

Energie- und Mobilitätssysteme der Zukunft

Dietmar Göhlich
Andreas F. Raab *Hrsg.*

Mobility2Grid – Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende

Energie- und Mobilitätssysteme der Zukunft

Reihe herausgegeben von

Mobility2Grid e.V., Berlin, Deutschland

Der Forschungscampus Mobility2Grid verbindet die Nutzung regenerativer Energien mit der Zukunft der urbanen Mobilität. Die Elektrifizierung des Verkehrs ist eine einzigartige Chance, Energie- und Verkehrssysteme gemeinsam zu erforschen und Synergien zu nutzen. Das Ziel ist, mit Hilfe neuer technischer Optionen und unter Beteiligung der Zivilgesellschaft die Versorgung mit Strom, Wärme und Verkehr bezahlbar, sicher und vollständig auf Basis der Erneuerbaren Energien zu realisieren. Der Berliner EUREF-Campus dient dabei als Erprobungs- und Referenzquartier, um die Eckwerte einer dezentralen Versorgungswirtschaft für eine nachhaltige Stadtentwicklung zu beschreiben. In sechs Themenfeldern werden sowohl neue Technologiefelder und innovative Geschäftsmodelle eröffnet als auch Akzeptanzforschung und Nachwuchsförderung betrieben. Ein Querschnittsfeld widmet sich dem Betrieb sowie der Verwertung der Ergebnisse in einer gemeinsam getragenen Unternehmung. In dieser Buchreihe wird sowohl die Erforschung und Entwicklung neuer Technologie-Optionen als auch die Analyse und Bewertung sozialer Akzeptanz und politischer Rahmenbedingungen sowie die ökonomische Verwertbarkeit der gewonnenen Forschungsergebnisse behandelt.

Weitere Bände in der Reihe: <http://www.springer.com/series/16321>

Dietmar Göhlich • Andreas F. Raab
Hrsg.

Mobility2Grid – Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende

Hrsg.

Dietmar Göhlich
Methoden der Produktentwicklung und
Mechatronik
Technische Universität Berlin
Berlin, Deutschland

Andreas F. Raab
Cross Industries Digi Utility
adesso SE
Berlin, Deutschland

ISSN 2662-1622

ISSN 2662-1630 (electronic)

Energie- und Mobilitätssysteme der Zukunft

ISBN 978-3-662-62628-3

ISBN 978-3-662-62629-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62629-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Gruen

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort

Energie- und Verkehrswende zusammendenken: Um nichts weniger geht es bei dem Forschungscampus Mobility2Grid. Nachhaltige Energie- und Mobilitätskonzepte wurden und werden aber nicht nur auf dem historisch geprägten Gelände des Schöneberger Gasometers mitten in Berlin, dem EUREF-Campus, erdacht, sondern erprobt und erforscht, also mit Leben erfüllt. So entstand auf dem Campus ein Reallabor für soziale und technische Lösungsstrategien für große gesellschaftliche Herausforderungen.

Das Motto des BMBF-Förderprogramms „Forschungscampus“ ist die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft an einem Ort. Diese konnte auf dem EUREF-Campus ausprobiert und darüber hinaus konnten weitere Akteure aus Stadtverwaltungen, der Zivilgesellschaft sowie Bürgerinnen und Bürger aus der Nachbarschaft aktiv einbezogen werden, denn ohne Partizipation und Mitgestaltung durch potenzielle spätere Nutzer bspw. an Mobilitätsangeboten wie E-Carsharing, automatischen Shuttles und dem E-Bus, ist eine gesellschaftliche Akzeptanz einer Mobilitätswende schwerlich erreichbar.

Entscheidend hierfür ist, aber auch für das ganze Gelingen dieses Forschungscampus, dass konkret am Objekt geforscht, entwickelt wurde und die Ergebnisse visualisiert werden. So können durch den Micro Smart Grid Energieströme, basierend auf auf dem Campus erzeugter regenerativer Energie, nachverfolgt und erforscht werden. Zwischen der Technischen Universität Berlin, außeruniversitären Forschungseinrichtungen, auf dem Campus ansässigen Unternehmen und Startups entwickelte sich eine produktive und intensive Zusammenarbeit, gleichermaßen wichtig für die Forschung und für Unternehmen im Energie- und Mobilitätssektor.

Für die Zukunft stellt sich die spannende Frage, wie die Ergebnisse von Mobility2Grid vom EUREF-Campus auf andere städtische Areale übertragen werden können, die andere Bedingungen bieten: so beispielsweise als Arbeits- und Wohnort. Die bislang erzielten wissenschaftlichen Erträge können Sie in diesem Band nachlesen. Sie sind gleichermaßen spannend für die Wissenschaftsbereiche Technik-, Natur- und Sozialwissenschaften, für interdisziplinäre Zugänge, für Unternehmen aus der Energie- und Mobilitätswirtschaft und darüber hinaus für alle an Innovationen Interessierte.

Ich wünsche dem Forschungscampus Mobility2Grid bei seinen zukünftigen Aufgaben ein gutes Gelingen und Ihnen, den Leserinnen und Lesern, eine spannende Lektüre.

Berlin
Juli 2020

Dagmar Simon
Beiratsvorsitzende des Forschungscampus Mobility2Grid

Vorwort

Die Umstellung einer polyzentralen Energieversorgung basierend auf fossilen Energieträgern hin zu einem integrierten Energiesystem unter Einbindung regenerativer Energiequellen ist in vollem Gange. Dies geht einher mit starken dezentralen Tendenzen und der Nutzbarmachung intelligenter Speicher- und Verbrauchersysteme über die Sektorengrenzen hinweg. In Verbindung mit der Elektrifizierung des Verkehrs bietet sich hier die einzigartige Chance, Energie- und Verkehrssysteme gemeinsam zu denken und gezielt Synergien an deren Schnittstellen auszugestalten. Ziel muss es sein, den Energiebedarf des Verkehrs sowohl bei privaten als auch bei gewerblichen Fahrzeugen mit sauberen, klimaneutralen Antriebstechniken zu decken und diese effizient zum Einsatz zu bringen.

Die damit einhergehenden Transformationsprozesse sind einerseits gekennzeichnet durch eine Liberalisierung der Energiemärkte und eine Umstrukturierung des bestehenden Energieversorgungssystems. Andererseits erleben wir einen fundamentalen Wandel unserer Verkehrssysteme und unseres Mobilitätsverhaltens. Verkehr und Mobilität werden hierbei nicht nur auf nachhaltige Energieträger umgestellt, derzeit entstehen auch völlig neue Mobilitätsoptionen und eine tiefgreifende Vernetzung verschiedener Formen des Individualverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs. Dabei ist es entscheidend, den Wandel im Energie- und Verkehrssektor auch mit entsprechenden digitalen Lösungsansätzen zu gestalten und den Fortschritt in der Informations- und Kommunikationstechnologie in die Lösungen einfließen zu lassen. In diesem Zusammenhang gehören die Themen Technik, Regulierung und Marktprozesse eng zusammen, um so realisierbare ökonomische, ökologische und volkswirtschaftliche Mehrwerte zu generieren.

Die Potenziale einer solchen integrierten Energie- und Verkehrswende sind mannigfaltig. Jedoch gilt es bei deren Umsetzung und Anwendung noch erhebliche fundamentale Transferleistungen zu erbringen und offene Fragestellungen zu beantworten: Wie müssen sich Geschäftsmodelle anpassen, um den Veränderungen der Märkte Rechnung zu tragen? Wie gestaltet sich die Nutzung der Netzkapazitäten und wie kann eine netzdienliche Steuerbarkeit von elektrifizierten Fahrzeugflotten realisiert werden? Wie werden wir in einer vernetzten Welt Datenschutz und Datensicherheit gewährleisten? Wie können die Interessen „selbstbestimmter“ Bürgerinnen und Bürger berücksichtigt werden?

Damit eine solche Transformation der Energie- und Verkehrssysteme tatsächlich einen nachhaltigen Beitrag leistet, sind fundierte theoretische Analysen sowie umfangreiche Untersuchungen in Reallaboren notwendig. Schließlich geht es darum, die Klimaschutzziele zu erreichen und die Treibhausgas-Emissionen in den einzelnen Sektoren bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 Prozent zu reduzieren.

Und genau hier setzt der Forschungscampus Mobility2Grid in Berlin an. Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung arbeiten Unternehmen, Hochschul- und Forschungseinrichtungen interdisziplinär und partnerschaftlich zusammen, um die Nutzung regenerativer Energien mit der Zukunft der urbanen Mobilität zu verbinden. Ein Kernaspekt ist dabei die Integration von gewerblichen und privaten elektrischen Fahrzeugen in dezentrale Energienetze.

Der Forschungscampus Mobility2Grid ist räumlich auf dem EUREF-Campus in Berlin-Schöneberg angesiedelt. Hier arbeiten, forschen und lernen schon heute über 3 500 Menschen in mehr als 150 Unternehmen, Institutionen und Startups rund um die Themenfelder Energie, Mobilität und Nachhaltigkeit – kooperativ, offen und gemeinsam. Seit Projektbeginn 2008 hat sich das ca. 5,5 Hektar große Stadtquartier zu einem europaweit einzigartigen Reallabor der Energiewende entwickelt. Der Forschungscampus Mobility2Grid erarbeitet an diesem einmaligen Standort neue Lösungen für das synergetische Zusammenwirken von Elektromobilität, Strom- und Wärmeversorgungsnetzen in einem realen Referenzquartier. Damit leisten wir nicht nur einen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende, sondern schaffen auch Rahmenbedingungen für einen nachhaltigen Betrieb von Elektrofahrzeugen.

Fokussiert auf den urbanen Raum werden in sechs Themenfeldern sowohl neue Technologiefelder und innovative Geschäftsmodelle eröffnet als auch Akzeptanzforschung und Nachwuchsförderung betrieben. Ein Querschnittsfeld widmet sich dem Betrieb sowie der Verwertung der Ergebnisse in einer gemeinsam getragenen Unternehmung. Die Arbeiten in den Themenfeldern werden von insgesamt 38 Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft getragen, von denen über 20 auf dem EUREF-Campus ansässig sind.

Das vorliegende Buch greift die eingangs genannten Fragestellungen auf und erörtert in insgesamt neun Kapiteln, wie Energie und Verkehr in der Theorie zusammengedacht und in der Praxis zusammengebracht werden können. Dabei fließen die umfangreichen Erkenntnisse ein, die in der langjährigen interdisziplinären Forschungsarbeit gewonnen wurden.

Startpunkt unserer Überlegungen – und damit auch am Beginn dieses Buches stehend – ist die Elektromobilität als Flexibilitätsbaustein in den intelligenten Stromnetzen der Zukunft. Dabei werden die Herausforderungen und Umsetzungschancen dezentraler Netzstrukturen analysiert und bezüglich ihrer energiewirtschaftlichen Praxistauglichkeit bewertet.

In den folgenden Kapiteln betrachten wir sowohl den elektrischen Individualverkehr mit privaten Fahrzeugen und Carsharing-Flotten als auch die Elektrifizierung des urbanen Bus- und Entsorgungsverkehrs. Weitere Kapitel widmen sich den Gestaltungsmöglichkeiten

einer innerstädtischen Logistik und thematisieren die von uns geschaffenen Best-Practice-Ansätze im Reallabor auf dem EUREF-Campus.

Wir widmen uns dem Thema, wie durch eine umfangreiche Datenvernetzung und -aufbereitung Synergien zwischen Mobilitäts- und Energiesystemen geschaffen werden. Im Vordergrund steht der Beitrag der Digitalisierung, Daten effektiv und vor allem sektorenübergreifend zu verknüpfen und nutzbar zu machen. Wir diskutieren darüber hinaus, wie sich ganzheitliche Betriebsstrategien entwickeln lassen, welche die komplexen Wechselwirkungen der Erzeugungs-, Speicher- und Verbrauchskomponenten und deren Interoperabilität berücksichtigen. In diesem Zusammenhang diskutieren wir auch konkrete Transfermöglichkeiten auf andere Quartiere und Areale.

Auf dem weiteren Weg unserer Überlegungen sehen wir neben der technischen Gestaltung der Energie- und Verkehrswende auch soziale Brennpunkte. Zentrale Parameter sozialer Praktiken des Alltagslebens und der Alltagsroutinen der Bürgerinnen und Bürger stehen auf dem Prüfstand. Wir behandeln, wie die notwendige Innovationsdiffusion und Marktdurchdringung durch die Einbindung und Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern erfolgreich sein kann.

Die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften und der Wissenstransfer in die Gesamtgesellschaft sind wesentliche Voraussetzungen für die umfassende Realisierung der Energie- und Verkehrswende. Hierzu analysieren und diskutieren wir, welche akademischen und gewerblichen Aus- und Weiterbildungsformate, die den komplexen interdisziplinären Anforderungen und den Erfordernissen der wirtschaftlichen Praxis gerecht werden, gebraucht werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten finden auch direkten Eingang in den MBA-Studiengang *Sustainable Mobility Management*, den die TU Berlin auf dem EUREF-Campus als einen von derzeit vier englischsprachigen weiterbildenden Masterstudiengängen anbietet. Neben diesen Aus- und Weiterbildungen wird der Wissenstransfer in die Gesamtgesellschaft als ein weiterer Beitrag des Forschungscampus Mobility2Grid in verschiedensten Formaten aktiv gestaltet.

Abschließend werden in diesem Buch die zukünftigen Herausforderungen und offenen Fragestellungen diskutiert, die in der bisherigen Arbeit am Forschungscampus Mobility2Grid noch nicht beantwortet werden konnten. Wir skizzieren dazu konkrete Forschungskerns, die wir zukünftig adressieren wollen.

Dieses Buch gibt damit einen breiten Überblick über die relevanten Fragestellungen im Umfeld einer integrierten Energie- und Verkehrswende am Praxisbeispiel eines Reallabors auf dem EUREF-Campus. Es richtet sich an qualifizierte Fachkräfte in Unternehmen, Hochschul- und Forschungseinrichtungen, Beratungsunternehmen für Politik, Wirtschaft, Technik, Flotten- und Netzbetreiber, Stadtwerke und einschlägige Verbände. Entstanden aus dem Forschungsumfeld der Wirtschafts- und Wissenschaftseinrichtungen werden aber auch Studierende angesprochen – künftige Gestalter und Entscheidungsträger – die sich für eine Karriere im Umfeld der Energie- und Verkehrssektoren qualifizieren wollen.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit verwenden wir in diesem Buch überwiegend das generische Maskulinum. Dies impliziert immer beide Formen, schließt also die weibliche Form mit ein.

Die Entstehung dieses Buches geht auf eine Initiative von Thomas Lehnert zurück, damaliger Executive Editor Mechanical Engineering beim Springer-Verlag. Dafür gebührt ihm ein ganz herzlicher Dank. Die Herausgeber danken allen am Werk Beteiligten, besonders den Autoren für ihr Engagement bei der Abfassung ihrer Beiträge. Wir danken Herrn Dr. Alexander Grün und Ulrike Butz vom Springer-Verlag für die verlagsseitige Bearbeitung. Darüber hinaus danken wir der EUREF AG für die Unterstützung und die Beheimatung auf dem EUREF-Campus, ohne diesen einmaligen Standort wäre der Forschungscampus Mobility2Grid nicht möglich gewesen. Den Mitgliedern unseres wissenschaftlichen Beirats gebührt unser Dank für die langjährige Unterstützung sowie für die immer wieder entscheidenden Hinweise und Impulse bei schwierigen Fragestellungen. Besonderer Dank geht auch an das Bundesministerium für Bildung und Forschung für das Vertrauen in unsere Forschungs- und Umsetzungskompetenz und für die langjährige, umfangreiche Förderung unserer Verbundprojekte.

Berlin
Juli 2020

Dietmar Göhlich
Andreas F. Raab

Inhaltsverzeichnis

1 E-Mobilität als Flexibilitätsbaustein in Smart Grids	1
Andreas F. Raab, Jan F. Heinekamp, Gerhard Bressler, Alexander Kupfer, Stefan Niemand, Erik Landeck und Kai Strunz	
1.1 Einleitung	2
1.2 Regulatorische Rahmenbedingungen, Netzplanung und -integration	3
1.2.1 Anschluss von Ladeinfrastruktur unter Einhaltung technischer Vorgaben	5
1.2.2 Netzanschlussmöglichkeiten von E-Fahrzeugen	6
1.2.3 Netznutzungskonzepte als Anreize für verbesserte Integration von Ladeinfrastruktur	7
1.2.4 Variationen von Messstellenkonzepten zur Integration von E-Fahrzeugen	9
1.2.5 Sonderformen der Netznutzung und Strombeschaffung	12
1.3 Systemdienstleistungen und Vermarktung	15
1.3.1 Flexibilitäten bei ungesteuertem und gesteuertem Laden/Entladen	18
1.3.2 Interkonnektive und interoperable Gestaltung von Schnittstellen	20
1.3.3 Realisierungsmöglichkeit passiver und aktiver Lademanagementsysteme	24
1.4 Integration von E-Mobilität in Virtuelle Kraftwerke	27
1.4.1 Modellarchitektur und Marktinteraktionen	29
1.4.2 Optimierungsmodell und mathematische Formulierungen	31
1.4.3 Simulationen und Fallstudien	35
1.5 Konklusion und Ausblick	38
Literatur	39
2 E-Mobilität im Carsharing und in Fuhrparks	43
Gerhard Stryi-Hipp, Matti Sprengeler, Philipp Nguyen, Raisa Popova und Gunnar Landfester	

2.1	Rolle von Fuhrparks und Fahrzeugflotten für die Einführung der E-Mobilität.	44
2.2	Integrierbarkeit von E-Fahrzeugen in Fuhrparks.	46
2.2.1	Fahrbedarfe und Reichweiten	47
2.2.2	Anforderungen an die Ladeinfrastruktur.	49
2.2.3	Geschäftsmodelle für den Betrieb von Ladeinfrastruktur	54
2.2.4	Wirtschaftlichkeit von E-Fahrzeugen in Fahrzeugflotten	57
2.3	Integration von E-Fahrzeugen in Carsharing-Flotten	60
2.3.1	Entwicklung des Carsharings.	60
2.3.2	Fahrbedarfe und Reichweiten im Carsharing	62
2.3.3	Anforderungen an die Ladeinfrastruktur im Carsharing	64
2.3.4	Wirtschaftlichkeit von E-Fahrzeugen in Carsharing-Flotten	66
2.4	Ausbaustrategien für die Ladeinfrastruktur für Fuhrparks und Carsharing	67
2.4.1	E-Fahrzeug-Ladeinfrastrukturplanung für Fuhrparks	68
2.4.2	E-Fahrzeug-Ladeinfrastruktur für Carsharing	72
	Literatur.	73
3	Intelligentes Mobilitätsmanagement an einem Zukunftsort.	77
	Korinna Stephan, Nicole Böttcher, Bernhild Meyer-Kahlen, Johannes Tücks und Thomas Richter	
3.1	Ansätze der Quartiersentwicklung am Beispiel des EUREF-Campus	78
3.1.1	Motivation	78
3.1.2	EUREF-Campus ein Stadtquartier der Zukunft.	79
3.1.3	Herausforderungen und verkehrliche Erschließung.	80
3.2	Eingesetzte Methoden zur Entwicklung und Evaluierung neuer Mobilitätskonzepte.	82
3.2.1	Ansätze aus der Verkehrsplanung	83
3.2.2	Verkehrserhebungen und -befragungen	86
3.3	Geplante und umgesetzte Maßnahmen auf dem EUREF-Campus	88
3.3.1	Organisation des Verkehrs auf dem Campus	89
3.3.2	Organisation des ruhenden Verkehrs auf dem Campus	90
3.3.3	Ausbau der Ladeinfrastruktur	90
3.3.4	Zuwege für den Fußverkehr.	92
3.3.5	Mieter(selbst)selektion.	92
3.3.6	Community Management.	93
3.3.7	Logistikkonzept	95
3.3.8	Mobilitätsdienstleistungen als Alternativen zum eigenen Auto.	96
3.3.9	Zusammenfassung	97
3.4	Auswirkungen neuer Mobilitätskonzepte auf das Mobilitätsverhalten und die Raumstruktur.	97
3.4.1	Verkehrsaufkommen	99

3.4.2	Entwicklung des Kfz-Verkehrs	101
3.4.3	Mobilitätsverhalten	102
3.4.4	Aufenthaltsqualität	105
3.4.5	Parkraum und Integration von Ladeinfrastruktur	105
3.4.6	Lieferverkehr	106
3.5	Diskussion, Konklusion und Ausblick	107
3.5.1	Wirksamkeit der Maßnahmen	107
3.5.2	Weiterentwicklung von Ansätzen	108
	Literatur	109
4	Elektrifizierung des urbanen Bus- und Entsorgungsverkehrs: Potenziale, Herausforderungen und Umsetzung	113
	Dietmar Göhlich, Enrico Lauth, Pavel Boev, Florian A. Jaeger, Andreas Laske, Markus Vogelsang, Daniel Hesse, Jing Hui Denny Chen, Michael Tost und Andreas F. Raab	
4.1	Einleitung	114
4.2	Potenziale	116
4.2.1	CO ₂ Reduktionspotenzial inkl. Strom aus erneuerbaren Energien	116
4.2.2	Luftschadstoffe in Städten	117
4.2.3	Lärminderungspotenzial	118
4.3	Elektrifizierungskonzepte für innerstädtische Nutzfahrzeuge	120
4.3.1	Systemkonzepte	121
4.3.2	Betriebsstrategien	122
4.3.3	Ladeinfrastruktur	123
4.3.4	Systemauswahl	125
4.4	Konzepte für elektrifizierte Betriebshöfe	126
4.4.1	Betriebsabläufe	126
4.4.2	Flächennutzung und Layout	129
4.4.3	Lademanagement und Netzintegration	131
4.5	Innovative Ladeinfrastruktur im Reallabor	133
4.5.1	Netzeinbindung E-Bus-Ladestation	133
4.5.2	Steuerung von Ladevorgängen	135
4.6	Umsetzungsstrategien	136
4.6.1	Entsorgungsverkehr	136
4.6.2	Busverkehr	137
4.7	Fazit und Ausblick	139
	Literatur	140
5	Digitale Vernetzung in der E-Mobilität	145
	Olga Levina, Helga Jonuschat, Jan Sürmeli, Saskia Mattern, Sven Willrich, Kilian Kärigel und Stefan Heine	
5.1	Einleitung und Motivation	146

5.2	Digitalisierung als Antwort auf logistische Anforderungen des urbanen E-Lieferverkehrs	147
5.2.1	Algorithmen der Lieferplanerstellung	147
5.2.2	Illustration an einem Anwendungsfall	148
5.3	Welche Daten und Dienste brauchen automatisierte Shuttles?	149
5.3.1	Digitale Dienste rund um den Betrieb fahrerloser Shuttles	149
5.3.2	Shuttle2X: Technologien für „shuttle-gerechte“ Straßenräume.	150
5.3.3	Shuttle2Grid: Ladekonzepte für fahrerlose Shuttles	151
5.3.4	Shuttle2Hub: Buchung von Shuttles „on demand“	152
5.3.5	Verarbeitung der Fahrzeug-, Infrastruktur- und personenbezogenen Daten über Edge Computing	153
5.4	Digitalisierung und Flottenmanagement von E-Fahrzeugen	154
5.4.1	Flottenmanagementsystem.	155
5.4.2	Betriebliches Mobilitätsmanagement im Förderprojekt Mobility2Grid	156
5.5	Digitale Plattformen – digitale Ökosysteme für E-Mobilität.	158
5.5.1	System der E-Mobilität	159
5.5.2	Aufbau und Governance einer digitalen Plattform	160
5.5.3	Die Mobility2Grid-Plattform.	161
5.5.4	Die Rolle von digitalen Plattformen für die integrierte Energie- und Verkehrswende	162
5.6	Organisation der Dynamik des Systems Elektromobilität durch Distributed-Ledger-Technologien	163
5.6.1	Der „digitale Zwilling“ einer Plattform.	165
5.6.2	Distributed-Ledger-Technologien zur Verwaltung von Transaktionen auf Plattformen.	166
5.6.3	Potenzial für die Realisierbarkeit des DLT-Ansatzes im System der Elektromobilität	168
5.6.4	Ausblick: Intermediäre erkennen und abbauen	169
5.7	Vernetzung und Recht: Ladestruktur der Elektromobilität und die ungeklärte Frage des Dateneigentums	169
5.7.1	Beziehungen innerhalb des Ladeprozesses	170
5.7.2	Die ungeklärte Frage des Dateneigentums	173
5.8	Fazit und Ausblick	176
	Literatur.	176
6	Konzeption und Implementierung von Mikro-City-Hubs als Baustein emissionsneutraler City-Logistik.	181
	Frank Straube, Oliver Grunow, Stephanie Ihlenburg und Florian Sinn	
6.1	City-Logistik – Bedeutung und Herausforderungen	182
6.2	Mikro-City-Hub als zentrale Lösung in der City-Logistik	184
6.2.1	Elektrifizierungsansätze in der City-Logistik	185

6.2.2	Anforderungen des logistischen Wirtschaftsverkehrs	186
6.2.3	Lösungsansatz Mikro-City-Hub	186
6.2.4	Skalierung des City-Hub-Konzepts	187
6.2.5	Potenziale und Herausforderungen	188
6.3	Mikro-City-Hubs im Stückgutnetzwerk	189
6.4	Umsetzung der Systemintegration eines MCH	192
6.4.1	Strategische Partnerschaft	192
6.4.2	Konzeptionelle Anpassung der Transportkette	192
6.4.3	Standortidentifikation – Anforderungen und Herausforderungen	194
6.4.4	Identifikation Zustellgebiet	195
6.4.5	Sendungsstrukturanalyse I – Interne Eignungsparameter	196
6.4.6	Sendungsstrukturanalyse II – Externe Eignungsparameter	198
6.4.7	Sendungsstrukturanalyse III – Haftung	200
6.5	Roll Out	201
6.5.1	Layoutgestaltung	201
6.5.2	Erhöhung des Sendungsvolumens	202
6.6	Fazit und Ausblick	203
	Literatur	205

7 Olli, Emily und all die anderen: Wirkungsmacht und Akzeptanz durch Partizipation im Reallabor 209

Daniel Männlein, Andreas Knie, Anke Marie Schmidt, Birgit Böhm,
Dagmar Simon, Jan-Christoph Rogge und Viktoria Scheidler

7.1	Einleitung	210
7.2	Der EUREF-Campus	212
7.2.1	Wie alles anfang: Von der Energieuniversität für die Welt zum Reallabor für den Kiez: von <i>big</i> zu <i>small</i>	212
7.2.2	Ein Reallabor im Entstehen: Identifikation und Partizipation über Grenzobjekte	215
7.3	Von der Unbekannten zur Akzeptanz bis zur Partizipation – die Außensicht	215
7.3.1	Gesellschaftliche Akzeptanz der Energie- und Verkehrswende	216
7.3.2	Partizipative Akzeptanz im Reallabor	217
7.3.3	Demonstrationsobjekte mit Wirkungsmacht	219
7.3.4	Vom Labor in die Nachbarschaft	221
7.3.5	Akzeptanz von Elektromobilität und alternativen Mobilitätskonzepten	224
7.4	Stabilität und Instabilität eines Reallabors: Welche Erfolgsbedingungen lassen sich identifizieren?	227
	Literatur	228

8	Reallabor und dann? Wissenstransfer in die Öffentlichkeit.	233
	Julian Alexandrakis, Henrike Weber, Karoline Karohs, Hans-Liudger Dienel und Birgit Böhm	
8.1	Einführung	234
8.2	Nachhaltiges Reallabor	235
8.3	Wissenstransfer	236
8.4	Weiterbildungen	239
8.5	Wissenstransfer- und Weiterbildungsformate zur Förderung von Nachhaltigkeitsinnovationen	241
8.5.1	MBA-Studiengänge für die Energie- und Mobilitätswende	241
8.5.2	Betriebliche Weiterbildungen aus dem M2G-Reallabor	244
8.5.3	Das M2G-Symposium	249
8.5.4	E-School	251
8.6	Diskussion und Fazit	253
	Literatur	253
9	Verwertung, Transfer und zukünftige Herausforderungen	257
	Dietmar Göhlich, Frank Christian Hinrichs, Benno Hilwerling, Jan F. Heinekamp, Kristina Bognar, Franziska Kaiser und Enrico Lauth	
9.1	Einleitung	259
9.2	Urbane Mobilitätssysteme	260
9.3	Urbane Energiesysteme	262
9.4	Zukünftige Herausforderungen	265
9.4.1	Akteursmodelle für eine effiziente, wirtschaftliche und nachhaltige Integration e-mobiler Speicher- und Ladetechnologien	266
9.4.2	Automatisiertes Fahren und Laden als Technologie-Enabler für urbane Flotten	267
9.4.3	Technologieoffene Erforschung multifunktionaler Mobilitätshubs	268
9.4.4	Prognose und Wirkungsanalyse der Neo-Mobilität	269
9.4.5	Partizipation	270
9.4.6	Transferareale	270

Liste der Beitragsleistenden

Julian Alexandrakis Fachgebiet Entrepreneurship und Innovationsmanagement, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Pavel Boev Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Kristina Bognar Business Development, Schneider Electric, Berlin, Deutschland

Birgit Böhm Fachgebiet Arbeitslehre/Technik und Partizipation, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Nicole Böttcher Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, Berlin, Deutschland

Gerhard Bressler Stromnetz Berlin GmbH, Berlin, Deutschland

Jing Hui Denny Chen Vorstandsstab Neue Mobilität, Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) AöR, Berlin, Deutschland

Hans-Liudger Dienel Fachgebiet Arbeitslehre/Technik und Partizipation, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Dietmar Göhlich Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Oliver Grunow Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Stefan Heine Business Line Mobility, Dornier Consulting, Berlin, Deutschland

Jan F. Heinekamp Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration Erneuerbarer Energien, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Daniel Hesse Vorstandsstab Neue Mobilität, Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) AöR, Berlin, Deutschland

Benno Hilwerling Mobility Solutions, inno2grid GmbH, Berlin, Deutschland

Frank Christian Hinrichs Geschäftsführung, inno2grid GmbH, Berlin, Deutschland

Stephanie Ihlenburg Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Florian A. Jaeger Corporate Technology, Sustainable Lifecycle Mgmt. and Environmental Performance Management, Siemens AG, Berlin, Deutschland

Helga Jonuschat Business Line Mobility, Dornier Consulting, Berlin, Deutschland

Franziska Kaiser Geschäftsleitung, Mobility2Grid e.V, Berlin, Deutschland

Kilian Kärgel DB FuhrparkService GmbH, Deutsche Bahn Connect GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland

Karoline Karohs Geschäftsführung, Mobility2Grid e.V, Berlin, Deutschland

Andreas Knie Leiter der Forschungsgruppe Digitale Mobilität und gesellschaftliche Differenzierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, Deutschland

Alexander Kupfer Nachhaltige Produktentwicklung, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Erik Landeck Stromnetz Berlin GmbH, Berlin, Deutschland

Gunnar Landfester Allego GmbH, Berlin, Deutschland

Andreas Laske Smart Infrastructure, Vertrieb Ladeinfrastruktur eMobilität Region Deutschland, Siemens AG, Berlin, Deutschland

Enrico Lauth Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Olga Levina FZI Forschungszentrum Informatik, Berlin, Deutschland

Daniel Männlein Forschungsgruppe Digitale Mobilität und gesellschaftliche Differenzierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, Deutschland

Saskia Mattern FZI Forschungszentrum Informatik, Berlin, Deutschland

Bernhild Meyer-Kahlen Megawatt Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin, Deutschland

Philipp Nguyen Energiesystemanalyse, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Deutschland

Stefan Niemand Leiter Integrierte Planung/Steuerung Produkt, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Raisa Popova DB Energie GmbH, Deutsche Bahn AG, Berlin, Deutschland

Andreas F. Raab Cross Industries Digi Utility, adesso SE, Berlin, Deutschland

Thomas Richter Fachgebiet Straßenplanung und -betrieb, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Jan-Christoph Rogge Forschungsgruppe Digitale Mobilität und gesellschaftliche Differenzierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, Deutschland

Viktoria Scheidler Forschungsgruppe Digitale Mobilität und gesellschaftliche Differenzierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, Deutschland

Anke Marie Schmidt Forschungsgruppe Digitale Mobilität und gesellschaftliche Differenzierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, Deutschland

Dagmar Simon Geschäftsführerin EVACONSULT, Berlin, Deutschland

Florian Sinn Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Matti Sprengeler Energiesystemanalyse, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Deutschland

Korinna Stephan Abteilungsleiterin Innovative Mobilität, Spiekermann Consulting Engineers, Berlin, Deutschland

Frank Straube Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Kai Strunz Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration Erneuerbarer Energien, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Gerhard Stryi-Hipp Energiesystemanalyse, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Deutschland

Jan Sürmeli FZI Forschungszentrum Informatik, Berlin, Deutschland

Michael Tost Digitalisierung, Innovation und Geschäftsfeldentwicklung, Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) AöR, Berlin, Deutschland

Johannes Tücks Vorstand EUREF AG, EUREF AG, Berlin, Deutschland

Markus Vogelsang Smart Infrastructure, Global Sales & Business Development eMobility Charging Infrastructure, Siemens AG, Berlin, Deutschland

Henrike Weber Fachgebiet Entrepreneurship und Innovationsmanagement, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Sven Willrich FZI Forschungszentrum Informatik, Berlin, Deutschland

Über die Herausgeber



Dietmar Göhlich ist seit 2010 Professor für Produktentwicklung und Mechatronik an der TU Berlin und leitet dort als Geschäftsführender Direktor das Institut für Maschinenkonstruktion und Systemtechnik. Davor war er in unterschiedlichen Führungspositionen in der Pkw-Entwicklung der Daimler AG tätig. Er ist ein ausgewiesener Experte im Bereich Elektromobilität und leitet den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungscampus Mobility2Grid. Er ist Herausgeber des *DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau*, Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) und der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften – acatech. Seit 2019 ist er zudem Mitglied des Vorstands des Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science.



Andreas F. Raab studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin und der University of Oklahoma. Im Anschluss promovierte er an der TU Berlin im Bereich Elektrotechnik und Informatik. Ab 2010 leitete er am Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration erneuerbarer Energien nationale und internationale Forschungs- und Verbundprojekte. Andreas F. Raab dozierte seit 2013 an der HTW Berlin und der TU Berlin im Bereich Regenerative Energiewirtschaft und Smart-Grid-Infrastrukturen. Seit 2019 verantwortet er die digitale Gestaltung von Innovations- und Transformationsprozessen bei Unternehmen im Energie- und Verkehrssektor als Berater bei der adesso SE.



E-Mobilität als Flexibilitätsbaustein in Smart Grids

1

Andreas F. Raab, Jan F. Heinekamp, Gerhard Bressler,
Alexander Kupfer, Stefan Niemand, Erik Landeck
und Kai Strunz

Zusammenfassung

Dieses Kapitel beleuchtet die Markt- und Systemintegration von E-Mobilität und zeigt, neben aktuellen Praxisanwendungen, zukünftige Ansätze zur Systemoptimierung in intelligenten Energieversorgungsnetzen auf. Die Gestaltung einer kostengünstigen, nachhaltigen und versorgungssicheren Energieversorgung inklusive Mobilität ist dabei die hauptausschlaggebende Zielsetzung. In diesem Zusammenhang werden die Anforderungen aus den regulatorischen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen analysiert, sowie Flexibilitäten für Lade- und Entladevorgänge identifiziert und bewertet. Die Umsetzbarkeit passiver und aktiver Lademanagementsysteme wird anhand eines realen Umfeldes vorgestellt und diskutiert. Weiterführende Anwendungsbereiche sowie Integrationslösungen werden in

