

# Flottenversuch Elektromobilität Netzmanagementstrategien mittels elektrifizierter Fahrzeugflotten

## Electric mobility fleet test Grid management strategies with electric vehicle fleets

Thomas Pollok, Eva Szczechowicz, Claas Matrose, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler (Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen)

Georg Stöckl, Georg Kerber, Martin Lödl, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann (Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze, Technische Universität München)

Dr. Petra Behrens (E.ON Engineering)

### Kurzfassung

Eine zukünftig zunehmende Elektrifizierung des Personenkraftverkehrs eröffnet neue Möglichkeiten, um gemeinsame Märkte der elektrischen Energieversorgung und des Verkehrssektors zu etablieren. Elektrifizierte Fahrzeugflotten besitzen einen mobilen Speicher und können unter anderem deshalb eine interessante Ergänzung für die Energieversorgung sein. Gleichzeitig ist allerdings auf eine systemkonforme Integration zu achten, um mögliche technische Wechselwirkungen zu optimieren. In diesem Kontext werden im Rahmen des vom Bundesumweltministerium initiierten vierjährigen Pilotprojektes (FKZ 032 50 71 C) „Flottenversuch Elektromobilität“ die Ausgestaltungsoptionen einer zukünftigen Elektromobilität auf die Betriebsführung der Verteilungsnetze analysiert.

Die vorgestellten Untersuchungen zur Aufnahmefähigkeit elektrischer Verteilungsnetze weisen eine eindeutige Abhängigkeit der Netzkapazität von der Nutzercharakteristik sowie dem Netztyp auf, weshalb bereits während der Einführungsphase der Elektromobilität stellenweise Grenzwertverletzungen in elektrischen Verteilungsnetzen erwartet werden. Wenngleich diese im Umfang zunächst unwesentlich erscheinen, besteht dennoch die Notwendigkeit zur frühzeitigen Definition von Netzanschlusskriterien sowie der Entwicklung von Netzmanagementstrategien, um eine effiziente Nutzung vorhandener Kapazitäten zu erzielen. Daher werden im Rahmen des Beitrages neben den erwarteten Auswirkungen mögliche dezentrale Steuerungsstrategien auf Grundlage von Auktionsmechanismen zur Koordination von Ladevorgängen vorgestellt.

### Abstract

An increasing electrification of road traffic in future offers new possibilities for an integrated participation of electricity supply and the private transport sector. Batteries installed in electric vehicle fleets provide an interesting option for usage within the electricity sector. However, it is necessary to take into consideration grid conformity in order to optimize interdependencies. In this context, the four years project (FKZ 032 50 71 C) “Flottenversuch Elektromobilität” (field test e-Mobility), which was initiated by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety aims on analysing future impacts on distribution grid operation and consequently defining new rules of conformity. The illustrated results with respect to grid capacity for integration of vehicle fleets show a clear dependency on grid type as well as driver behaviour. Hence, even during the introduction phase of electric mobility grid constraints might be violated. Even though, the expected quantity appears rather small, it seems necessary to define criteria for grid connection at an early stage as well as to develop management strategies to efficiently utilise grid capacity and facilitate system operation. Hence, this paper aims at indicating expected quantity of grid impacts and to illustrate possible decentralised control mechanisms based on auctioning for coordination of charging processes.

## 1 Einleitung

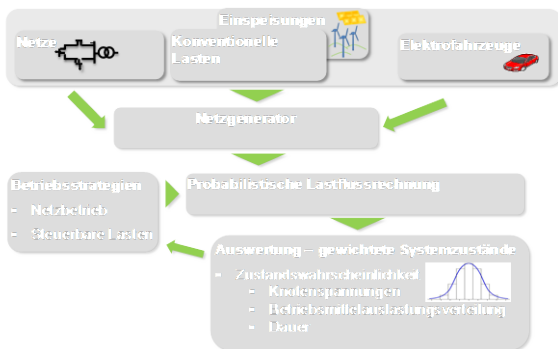
Die Nutzung der Elektromobile insbesondere zur Integration erneuerbarer Energien in das elektrische Netz setzt eine sorgfältige Analyse und Planung des Gesamtsystems voraus, um eine zukünftige Kommerzialisierung und Harmonisierung unterschiedlicher Technologiefelder gewährleisten zu können. Daher werden im Rahmen des vom Bundesumweltministerium initiierten Pilotprojektes (FKZ

032 50 71 C) Flottenversuch Elektromobilität Handlungsempfehlungen zukünftiger Systemführung von Verteilungsnetzen sowie eine Anpassung von Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge abgeleitet.

Der Beitrag beschreibt die Vorgehensweise zur Analyse der Aufnahmefähigkeit typischer Netzstrukturen. Ferner wird auf Grundlage eines Multi-Agenten-Ansatzes ein auktionenbasiertes Netzmanagement vorgeschlagen, welches eine Verlagerung der Ladezeitpunkte erzielt.

