbH
- Taxi 31300 VermittlungsgmbH
- Wien Energie Stromnetz GmbH

AutorInnen

Technische Universität Wien – Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe:

- Wolfgang Gawlik
- Markus Litzlbauer
- Andreas Schuster

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

- Hannes Koller
- Martin Reinthaler

Taxi 31300 VermittlungsgmbH:

- Nikolaus Norman
- Martin Waldbauer

Wien Energie Stromnetz GmbH:

- Andreas Bolzer
- Mario Leitner

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH