

# Szenarienbasierte Verteilnetz-, Emissions- und Kostenanalyse einer zukünftigen E-Taxiflotte in Wien

Forschungsprojekt ZENEM – Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität

Markus Litzlbauer  
Technische Universität Wien  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
1040 Wien, Österreich  
markus.litzlbauer@tuwien.ac.at

Andreas Schuster  
Technische Universität Wien  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
1040 Wien, Österreich  
andreas.schuster@tuwien.ac.at

**Abstract** — Mit dem Forschungsprojekt ZENEM<sup>1</sup> hat man sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkungen von zukünftigen E-Taxis für unterschiedliche Erfüllbarkeitsszenarien auf das Verteilnetz in Wien umfassend zu untersuchen [1]. Als Grundlage dienen einerseits die erhobenen Vorbelastungen von unterschiedlichen Wiener Niederspannungsnetzen und andererseits GPS-basierende, historische Mobilitätsdaten einer Wiener Funktaxiflotte, die gemeinsam mit den gewählten E-Fahrzeugeigenschaften und Ladeinfrastrukturvarianten die berücksichtigten Szenarien charakterisieren. In diesem Artikel wird die Entwicklung der einzelnen Erfüllbarkeitsszenarien dargelegt, die Auswirkungen auf das Verteilnetz erläutert und ein Überblick der damit verbundenen ökologischen und ökonomischen Auswirkungen gegeben.

**Keywords** — Elektromobilität, Funktaxiflotte, Ladestellen-ausbau, Erfüllbarkeitsszenarien, Netzauswirkungen, ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen

## I. EINLEITUNG

Entsprechend dem IPCC Bericht [2] besteht die Notwendigkeit, die CO<sub>2</sub>-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 [3]. Zusätzlich ergeben sich weitere Problematiken durch die weltweite Erdölverknappung und den damit verbundenen Preisanstieg, welcher den Verkehrssektor besonders stark trifft.

Die 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 somit eine notwendige Ergänzung des Mobilitätsangebots darstellt. Die Belastungen des Taxiverkehrs treten vorwiegend in Großstädten, einschließlich der suburbanen Randbezirke auf. Dort könnten durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen lokal Lärm sowie Treibhausgasemissionen verringert werden.

Die Anforderungen an zukünftige E-Taxis sind jedoch bedingt durch große Kilometerleistungen und ausgedehnte Be-

triebsdauern sehr hoch. Beim Umstieg auf rein elektrisch betriebene Taxis und der Nutzung der limitierten Standzeiten zum Laden an den vorhandenen Taxistandplätzen ist mit hohen Ladeleistungen zu rechnen und Ladesteuerungen können nur im reduzierten Ausmaß angewendet werden. Elektrotaxis verursachen dadurch punktuell an den Ladestationen der Taxistandplätze starke Zusatzbelastungen und können im ungesteuerten Fall einzelne Netzkomponenten überlasten.

Um die Auswirkungen einer hohen Durchdringung von rein elektrisch angetriebenen Taxis auf das Wiener Niederspannungsnetz (NS-Netz) zu untersuchen, wird im Projekt ZENEM die Umstellung einer gesamten Funktaxiflotte auf Elektrofahrzeuge inklusive Ladestelleninfrastruktur an Taxistandplätzen näher analysiert.

Dabei besteht das Projektconsortium aus der Technischen Universität Wien (Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe), dem Austrian Institute of Technology GmbH (Department Mobility – Geschäftsfeld DTS), der TAXI 31300 VermittlungsgmbH und der Wien Energie Stromnetz GmbH.



## II. AUSGANGSSITUATION

Die verwendete Datengrundlage in Bezug auf das Mobilitätsverhalten der Funktaxiflotte sowie bezüglich der aktuellen Vorbelastungen des Stromnetzes wird folgend beschrieben.

### A. Funktaxiflotte

Zur Abbildung des Mobilitätsverhaltens einer Funktaxiflotte wurden im Projekt ZENEM die anonymisierten GPS-Daten der Wiener Vermittlungsgesellschaft Taxi 31300 für das gesamte Kalenderjahr 2011 herangezogen<sup>2</sup>. Da das GPS-System der Taxizentrale grundsätzlich für die Vermittlung konzipiert wurde, bestehen die Originaldaten jeder Taxifahrt aus mehreren Teilabschnitten mit unregelmäßigen, lückenhaften Berichtsintervallen (ca. 25 bis 60 s). Diese systembedingte Eigenschaft und die Anonymisierung macht es unmöglich das Mobilitätsverhalten der Taxis für das gesamte Kalenderjahr durch-

<sup>1</sup> Das Projekt ZENEM „Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ im Zeitraum von Mai 2011 bis April 2013 durchgeführt.

<sup>2</sup> Die Flottengröße von TAXI 31300 beträgt etwas mehr als 800 Funktaxis. Die gesamte Wiener Funktaxiflotte besteht hingegen aus rund 2.500 Fahrzeugen.

gängig darzustellen. Durch die Entwicklung einer Synthesemethode konnten jedoch aus den gestückelten Mobilitätsdaten Einzelfahrten zwischen den Taxistandplätzen und darüber hinaus durchgängigen Wegeketten modellhaft rekonstruiert werden. Dazu wurden vom Projektpartner AIT im wesentlichen MapMatching, Routing, Filteralgorithmen und Aggregierungsfunktionen angewendet.

Neben dem Mobilitätsverhalten wurde ebenfalls der Energiebedarf jeder einzelnen Fahrt zwischen zwei Taxistandplätzen vom Projektpartner AIT abgeschätzt und die Ergebnisse mit den Messwerten der Elektromobilitäts-Modellregionen „VLOTTE“ [4] und „ElectroDrive Salzburg“ [5] validiert. Zur Energieberechnung eines zukünftigen E-Taxis berücksichtigt das zugrundeliegende Fahrzeugmodell u.a. die Fahrzeugmasse, den Strömungswiderstand und die Stirnfläche. Darüber hinaus werden die zusätzliche Masse für den mittleren Besetzungsgrad plus Gepäck, die Verkehrslage (Einfluss auf Anzahl und Intensität von Beschleunigungen) und die Routenwahl (höherer Energiebedarf beim Abbiegen an Kreuzungen) in die Berechnungen mit aufgenommen.

Das Pool der aufbereiteten GPS-basierenden Mobilitätsdaten beinhaltet schließlich die wichtigsten Merkmale, wie Fahrtlängen, -dauern, Verweilzeiten an den Taxistandplätzen (TSP), die geographische Verteilung der Fahrten und Standorte sowie den Energiebedarf je Fahrt für das gesamte Jahr 2011. Abbildung 1 stellt den mittleren Verlauf der gleichzeitig fahrenden, konventionellen Taxis dar. Es ist eine klare Wochentagscharakteristik erkennbar.

Für die nachfolgenden Analysen wurde dieses Mobilitätsverhalten ohne Fahrverhaltensänderungen bei einem Umstieg auf rein batteriebetriebene Elektrotaxis herangezogen. Das bedeutet darüber hinaus, dass zum Laden der Fahrzeugbatterien genau die ermittelten Standzeiten (Wartezeiten) an den Taxistandplätzen verwendet werden und somit auch nur dort ein Ladestellenausbau betrachtet wird.

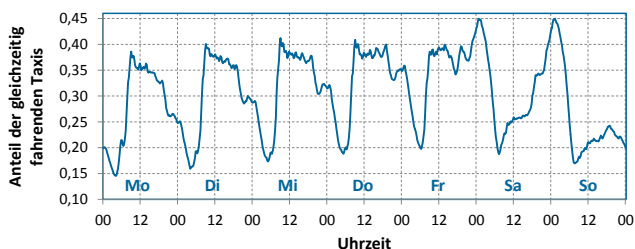


Abbildung 1: Gemittelter Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden Funktaxis (gesamte Flotte von TAXI 31300 des Jahres 2011)

### B. Niederspannungsnetzabschnitte

Ergebnisse aus Vorprojekten (z.B. [6]) zeigen, dass zukünftige Elektromobilität hauptsächlich in Niederspannungsnetzen nennenswerte Auswirkungen hervorrufen. Daher wurde der Fokus im Projekt ZENEM auf diese Netzgebiete gelegt.

Standardisierte Lastprofile entsprechen gemittelten Lastgängen und bilden in keiner Weise die vorhandenen Leistungsschwankungen einzelner Haushalte bzw. Wohnhäuser ab. Deshalb können diese für Lastflussberechnungen in NS-Netzen nur näherungsweise eingesetzt werden.

Um im Projekt ZENEM repräsentative Ergebnisse erzielen zu können, wurden fünf unterschiedliche Niederspannungsnetzabschnitte der Kategorien „Wohnen“, „Innenstadt“ und „Einkaufszentrum“ für die weiterführenden Netzanalysen ausgewählt und in diesen jeweils eine zumindest vierwöchige Langzeitleistungsmessung vom Projektpartner Wien Energie Stromnetz GmbH durchgeführt.

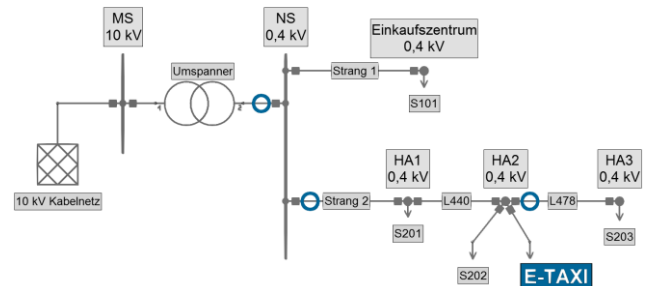


Abbildung 2: Skizze des Messaufbaus für eines der fünf ausgewählten Niederspannungsnetzabschnitte (Kreise entsprechen den Messpunkten)

Bei der Auswahl der realen Netzabschnitte wurde darauf geachtet, dass sie eine Vielfalt an Verbrauchergruppen (Haushalte, Gewerbe, etc.) beinhalten und in der Realität ein Taxistandplatz vorhanden ist. Für die Messung der Ströme und Spannungen aller Phasen in drei zehn Minuten Raster wurden „Power Network Analyzer“ der Firma DEWETRON angeschafft und im Messaufbau (vergleiche Abbildung 2) jeweils an der Sekundärwand des Umspanners (Summenlastgang aller Stränge) und darüber hinaus an weiteren ausgewählten Stellen (z.B. nächster Netzknoten zum Taxistandplatz) installiert. Aus den Messergebnissen sowie den Kennwerten der Strangleitungen (PVC-Erdkabel in Sand-Kies-Bettung unter Asphaltdecke) und den Umspannern (630 bzw. 800 kVA Nennleistung) wurden die derzeitigen elektrischen Belastungen aller Netzkomponenten im Lastflussprogramm NEPLAN<sup>®</sup> modelliert.

Grundsätzlich kann festzuhalten werden, dass bei allen Netzabschnitten (betrieben als offene Ringnetze) sowohl die Umspanner, als auch die gemessenen Kabelstränge, bei derzeitigen Belastungen nicht überlastet sind und somit ein gewisses Leistungspotential für zukünftige Ladestationen vorhanden ist. Auf Grund der (n-1)-Struktur des Wiener Stromnetzes werden die Netzkomponenten (Kabel, Umspanner,...) im Normalbetrieb mit durchschnittlich 60 bis 70 % des thermischen Grenzstroms betrieben, um im Störfall notwendige Netzkopplungen gewährleisten zu können. Damit aus wissenschaftlicher Sicht jedoch das maximale Potential ermittelt werden kann, ist bei den nachfolgenden Berechnungen der thermische Grenzstrom der Netzkomponenten als „obere“ Grenze angesetzt worden (entspricht 100 % Auslastung).

### III. ERFÜLLBARKEITSSZENARIEN

Zur Konzeptionierung des Ladeinfrastrukturausbaus wurden die über 250 Taxistandplätze<sup>3</sup> geclustert, d.h. nahe aneinander liegende Taxistandplätze zusammengefasst, und im Anschluss daran die TSP-Cluster bestmöglich nach ihrer

<sup>3</sup> Etwa zwei Drittel der Taxistandplätze in Wien sind von 0 bis 24 Uhr nutzbar und der restliche Teil besteht aus zeit- oder bedarfsbeschränkten Taxistandplätzen.

„Wichtigkeit“ gereiht. Für nähere Informationen zur Methodik wird an dieser Stelle auf [7] verwiesen.

Ausgehend von den aufbereiteten Mobilitätsdaten und einem im Projekt ZENEM weiterentwickelten MATLAB®-Modell können die fahrzeugexakten und szenarienabhängigen Ladezustandsverläufe und darüber hinaus die Ladeleistungsprofile, der abgebildeten E-Taxiflotte in Minutenwerten berechnet werden. Als Grundlage für die Erfüllbarkeitsanalyse wurde das synthetische Mobilitätsdatenpool weiter eingeschränkt und jene Wegeketten ausgewählt, die einerseits gewissen Qualitätskriterien (z.B. Höchstgeschwindigkeit) entsprechen und andererseits durchgängige, gesamte Taxischichten (Dienste) darstellen<sup>4</sup>.

Im Projekt ZENEM wird von der „Erfüllbarkeit einer Wegeketten“ eines E-Taxis gesprochen, wenn der Batterieladezustand am Ende der Wegeketten größer oder gleich ist als jener am Beginn und dazwischen niemals die minimale SOC-Grenze unterschritten wird. Bezieht man die szenarienabhängige Anzahl aller erfüllbaren Wegeketten auf die Gesamtheit der betrachteten, so erhält man die „Erfüllbarkeitsrate“.

Eine Begründung für die Gleichsetzung des SOC<sub>END</sub> mit dem SOC<sub>START</sub> (50 %) 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. Es kommt durch diese Annahme außerdem zu keiner Verschleppung des Energiebedarfs und zu keiner Verfälschung der Energiebilanz.

TABELLE 1: PARAMETERWERTE DER VIER GEWÄHLTEN SZENARIEN (50 kW) UND EINEM ALTERNATIVEN SZENARIO MIT 22 kW LADELEISTUNG

	SZ 1	SZ 2	SZ 3	SZ 4	SZ 1A <sup>a</sup>
Ladeleistung (kW)	50				22
Ladestellenausbau (TSP-Cluster)	20		55		26
Batteriekapazität (kWh)	24	48	24	48	24
Erfüllbarkeitsrate (% ,gerundet)	25	45	60	80	25

<sup>a</sup> alternatives Szenario mit 22 kW Ladeleistung je Ladepunkt

Der Raum aller möglichen Szenarien wird durch die Parameter „Batteriekapazität“, „Ladeleistung“ und „Ladestellenausbau“ aufgespannt. Durch kombinatorische Variation dieser Stellgrößen mit diskreten Schrittweiten innerhalb ihrer vordefinierten Parametergrenzen wurde die prozentuelle Erfüllbarkeit für jeden betrachteten Fall berechnet. Aus den Ergebnissen wurden vier zentrale Szenarien und ein alternatives Szenario (SZ 1A) gewählt, die in weiterer Folge als Grundlage für die Netzsimulationen [8] dienen. In Tabelle 1 sind die ausgewählten Parameterwerte der formulierten Szenarien aufgelistet.

Die Analysen der Erfüllbarkeit haben – über den weiten Bereich der Parametervariation – deutlich gezeigt, dass die gemessenen Standzeiten an den Taxistandplätzen zu kurz sind um den elektrischen Energiebedarf unter den gewählten Rahmenbedingungen mit Normalladen (Anschlussleistung von 3,7 kW, einphasig) zu decken. Dieses Ergebnis ist unabhängig

<sup>4</sup> Wegeketten Ende grundsätzlich mit dem Abmelden des Taxis vom Vermittlungssystem. Dies kann einerseits einen Chauffeurwechsel und somit das Ende einer Schicht bedeuten, aber andererseits auch nur eine Pause des Taxilenkers bzw. einen Verbindungsfehler zum System.

von der Anzahl der mit Ladeinfrastruktur ausgestatteten TSP-Cluster (siehe Abbildung 3).

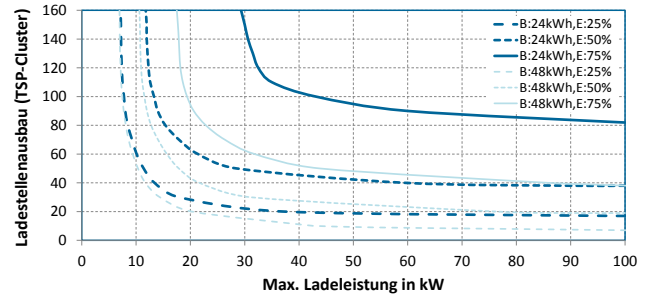


Abbildung 3: Notwendiger Ladestellenausbau bzw. Ladeleistung für unterschiedliche Erfüllbarkeitsraten (E) und Batteriekapazitäten (B)

Für ein Szenario mit einer Erfüllbarkeit von 25 % und einer Batteriekapazität<sup>5</sup> von 24 kWh je E-Taxi müssten, unter den implizierten Rahmenbedingungen, bei einer max. Ladeleistung von 22 kW<sup>6</sup> etwa 26 Taxistandplätze und bei 50 kW rund 20 TSP mit Ladestellen ausgestattet werden. Für Szenarien mit einer Erfüllbarkeit von 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 3).

#### IV. AUSWIRKUNGEN AUF DAS VERTEILNETZ

Basierend auf den fahrzeugexakten und szenarienabhängigen SOC-Verläufen wurden mittels MATLAB® die – im ersten Schritt – ungesteuerten Summenladeleistungsprofile der Ladestationen aller betrachteten Taxistandplätze im Minutenraster ermittelt. Diese dienen in Verbindung mit der erhobenen Vorbelastung der ausgewählten Netzabschnitte als Grundlage für die nachfolgenden Netzanalysen.

##### A. Netzbelastungen und Spannungsverhältnisse

Auf Basis der realen, elektrischen Parameterwerte aller vorhandenen Netzkomponenten sind die fünf gewählten NS-Netze im Lastflussberechnungsprogramm NEPLAN® modelliert. Das selbsttätige Starten der Netzsimulationen und die Analyse der resultierenden Ergebnisse übernehmen entwickelte MATLAB®-Routinen.

Um unsymmetrische Simulationen ermöglichen zu können, wurden die gemessenen Leistungsprofile (Wirk- und Blindanteil je Phase) der einzelnen Hausanschlüsse gemäß den Jahresenergieverbräuchen zugeordnet. Die Analysen wurden im ein bzw. fünfzehn Minutenraster durchgeführt sowie die Auslastungen der wichtigsten Komponenten (Trafo und Strangleitungen) und die Spannungswerte aller Knotenpunkte berechnet<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> Die nutzbare Batteriekapazität und der Wirkungsgrad des Lademanagements wurden jeweils mit 90 % festgelegt.

<sup>6</sup> 22 kW (AC, 3 • 230 V • 32 A); 50 kW (DC, 400 V • 125 A)

<sup>7</sup> Es wurde eine fixe primärseitige Trafospaltung von 102 % (typische Stufenstellereinstellung im Wiener NS-Netz) vorausgesetzt.

Aufgrund der längenmäßig geringen Ausdehnung der „Stadtnetze“ sind Spannungshaltungsprobleme<sup>8</sup>, trotz modellierter E-Taxi-Ladestationen (ungesteuert), in keinem der betrachteten Netze identifiziert worden und daher nicht zu erwarten. Bei NS-Netzen mit großflächiger Ausdehnung könnte diese Problematik allerdings entstehen.

Die Maxima der Trafoauslastungen erhöhen sich durch die Ladeleistungsprofile um 5 bis 70 %. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Auslastungen bedingt durch ungesteuerte E-Taxis an den Umspannern durchwegs im unproblematischen Bereich liegen. Nur in Ausnahmefällen müssen diese Transformatorbelastungen näher betrachtet werden.

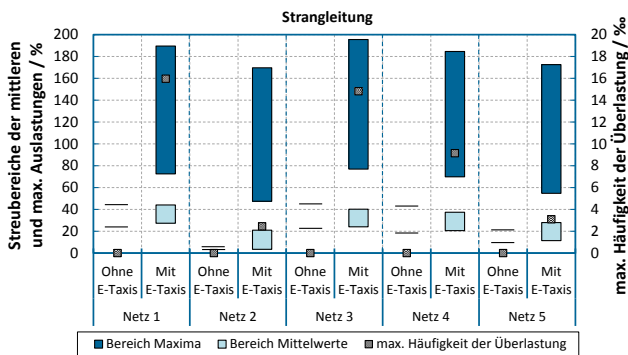


Abbildung 4: Streubereiche der Strangleitungsauslastungen der fünf NS-Netze für die SZ 1 bis 4 ohne und mit ungesteuerten E-Taxis sowie die maximale Häufigkeit der Überlastung (rechte Achsenbeschriftung)

Im Gegensatz zum Umspanner treten in den Strangleitungen der betrachteten Netze und Szenarien mitunter starke Überlastungen im ungesteuerten Fall auf. Die Strangleitung ist jenes Leitungsstück, welches einen NS-Abzweig mit der Sammelschiene des Umspanners verbindet. Folglich wird diese mit dem gesamten Summenstrom aller nachfolgenden Verbraucher durchflossen. Abbildung 4 zeigt 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“).

Die Spitzenwerte liegen im Bereich von 170 % bis fast 200 %. Betrachtet man die auftretenden Häufigkeiten, so ist ersichtlich, dass diese kumulierte Überlastungsdauer (> 100 %) im Jahr max. 5 Tage beträgt. Um Überlastungen der Strangleitungen unter den gewählten Rahmenbedingungen jedoch ganzjährig vermeiden zu können, müssen Adaptionen (z.B. Ladesteuerungen) durchgeführt werden.

Wie zuvor erwähnt, wurde ein alternatives Szenario mit geringeren Ladeleistungen (22 kW) je E-Taxi simuliert. Die kritischen Strangmaximalauslastungen wurden im Vergleich zum Szenario 1 (gleiche Erfüllbarkeitsrate) in allen Netzen um rund 35 % reduziert (siehe Abbildung 5). Auch die maximalen Umspannerauslastungen verringerten sich um bis zu 20 %. Um jedoch die Auslastungen aller NS-Netzabschnitte der betrachteten Szenarien auf einen Wert unter 100 % zu verringern, wird

<sup>8</sup> Die Ergebnisse der Netzanalysen wurden auf die Einhaltung der Pegelwerte nach DIN EN 50160 und den Kriterien aus „VDN-Technische Regeln“ geprüft und bewertet.

eine bedarfsgerechte, dezentrale Ladesteuerung benötigt, welche nachfolgen erläutert wird.

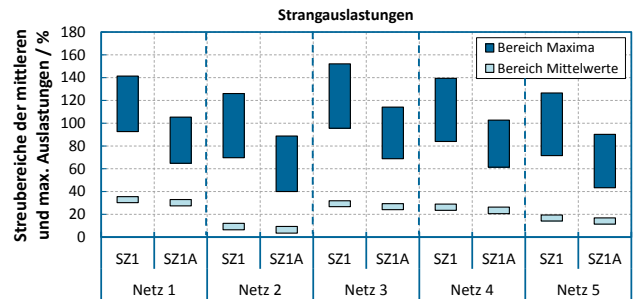


Abbildung 5: Streubereiche der Strangleitungsauslastungen aller fünf NS-Netze für die Szenarien 1 und 1A (alternatives Szenario)

## B. Ladesteuerung

Um Überlastungen einzelner Netzkomponenten vorzubeugen, ist eine entsprechende Ladesteuerung vorzusehen, ohne die Mobilität der Taxis einzuschränken.

Mit Hilfe des erweiterten MATLAB<sup>®</sup>-Tools wurden einfache Ladesteuerungen durchgeführt, welche die Ladeleistungsspitzen vor Ort auf den fixen Wert von 100 kW pro Ladestation begrenzen. Dabei wird die Ladeleistung je E-Taxi bedarfsbasiert vermindert. Durch diese Reduktion sind alle Netzkomponentenauslastungen kleiner 100 % und Überschreitungen des thermischen Grenzstromes treten somit nicht mehr auf. Dies wurde mittels zusätzlichen Netzsimulationen bestätigt. Ebenfalls ist die resultierende Erfüllbarkeit der E-Taxi-Wegekette untersucht worden, wobei keine nennenswerte Veränderung (< 1 %) durch diese Ladesteuerung entstehen. In Abbildung 6 ist der Vergleich zwischen den ungesteuerten und gesteuerten Netzauslastungen je Szenario ersichtlich.

In Bezug auf Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen können als verwandte Arbeiten u.a. [9] und [10] genannt werden. Diese beziehen sich zum Unterschied jedoch auf den motorisierten Individualverkehr.

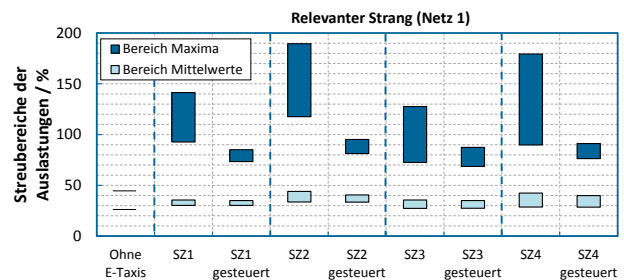


Abbildung 6: Streubereiche der Strangleitungsauslastungen für Netz 1 mit ungesteuerten und gesteuerten sowie ohne E-Taxis

## V. RAHMENBEDINGUNGEN

Folgend werden die ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen bzw. Auswirkungen einer Umstellung auf elektrisch betriebene Funktaxis überblicksmäßig behandelt.

### A. Ökologische Aspekte

Reine Elektrofahrzeuge (BEV) haben gegenüber konventionellen Autos mit Verbrennungsmotoren u.a. den Vorteil, dass sie im Betrieb lokal keine CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Jedoch bewirkt die Stromerzeugung je nach Primärenergiequel-



le und Kraftwerksart erhebliche Emissionswerte [11]. Der österr. Strommix generierte im Jahr 2011 – aufgrund des hohen Wasserkraftanteils – durchschnittlich 192,5 [12] bis 272,4 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro kWh (mit Gewichtung der Stromimporte). Hingegen betrug der mittlere CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Gebiet der ENTSO-E 412,8 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro kWh. Dabei heben Kohlekraftwerke mit äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich von 750 bis 1.200 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro kWh die Statistik deutlich an.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Literaturrecherche ([13] bis [15])<sup>9</sup> und Analysen – die spezifischen äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen (Well-to-Wheel) – für unterschiedliche Fahrzeugklassen, Antriebs- und Stromerzeugungsarten dargestellt. Der schraffierte Bereich illustriert das Spektrum der erhobenen Ergebniswerte.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass Elektrofahrzeuge vor allem in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen einen deutlichen Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten können. Dabei ergibt sich bei Verwendung von regenerativer Stromerzeugung ein Potential für die CO<sub>2</sub>-Reduktion von bis zu 80 %. Für eine Umstellung von 25 % (50 %) der gesamten Wiener Funktaxiflotte<sup>10</sup> auf Elektrofahrzeuge bedeutet das eine absolute Verringerung von bis zu 5.040 (10.080) t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr<sup>11</sup>.

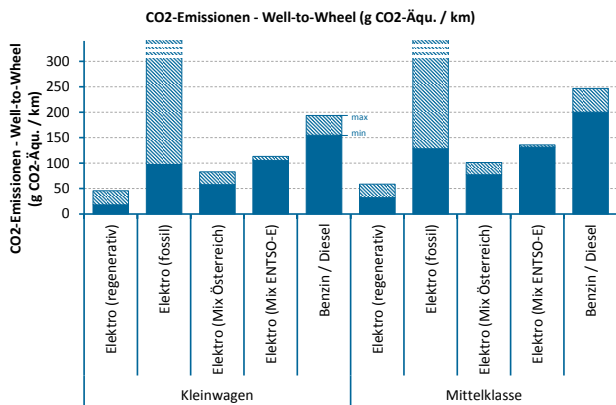


Abbildung 7: Spezifische äquivalente CO<sub>2</sub>-Emissionen (WTW) für unterschiedliche Stromerzeugungsarten

## B. Ökonomische Aspekte

### 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.

In Tabelle 2 ist die abgeschätzte Bandbreite der relevanten Kosten aufgelistet. Basierend auf dieser ergeben sich Investitionskosten für eine Ladestelle (Anschlussleistung 100 kW, max. 50 kW bzw. 22 kW je Ladepunkt) von rund 56.500 € bis

<sup>9</sup> Im Unterschied zu den angeführten verwandten Arbeiten ergeben sich hier durch den Taxibetrieb deutlich höhere Jahreskilometerleistungen (s. Fn. 10).

<sup>10</sup> Die gesamte Wiener Funktaxiflotte besteht aus rund 2.500 Fahrzeugen; es wurde eine durchschnittliche Kilometerleistung von 50.000 km/a angenommen.

<sup>11</sup> Für den gesamten Verkehrssektor des Bundeslandes Wien ergab sich im Jahr 2010 ein Emissionswert von 3,43 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. [16].

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 sowie Ladesteuerungsmethoden in die Ausbauplanung der Ladestationen zu integrieren.

TABELLE 2: BANDBREITE DER ABGESCHÄTZTEN KOSTENPUNKTE FÜR DIE LADEINFRASTRUKTUR

	Bandbreite	
	Minimum	Maximum
Ladestation <sup>a</sup>	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	
Abschreibungsdauer Erdkabel	40 Jahre	

<sup>a</sup> Anschlussleistung 100 kW, max. 50 kW bzw. 22 kW je Ladepunkt

Nimmt man für alle berücksichtigten Aufwände den Mittelwert und berechnet die jährlichen Kosten für das Szenario 1 mit 20 Schnellladestationen, so ergeben sich Ausgaben in der Höhe von etwa 294.000 €/a.

### Fahrzeuge:

Es wurden unter anderen die Beträge für Investition, Wiederverkaufswert, Förderung, Versicherung, Wartung und Reparatur sowie die Energiekosten auf Basis eines Nissan Leafs und zweier konventioneller Fahrzeuge (Mercedes-Benz E200 und Skoda Octavia Kombi) abgeschätzt.

TABELLE 3: AUFLISTUNG ALLER ANGENOMMENEN KOSTENARTEN- UND HÖHEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE FAHRZEUGTYPEN

	Basis der Fahrzeugmodelle <sup>a</sup>			
	ICE 1	ICE 2	BEV 1 (24 kWh)	BEV 2 (48 kWh)
Zinssatz	5 %			
Zeitpunkt Autowechsel	5 Jahre			
Zeitpunkt Batteriewechsel	---		3 – 5 Jahre	
Investitionskosten exkl. Batterie (€)	48.000	15.000	17.000	
Spez. Batteriekosten (€/kWh)	---		750	500
Batteriekosten gesamt (€)	---		18.000	24.000
Wiederverkaufswert (€)	10.000	2.000	5.000	
Einmalige Förderung (€)	---		5.000	
Versicherung (€/a)	2.000	1.500	1.000	
Wartung und Reparatur (€/a)	1.100	950	600	
Spezifischer Verbrauch (l/100km, kWh/100km)	10	7	20	
Sprit- bzw. Strompreis (€/l, €/kWh)	1,40		0,20	

<sup>a</sup> ICE1: Mercedes-Benz E200, ICE2: Skoda Octavia Kombi, BEV1: Nissan Leaf 24 kWh, BEV2: Nissan Leaf 48 kWh (fiktiv)

In Tabelle 3 sind alle verwendeten Kostenarten und -höhen der Fahrzeuge detailliert aufgelistet. Weiters wurden für die

Elektrotaxis entsprechend den Szenarien zwei unterschiedliche Batteriekapazitäten (24 und 48 kWh) angenommen. Für die Investitionen wurden ihre Annuitäten ermittelt und unter Berücksichtigung aller anderen Beträge die spezifischen Kosten pro Jahr berechnet.

Der Mercedes-Benz stellt mit rund 17.500 €/a das teurere und der Skoda Octavia mit ca. 9.400 €/a das günstigere der betrachteten, konventionellen Fahrzeugen 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 den Elektrotaxis eine Batteriekapazität von 24 kWh und eine Lebensdauer von 4 Jahren, dann ergeben sich jährliche Kosten von etwa 10.000 €. In Abbildung 8 sind zusätzlich die spezifischen Kosten für eine E-Taxi mit 48 kWh und Batteriekosten von 500 €/kWh dargestellt.

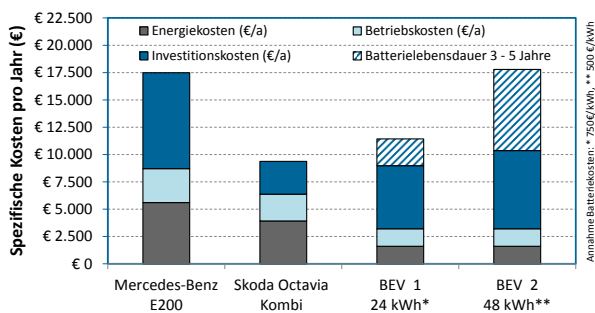


Abbildung 8: Spezifische Kosten pro Jahr für unterschiedliche Fahrzeugtypen (konventionell und elektrisch betrieben)

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

Basierend auf den anonymisierten Mobilitätsdaten einer Wiener Funktaxiflotte wurden im Projekt ZENEM fünf Ausbauszenarien der Ladeinfrastruktur definiert und daraus SOC-abhängige Ladeleistungsprofile für jeden Taxistandplatz mit Ladeinfrastruktur berechnet. Diese dienen gemeinsam mit den fünf gewählten NS-Netzabschnitten und den gemessenen Leistungsprofilen der bestehenden elektrischen Verbraucher als Grundlage für die anknüpfenden Netzsimulationen.

Die Erfüllbarkeitsanalyse zeigt deutlich, dass Normalladen (einphasig, 230 V, 16 A) in keiner Weise für die kurzen Standzeiten an den Taxistandplätzen der Taxiflotte ausreicht. Hingegen erscheint der Leistungsbereich zwischen 22 kW (AC) und 50 kW (DC) als sinnvoll. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen kann mit einer Batteriekapazität von 24 kWh und einer Schnellladeinfrastruktur an 20 Taxistandplätzen (50 kW) bzw. 26 TSP (22 kW je Ladepunkt) mehr als 25 % aller betrachteten Funktaxischichten erfüllt werden.

Aus den 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 das Auslangen findet.

Reine Elektrofahrzeuge leisten in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen einen deutlichen Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei ergibt sich ein Potential für die CO<sub>2</sub>-Reduktion von bis zu 80 %.

Die Abschätzung der jährlichen Kosten (Investition und Betrieb) ergibt unter den gewählten Vereinfachungen für die Ladeinfrastruktur in den Szenarien „SZ1“ und „SZ1A“ im Mittel ca. 294.000 €/a und für ein heutzutage erhältliches Elektrotaxi mit 24 kWh in etwa 10.000 €/a.

Für eine tatsächliche Umsetzung ist jedoch im Detail noch zu klären, wer die Kosten für die Ladeinfrastruktur trägt und wie eine sichere und funktionale Ladestation in der Realität aussehen muss. Eine Roadmap sowie die notwendigen Rahmenbedingungen sind zu klären und festzulegen.

## LITERATUR

- [1] Schuster, A., Litzlbauer, M., Reinthaler, M.: Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität – Überblick der Projektziele, 12. Symposium Energieinnovation, Graz, 2012.
- [2] Bernstein, L., et al.: International Panel on Climate Change – Climate Change 2007: Synthesis Report, p. 67, Valencia, 2007.
- [3] Anderl, M., et al.: Klimaschutzbericht 2010, Umweltbundesamt, Wien, 2010.
- [4] Schuster, A., et al.: Begleitforschung der TU Wien in VLOTTE – Endbericht. Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien, April 2010.
- [5] Schuster, A., Litzlbauer, M.: Begleitforschung der TU Wien in Electro-Drive Salzburg – Endbericht, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe (TU Wien), Jänner 2013.
- [6] Burnier de Castro, D., Rezanja, R., Litzlbauer, M.: V2G-Strategien – Auswirkung verschiedener Elektromobilitätsszenarien auf die Spannungsqualität von Niederspannungsnetzen unter Betrachtung der Phasenunsymmetrie, 12. Symposium Energieinnovation, Graz, 2012.
- [7] Litzlbauer, M., Schuster, A.: Erfüllbarkeitszenarien einer E-Taxiflotte – Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2013
- [8] Schuster, A., Litzlbauer, M., Gawlik, W.: Auswirkungen einer E-Taxiflotte auf das städtische Verteilnetz – Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM, 8. Int. Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2013.
- [9] Lanner, M.: Auswirkungen von Ladesteuerungen elektrischer Fahrzeuge in einem konkreten Verteilnetz, Diplomarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Wien, März 2012.
- [10] Leitinger, C.: Netzintegration von solarer elektrischer Mobilität – Auswirkungen auf das elektrische Energiesystem. Dissertation, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU Wien, Sept. 2011.
- [11] Wagner, H., Koch, M., et al.: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung – Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken, BWK Das Energie-Fachmagazin, Bd. 59 (2007) Nr. 10, Seite 44 – 52, 2007.
- [12] Stromkennzeichnungsbericht 2012, E-Control Austria, Wien, 2012.
- [13] Haas, R., Kloess, M., 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.
- [14] 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.
- [15] Klell M., et al.: Wirkungsgrade und CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Energieketten, Bericht, HyCentA, Graz, 2009
- [16] Anderl, M., et al.: Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990–2010, Umweltbundesamt, Wien, 2012.