## 2 Modellansatz

Zur Untersuchung der vielfältigen mit einer Integration der Elektromobilität einhergehenden Folgen für den Betrieb eines Verteilungsnetzes wurde ein modulares Bewertungsmodell entwickelt. Dieses besteht aus insgesamt fünf Teilen; Eingangsdaten, Netzgenerator, Betriebsstrategien, probabilistische Lastflussrechnung und Auswertung. Das Gesamtverfahren bildet die Wechselwirkungen zwischen Energieversorgung und dem Verkehr ab und ist in Bild 1 graphisch dargestellt.



**Bild 1** Übersicht des Gesamtverfahrens

Die Eingangsdatenbasis für alle folgenden Teilmodule bilden Lastgänge sowie Netz- und Nutzerdaten. Die Lastgänge auf der Verteilnetzebene bestehen zum einen aus charakteristischen Lasten und Einspeisungen und zum anderen aus den typischen Fahrmustern der Elektrofahrzeuge, die auf der Modellierung des charakteristischen Fahrverhaltens konventioneller Fahrzeugnutzer aus der Studie [2] beruhen. Das Modell basiert auf der Erkenntnis des wahrscheinlichen Nutzerverhaltens und ist mithilfe probabilistischer Methoden umgesetzt. Hierbei können unter anderen einzelne Fahrzeugparameter angepasst werden. Maßgebend für netztechnische Konsequenzen ist die Batterieladecharakteristik, die dem typischen Li-Ion Ladeverfahren nachempfunden ist [3]. Konventionelle Lasten sowie regenerativ erzeugende Einspeiser werden ebenfalls mithilfe probabilistischer Methoden simuliert, wobei hierdurch das statistisch bekannte Verhalten widerspiegelt ist. Möglichst allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Implikationen können nur mithilfe einer repräsentativen Population realer Netze durchgeführt werden. Für diesen Zweck wurde ein Verfahren entwickelt, das auf Basis statistischer Kenngrößen typischer Netzcharakteristika [1], [6] eine Vielzahl synthetischer Niederspannungsnetze generiert, die für eine Bewertung statistisch den realen deutschen Niederspannungsnetzen gleichen.

Das dritte Modul stellt entwickelte Steuerungsstrategien für steuerbare Lasten sowie Elektrofahrzeuge anhand bevorzugter Bewertungskriterien dar. Zur Beurteilung des Einflusses von Steuerungsmechanismen wird hierbei unter anderen die Einschränkung des individuellen Nutzerverhaltens herangezogen. Ebenso sind Netzbetriebsstrategien berücksichtigt und können den erstgenannten technisch gegenübergestellt werden. Letzteres dient insbesondere der Bewertung der Wirkung potenzieller Netzbe-

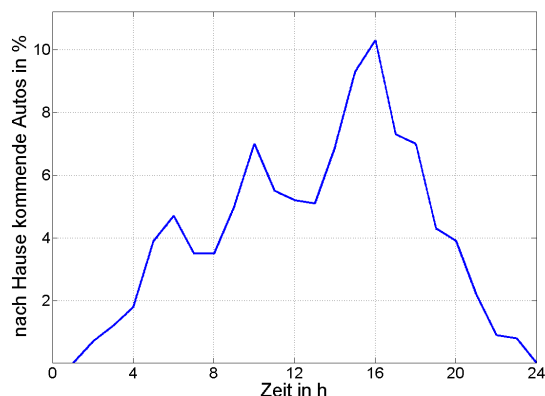
triebsmaßnahmen, die zukünftig aufgrund zunehmender Fluktuationen der Einspeisesituation erforderlich werden könnten (z. B. automatische Stufensteller in Ortsnetzstationen oder Blindleistungskompensation).

Das Auswertungsmodul ermöglicht die Simulation sowie Analyse zusammenhängender Netzgebiete mit einer Vielzahl von Knoten in vertretbarer Rechenzeit.

Allgemeingültige Schlussfolgerungen können nur auf Basis fundierter Untersuchungen der wesentlichen Kenngrößen des Nutzerverhaltens sowie der notwendigen Information über die Verteilungsnetze erfolgen. Im Folgenden werden daher exemplarisch Analyseergebnisse dargestellt, die auf charakteristischen netz- und verkehrstechnischen Parametern basieren.

### 2.1 Analyse des Fahrverhaltens und der daraus resultierenden Ladelast

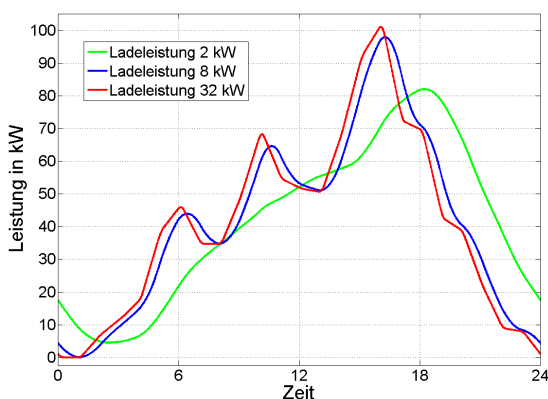
Zur Ermittlung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen ist eine umfassende Analyse des Verkehrsaufkommens notwendig. In [9] wird die Parkraumnachfrage in unterschiedlichen Gebietstypen analysiert. Hierfür wurde der Zeitpunkt der Zu- und Abfahrten aller Parkplatzebelegungen protokolliert und daraus resultierend deren zeitlicher Verlauf, dargestellt durch Parkraumkennlinien, ermittelt. In den folgenden Untersuchungen wird die für Wohngebiete gewonnene Parkraumkennlinie verwendet, da angenommen werden kann, dass in der Einführungsphase der Elektromobilität der Ladeprozess überwiegend am Wohnort stattfindet, weshalb das Aufladen am Arbeitsplatz oder an anderen Ladeeinrichtungen nicht betrachtet wird. In Bild 2 ist der zeitliche Verlauf der Parkplatzzufahrten in einem Wohngebiet dargestellt. Diesem Diagramm kann entnommen werden, dass die meisten Fahrzeuge zwischen 16 und 19 Uhr nach Hause kommen (rund ein Drittel aller Fahrzeuge). Im Vergleich dazu kehren in den Nachtstunden (zwischen 24 und 5 Uhr) lediglich 4 % zum Wohnort zurück.



**Bild 2** Zeitlicher Verlauf der zum Wohnort zurückkehrenden Fahrzeuge

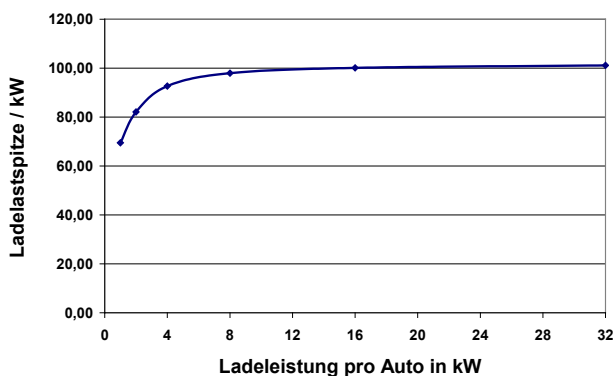
Die Ladelast am Ortsnetztransformator ist von der Ladeleistung der Elektrofahrzeuge abhängig und soll nun näher untersucht werden. Es wird hier davon ausgegangen, dass

die Fahrzeuge nach Ankunft sofort aufgeladen werden. Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt je nach Siedlungstyp zwischen 38 und 44 km [2]. Zur qualitativen Darstellung der resultierenden Ladeverläufe sind in Bild 3 exemplarisch die Ergebnisse für Ladeleistungen von 2 kW, 8 kW und 32 kW für ein typisches Dorfnetz an einem Tag illustriert. Die Ladeleistungen wurden bewusst gewählt, um den resultierenden Effekt verdeutlichen zu können. Es sei darüber hinaus erwähnt, dass diese weiterhin in Abhängigkeit der Siedlungsstruktur und damit der Anzahl der Fahrzeuge sowie dem Fahrzeugtyp variieren, die Tendenzen können jedoch qualitativ übernommen werden. Bei Anschlussleistungen größer 8 kW nähert sich der Ladelastverlauf dem Verlauf der Parkraumkennlinie, da der gewünschte Batterieladestand von ca. 100 % kurz nach Ankunft am Wohnort bereits erreicht ist. Kleinere Ladeleistungen (z. B. 2 kW) führen aufgrund der längeren Ladedauer zu einer Verstärkung der Ladelastkurve.



**Bild 3** Zeitlicher Verlauf der Ladelast bei unterschiedlichen Ladeleistungen in einem Dorfnetz

Mit zunehmender Ladeleistung sinkt die Ladedauer. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass weniger Fahrzeuge gleichzeitig laden und die Ladelastspitze, wie in Bild 4 dargestellt, daher nicht proportional mit der Ladeleistung zunimmt. Insbesondere führt eine weitere Erhöhung der Ladeleistung ab ca. 8 kW zu einer verhältnismäßig geringen Zunahme der Gesamtladelast, da die Anzahl der parallelen Ladeprozesse hierbei annähernd umgekehrt proportional zur Ladeleistung ist.



**Bild 4:** Maximale Ladelastspitze bei unterschiedlichen Ladeleistungen in einem Dorfnetz

Das Resultat stellt prinzipiell den Verlauf der Mediane dar, wobei die maximale Ladelastspitze, deren Auftretenswahrscheinlichkeit jedoch gering ist, mit zunehmender Ladeleistung steigt [10].

## 2.2 Auswertung netztypischer Kenngrößen

Um quantitative Aussagen über die Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf das Energieversorgungsnetz treffen zu können, ist es notwendig, netztypische Kenngrößen aus aussagekräftigen realen Netzen zu extrahieren. Die Untersuchungen aus diesem Kapitel stellen diese Erkenntnisse basierend auf einer statistischen Analyse von insgesamt 87 realen Niederspannungsnetzen aus verschiedenen Gebieten Bayerns dar [6], die schließlich als Eingangsbasis zur Generierung typischer und extremer Referenznetze dient. Die typischen Referenznetze spiegeln ca. 50 % der Netzkonfigurationen wider (z. B.: Transformatorleistung, Stranglänge, Anzahl an Verbrauchern pro Strang) und gelten somit für einen Großteil real existierender Netze. Die extremen Referenznetze stellen Netzbeanspruchungen mit hoch ausgelasteten Transformatoren oder Strängen und einer entsprechend größeren Lastdichte dar, abgebildet durch das 95 % Quantil der jeweiligen Verteilungsfunktion der Netzparameter.

Die typischen Referenznetze für die Siedlungstypen Land, Dorf und Vorstadt aus [6] sind hinsichtlich typischer Kennwerte in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1** Kennwerte der typischen Verteilnetze

	Land	Dorf	Vorstadt
Anzahl Wohnhäuser [6]	5	43	146
Anzahl Landwirtschaften [6]	8	14	0
Anzahl Hausanschlüsse [6]	13	57	146
Transformator-Bemessungsscheinleistung [6]	160 VA	400 kVA	630 kVA
Haushalt / Hausanschluss [7]	1,4	1,6	1,8

Verteilnetze unterscheiden sich erheblich in der durchschnittlichen Transformatorleistung je Hausanschluss. In einem Netz mit vielen Hausanschlüssen (z. B. Vorstadtnetz) sind der Spitzenlastanteil und deswegen auch die Transformatorleistung je Verbraucher infolge des höheren Gleichzeitigkeitsgrades geringer als in einem Netz mit wenigen Hausanschlüssen (z. B. Landnetz). Im Vorstadtnetz beträgt die spezifische Transformatorscheinleistung pro Hausanschluss im Durchschnitt nur ca. 4 kVA, während sie im Dorfnetz ca. 7 kVA und im Landnetz sogar ca. 12 kVA beträgt. Die in extrem ausgelegten Netzen (hoch beansprucht) ermittelten Kenngrößen zeigen eine wesentlich geringere Dimensionierung der Transformatorleistung pro Hausanschluss (Land 3,7 kVA, Dorf 2,1 kVA und Vorstadt 1,3 kVA). Nicht zuletzt sind strukturbedingte Unterschiede der jeweiligen Netztypen festzustellen, die neben der Transformatorleistung weitere Merkmale,

wie z. B. die Länge der Kabelstränge, kennzeichnen und daher unterschiedliche Konsequenzen durch Einführung der Elektromobilität erwarten lassen.

In der Folge sind daher die zusammenhängenden Auswirkungen des Verkehrs sowie der elektrischen Netze zu untersuchen.

### 3 Implikationen auf Verteilnetzgebiete

Die Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen dem Nutzerverhalten und der netztechnischen Konsequenzen erfolgt anhand einer detaillierten Analyse zusammenhängender Verteilnetzgebiete, die jeweils ein reales Mittelspannungsnetz sowie entsprechende unterlagerte Niederspannungsnetze beinhaltet. Im Rahmen des Projektes werden insgesamt 10 zur Verfügung gestellte Mittelspannungsnetze vorwiegend vorstädtischen und ländlichen Charakters analysiert und ausgewertet. Da für diese zur Verfügung gestellten Netzgebiete allerdings nicht alle untergelagerten Niederspannungsnetze vorliegen, werden auf Basis der vorliegenden statistischen Kenngrößen fehlende Niederspannungsnetze erstellt und den entsprechenden Knoten der Mittelspannungsnetze zugeordnet. Die Modellierung wird auf Grundlage der bekannten Spitzenleistung jeweiliger Ortsnetzstationen, dem Siedlungstyp sowie der Einwohnerzahl vorgenommen, die eine Berechnungsgrundlage für die probabilistischen Lasten am jeweiligen Niederspannungsknoten darstellen. Tabelle 2 fasst die wesentlichen Parameter zweier zur Analyse gegenübergestellten Netze zusammen. Beide Netztypen weisen charakteristische Merkmale einer vorstädtischen Region auf.

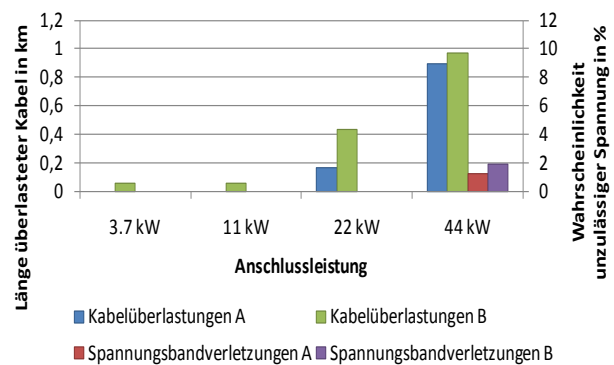
**Tabelle 2** Zusammenfassung untersuchter Netzgebiete

	Netz A	Netz B
<b>Anzahl NS Netze</b>	84	118
<b>Spitzenlast</b>	Haushalt und Gewerbe P <sub>max</sub> ~ 20 MW	Haushalte und Gewerbe P <sub>max</sub> ~ 15 MW
<b>Anzahl Haushalte</b>	17384	15705
<b>Dezentrale Einspeisung</b>	Keine	WEA, PV; P <sub>max</sub> 10,9 MW
<b>Gesamtlänge der Kabelstrecke</b>	MS: 42,94 km NS: 124,44 km	MS: 120,47 km NS: 221,54 km

Die Überprüfung sämtlicher für den kontinuierlichen Netzbetrieb notwendiger technischer Randbedingungen der untersuchten Netze erfolgt gemäß EN 50160 sowie DIN VDE 0276-1000.

Bild 5 illustriert die mittels des in Kapitel 2 vorgestellten Modells erzielten Implikationen auf die untersuchten Nieder- sowie Mittelspannungsnetze bei variabler Anschlussleistung der Elektrofahrzeuge mit einem gleich bleibenden

den Penetrationsniveau von 8 %. Letzteres spiegelt eine Prognose der Bundesregierung für das Jahr 2025 wider.



**Bild 5:** Gegenüberstellung von Grenzwertverletzungen

In der obigen Darstellung sind alle aufgetretenen Betriebsmittel- sowie betrieblichen Grenzwertüberschreitungen der beiden untersuchten Netzgebiete zu finden.

Da bei der vorgegebenen Penetrationsrate nur Verletzungen auf der Niederspannungsebene verzeichnet werden, ist Bild 5 auf diese beschränkt. Zunächst auffallend erscheint die Diskrepanz der eingetretenen Überschreitungen für die beiden Netze. Dieser Sachverhalt ist auf die in Kapitel 2.2 dargelegten unterschiedlichen Kenngrößen in jeweiligen Netztypen zurückzuführen und im Wesentlichen von der Philosophie des Netzbetreibers abhängig. Ferner werden die häufigen Verletzungen thermischer Grenzleistung von Kabeln gegenüber allen anderen Betriebsmitteln evident, wobei die jeweils betroffene Gesamtkabellänge angegeben ist. Die Dominanz der Grenzwertverletzungen an Kabeln rührt aus dem stochastischen Verhalten der Lasten, die vereinzelt durch Überlagerung der Betriebszeiträume, insbesondere während der Ladeprozesse elektrischer Fahrzeuge, zu überhöhten Beanspruchungen führen können. Anhand der vergleichsweise zur installierten Gesamtkabellänge sehr kurzen überlasteten Netzkapazitäten geschlossen werden. Ebenso werden Spannungsbandverletzungen erst bei für normale Hausanschlüsse sehr hohen Ladeleistungen von 44 kW sichtbar. Die gezielte Nutzung der Elektromobilität als Zwischenspeicher im Kontext erneuerbarer Energien kann infolge überregionaler Vorgaben – zur gezielten Steuerung der Ladeprozesse und einhergehender Synchronisierung mit der Einspeisung erneuerbaren Energien – ein mit der Verteilnetzlast unkorreliertes Verhalten hervorrufen und dadurch vermehrt Grenzwertverletzungen insbesondere in Verteilnetzen der Niederspannungsebene verursachen. Deshalb erscheint eine frühzeitige Entwicklung steuernder Maßnahmen bei gleichzeitiger Berücksichtigung lokaler netztechnischer Randbedingungen notwendig.

### 4 Steuerungsmechanismen

Zur effizienteren Nutzung vorhandener Netzkapazitäten sowie zur Einbindung lokaler Rahmenbedingungen erscheint eine gezielte Beeinflussung der Ladezeitpunkte sowie der Ladeleistung in Abhängigkeit netztechnischer

Gegebenheiten sinnvoll. Als Ansatz zur Steuerung wurde ein preisbasiertes Anreizsystem für Elektrofahrzeuge entwickelt, welches auf Basis eines Auktionsmechanismus frei verfügbare Netzkapazitäten an die jeweiligen Nutzer verteilt.

Im Folgenden wird auf Grundlage dieses dezentral organisierten Mechanismus ein Netzmanagement vorgestellt, das eine Einbindung technischer und lokaler Netzgegebenheiten erlaubt, gesteuert durch überregionale Steuervorgaben, wie z.B. EEX-Preise.

## 4.1 Dezentrale Steuerung mittels Multi-Agenten-Systemen

Multiagenten bezeichnen Systeme aus mehreren autark agierenden Einheiten (Agenten), die kooperativ oder im Wettbewerb unter Berücksichtigung individueller Eigenschaften ein bestimmtes Ziel verfolgen. Ein wechselseitiger Austausch einzelner Agenten erfolgt über Koordinationsmechanismen, die aufgrund der Autarkie eine Reduktion der Komplexität eines Systems bewirken können. Die dadurch erzielte Selbstorganisation teilnehmender Agenten erzielt eine dezentrale Systemarchitektur und begünstigt dadurch die Adaption an eine variable Systemgröße.

## 4.2 Netzmanagement mit Hilfe elektrifizierter Fahrzeuge

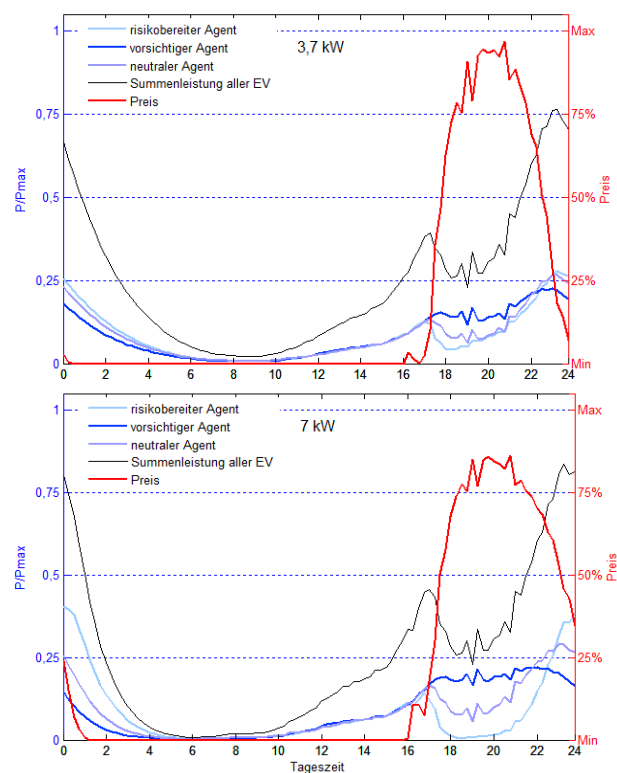
Zur Übertragung der Eigenschaften eines Multi-Agenten-Systems auf die Elektromobilität werden einzelnen Teilnehmern – in diesem Fall den Fahrzeugnutzern – gewisse Fähigkeiten sowie individuelle Charaktereigenschaften zugesprochen, die in Abhängigkeit der verbleibenden Netzressourcen unterschiedliche Reaktionen der Agenten hervorrufen. Unter Berücksichtigung individueller Entscheidungsmöglichkeiten resultiert auf Grundlage auktionengebundener Entscheidungen eine Koordination der Abläufe von Be- und Entladeprozessen.

Hierzu werden zur Verwaltung der vorliegenden Ressourcen - in diesem Fall die verbleibenden Netzkapazitäten - Agenten in jede Ortsnetzstation zur Ressourcenallokation an die teilnehmenden Agenten implementiert. Dieser beobachtende Agent vergleicht die in jedem Zeitschritt anfallende Anfrage mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten. Anschließend werden freie Leistungsfenster entsprechend den Angeboten allokiert, die gemäß dem Vickrey-Auktionsmechanismus entstehen [4]. Während des Auktionierens findet eine dynamische Preisentwicklung statt, die neben der verfügbaren Netzkapazität grundlegend durch den für die nächste Fahrt notwendigen Batteriefüllstand sowie durch die individuelle Bietercharakteristik der Agenten determiniert ist. Letzteres entstammt Untersuchungen zum realen Bieterverhalten und ist im Ansatz durch die Charakteristika eines eher besonnenen, eines risikoaffinen sowie eines neutralen Bieterverhaltens repräsentiert [5].

### 4.2.1 Allokation von Netzkapazitäten

Eine Allokation von Netzkapazitäten an die Netzteilnehmer wird mithilfe des Auktionsmechanismus sowie der

individuellen Eigenschaften der Bieteragenten und weiter auf den Prozess einflussnehmender Parameter (Ladeleistung, Wunschabfahrzeit, Fahrstrecke) erzielt. Nachstehend sind zunächst Auswertungen des resultierenden Gleichgewichtspreises – ausgehend von den Auktionen – aufgeführt. Weiterhin ist die variable Anschlussleistung als eine für das elektrische Netz wesentliche Einflussgröße in Bild 6 illustriert. Um einen direkten Vergleich einzelner Kenngrößen zu erhalten, veranschaulicht die erste Ordinatenachse den Verlauf des Ladeprozesses bezogen auf die maximal aufgetretene Leistung. Die zweite spiegelt den aus der Auktionierung resultierenden Gleichgewichtspreis wider und ist daher ein Indikator für die jeweilig verfügbaren Netzressourcen. Die schwarze Kennlinie resultiert aus der Summenlast der einzelnen Ladeprozesse jeweiliger Agententypen – ermittelt mithilfe der im Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden – sowie dem unterschiedlichen Bieterverhalten der Agenten. Zur Demonstration des Mechanismus wird als begrenzende Ressource zunächst nur die thermische Grenzlast der Ortsnetzstation gewählt. Ersichtlich wird, dass der resultierende zeitliche Verlauf der Gesamtleistung in Abhängigkeit der Anschlussleistung variiert.



**Bild 6:** Entwicklung des Gleichgewichtspreises in Abhängigkeit der Anschlussleistung

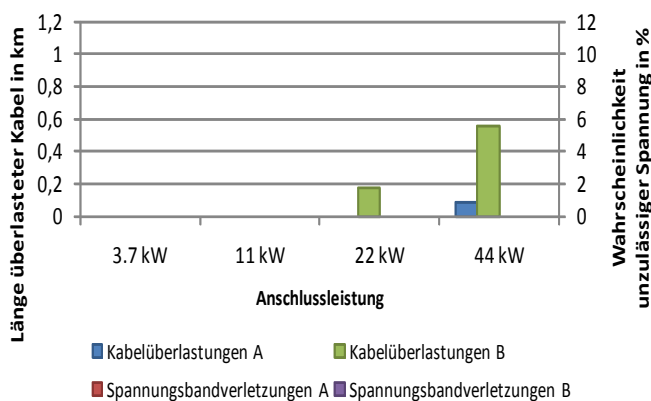
Weiterhin erkennbar ist das unterschiedliche Ladeverhalten der Agenten, wobei der besonnene Agent gegenüber einem risikoaffinen seinen Ladeprozess möglichst frühzeitig beginnt. Der Unterschied des Preisverlaufes für die dargestellten Anschlussleistungen rührt aus den vergleichsweise langen Ladeprozessen bei niedrigen Anschlussleistungen. Diese niedrigere Leistung führt zu einer sinkenden

Wahrscheinlichkeit der Erfüllung des Ladewunsches der jeweiligen Agenten. Die dadurch hervorgerufene Bereitschaft einen höheren Betrag für die verbleibenden Kapazitäten zu entrichten, erzielt einen insgesamt höheren Preis pro verfügbare Kapazität. Ein weiteres, wesentliches Charakteristikum des differenzierten Bieterverhaltens liegt in der zeitlichen Verschiebung der Ladezeitpunkte, die durch eine steigende Anschlussleistung eine länger andauernde Auktionierung hervorruft.

Aufgrund dessen wird neben der gleichzeitigen Senkung des Gleichgewichtspreises eine ebenmäßigere Gesamtlast und damit effizientere Ausnutzung der Kapazitäten erzielt. Infolge des geringeren resultierenden Gleichgewichtspreises erweist sich 7 kW Anschlussleistung als die vorteilhaftere aus Sicht des Kunden. Gleichzeitig resultieren hieraus implizit – bezogen auf die Auslastungsdauer – die geringeren technischen Implikationen, weshalb diese Anschlussleistung ebenfalls aus technischer Sicht als die bessere Lösung erscheint. Dies gilt allerdings nur im Kontext des umgesetzten Steuerungsmechanismus sowie für das gewählte Beispielnetz. Der präsentierte Ansatz wird im Folgenden auf das bereits in Kapitel 2 vorgestellte Netzgebiet übertragen, um schließlich vergleichende Resultate bezüglich technischer Restriktionen zu erzielen.

#### 4.2.2 Analyse technischer Restriktionen

Auf Grundlage des vorgestellten Ansatzes zur dezentralen Steuerung der Beladevorgänge elektrifizierter Fahrzeuge, werden die eingangs erzielten Ergebnisse der ungesteuerten Ladeprozesse mit dem hier vorgestellten Ansatz verglichen. Bild 7 illustriert die Reduktion der Grenzwertverletzungen mithilfe der Multi-Agenten-Systeme. Um vergleichbare Aussagen erzielen zu können, wurden dieselben Anschlussleistungen wie in Kapitel 3 gewählt.



**Bild 7:** Gegenüberstellung von Grenzwertverletzungen auf Basis von Auktionsmechanismen

Deutlich erkennbar ist die insgesamt erzielte Reduktion gegenüber den im vorherigen Kapitel diskutierten Überschreitungen, illustriert in Bild 5, die im Wesentlichen die thermischen Überlastungen auch bei Anschlussleistungen von 11 kW ebenso wie Spannungsbandverletzungen vollständig verhindern können. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die aufgrund des Ansatzes erzielten

ebenmäßigeren Lastverläufe eine Verringerung technischer Beschränkungen erzielen, diese bei einer hohen Synchronlast allerdings nicht vollständig verhindern. Daher besteht in diesem Zusammenhang darüber hinaus die Notwendigkeit einer gezielten aktiven Beeinflussung der Lade- bzw. Entladevorgänge insbesondere bei steigenden Penetrationsraten, die ab 2025 erwartet werden.

## 5 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Aufgrund der sehr unterschiedlich dimensionierten Verteilungsnetze genügen keine Einzelfalluntersuchungen für allgemeingültige Schlussfolgerungen. Vielmehr müssen entweder Referenznetze, die durch statistische Analysen an realen Netzen generiert wurden, oder eine hohe Anzahl unterschiedlicher Netze untersucht werden. Die Vielfalt der Netztypen und damit verbundener Netzkapazitäten kann ferner bereits während der Einführungsphase vereinzelt Grenzwertverletzungen auf Niederspannungsebene infolge der Elektromobilität hervorrufen. Im Allgemeinen kann jedoch von ausreichenden Netzkapazitäten ausgegangen werden.

Um die mit Elektromobilität verbundenen netztechnischen Auswirkungen zukünftig abmildern und gezielt das Potenzial als Zwischenspeicher nutzen zu können, sind Netzanschlussbedingungen sowie Steuerungsmechanismen zu definieren. Diese sollten aufgrund langwieriger Umsetzungsprozesse möglichst frühzeitig aufgezeigt werden. Anschlussbedingungen zielen auf eine adäquate Ladeleistung, um möglichst individuelle Nutzercharakteristika sowie resultierende Ausbaumaßnahmen zu optimieren. Ferner können Optionen zur gezielten Netzstabilisierung in Fehlerfällen mit einfachen Maßnahmen in Elektrofahrzeugen realisiert werden [10]. Zusätzliche Steuerungsmechanismen erscheinen sinnvoll, zum einen bei hohen Penetrationsraten im Hinblick auf eine Anpassung von Ladevorgängen und damit zur Reduktion von Ausbaumaßnahmen sowie zur Umsetzung einer koordinierten Synchronisierung der Ladeprozesse mit der Einspeisung erneuerbarer Energien oder weiterer exogener Steuerungsvorgaben, z. B. der EEX. Ein Ansatz zur dezentral organisierten Steuerung wurde basierend auf Multi-Agenten-Systemen im Zusammenhang mit einem Auktionsmechanismus implementiert. Mithilfe dessen ist eine vollständige dezentrale Umsetzung von Ladeentscheidungen möglich. Die erzielten Erkenntnisse lassen insgesamt den Schluss zu, dass eine auktionenbasierte Steuerung die Verlagerung der Ladezeitpunkte unter Berücksichtigung lokaler technischer Randbedingungen bewirkt und damit eine effiziente Ausnutzung vorliegender Kapazitäten begünstigt. Gleichzeitig wird damit eine höhere Penetrationsrate von Elektrofahrzeugen ohne Grenzwertverletzung in Verteilungsnetzen möglich. In diesem Kontext sind die wirtschaftlichen Konsequenzen für Betreiber sowie Nutzer der aufgezeigten Maßnahmen noch zu untersuchen.

## 6 Literatur

- [1] Scheffler, Jörg: Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energie-wandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten. Dissertation an der TU Chemnitz, 2002
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Mobilität in Deutschland 2002. Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten, Berlin 2003
- [3] Schuster, A. : Eigenschaften heutiger Batterie- und Wasserstoffspeichersystemen für eine nachhaltige elektrische Mobilität. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2009
- [4] Vidal, J. M.: Fundamental of Multiagent Systems with NetLogo examples, 2009
- [5] Using Intelligent Agents to Implement an Electronic Auction for Buying and Selling Electric Power. Reticular Systems, Inc., 1999
- [6] Kerber, Georg; Witzmann, Rolf: Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen; ew, Jg. 107 (2008), Heft 6, S. 22 - 26
- [7] Lödl, Martin; Witzmann, Rolf: Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland, 11. Symposium Energieinnovation, 10.-12.2.2010, Graz/Austria
- [8] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Elektrostraßenfahrzeuge – Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen, 2007
- [9] Bundesanstalt für Straßenwesen: Kennlinien der Parkraumnachfrage, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2000
- [10] Pollok, Thomas; Hille Christian; Schnettler Armin: Netzeinbindung von Elektrofahrzeugen – Möglichkeiten flexibler Ladekonzepte, ETG Kongress, 27.-28. 10.2009, Düsseldorf