A. F. Raab (✉)
Cross Industries Digi Utility, adesso SE, Berlin, Deutschland

J. F. Heinekamp · K. Strunz
Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration Erneuerbarer Energien, Technische
Universität Berlin, Berlin, Deutschland

G. Bressler
Stromnetz Berlin GmbH, Berlin, Deutschland

A. Kupfer
Nachhaltige Produktentwicklung, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

S. Niemand
Leiter Integrierte Planung/Steuerung Produkt, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

E. Landeck
Stromnetz Berlin GmbH, Berlin, Deutschland

rechnergestützten Simulationen für Smart-Grid-Lösungen vertieft. Hierbei wird anhand des Aggregationskonzeptes eines virtuellen Kraftwerks gezeigt, wie E-Mobilität als Flexibilitätsbaustein in Smart Grids verstanden werden kann. Der sektorenübergreifende Lösungsansatz wird anhand mathematischer Formulierungen und Methoden zur Bestimmung potenzieller Systemdienstleistungen spezifiziert und in Fallstudien evaluiert. Als Ergebnis dieses Kapitels werden praxistaugliche und wissenschaftliche Realisationsmöglichkeiten für E-Mobilität in Smart Grids aufgezeigt, Handlungsempfehlungen erschlossen sowie gewonnene Erkenntnisse für die Gestaltung einer zukünftigen regenerativen Energieversorgung vermittelt.

Abstract

This chapter examines the market and system integration of e-mobility and presents current applications as well as future approaches for system optimization and smart grid solutions. In this context, the design of a cost-effective, sustainable and reliable energy supply including mobility appears as the fundamental objective. The requirements of regulatory, technical and economic framework conditions for the provision of system services are analyzed and the flexibilities for charging and discharging processes identified and evaluated. Passive and active charging management systems are introduced and discussed based on real-world implementations. Further applications and methods for market and system integration of e-mobility are investigated by computer-aided simulation. The cross-sectoral approach is specified using mathematical formulations and methods for determining potential system services and is evaluated in case studies. In summary, this chapter outlines practicable and scientific solutions. It identifies recommendations for further actions and gives insights into the knowledge gained for the design of a future renewable energy supply.

Schlüsselwörter

Aggregatoren · Energieversorgungsnetz · Messstellenkonzepte · Netzanschlusskonzepte · E-Mobilität · Ladetechnologien · Smart Grid · Steuerbarkeiten · Digitale Vernetzung · Virtuelles Kraftwerk

1.1 Einleitung

Die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Verkehrs- und Energieversorgung bedingt eine enge Verzahnung sektorübergreifender Lösungen für eine zügige und nachhaltige Markt- und Systemintegration von E-Mobilität. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei dem privat- und nutzfahrzeugbasierten Verkehr als einem der wesentlichsten Verbraucher fossiler Energieträger zu. Die Elektrifizierung des Verkehrssektors ermöglicht es einerseits, die Energieeffizienz zu steigern und andererseits, den Energieverbrauch zeitlich nahezu vollständig von der Energieerzeugung zu entkoppeln. In den unteren Spannungsebenen ist dabei jedes einzelne E-Fahrzeug ein vergleichsweise hoher Einzelverbraucher, aber auch

zugleich -speicher, der dezentral und flexibel agieren kann. In den höheren Spannungsebenen können E-Fahrzeuge in der Summe sogar regional und überregional netzrelevant wirken. In diesem Kontext bieten Smart-Grid-Lösungen die Möglichkeit, E-Fahrzeuge nicht nur intelligent in Marktaktivitäten, sondern auch für Netzoperationen einzubinden.

Für eine CO₂-neutrale Verkehrs- und Energieversorgung gilt es, insbesondere erneuerbare Energien bei Ladevorgängen zu berücksichtigen und regulatorische Anforderungen sowie Standards im entsprechenden Maßstab aufeinander abzustimmen. Die vorhandenen Netzinfrastrukturen und -funktionalitäten gilt es bedarfsgerecht unter volks- und betriebswirtschaftlicher Abwägung zu optimieren und gegebenenfalls auszubauen [1, 2]. Aufgrund der langen Lebenszyklen energietechnischer Systeme müssen hier jedoch zeitnahe wegweisende Entscheidungen getroffen werden, um diese Innovationen als strategische Schlüssel für eine langfristig erfolgreiche Energie- und Verkehrswende nutzbar zu machen. Auf dieser Grundlage müssen Planungs- und Betriebsmethoden der verschiedenen Akteure in Betracht gezogen werden und geeignete Ladestrategien sowie Markt- und Geschäftsmodelle für Kunden angeboten werden. In diesem Zusammenhang werden sowohl in der Praxis als auch in der Theorie unterschiedliche Ansätze diskutiert. Unter anderem geht es dabei darum, E-Mobilität für Systemdienstleistungen nutzbar zu machen [3, 4]. Bisherige Planungsmethoden greifen dabei auf Annahmen, aufgezeichnete Fahrzyklen mit Standzeiten und Bewegungsprofilen, Verkehrsnetzsimulationen bis hin zu aufwendigen Echtzeitmessungen zurück [5, 6, 7]. Eine Umsetzung in die Praxis gestaltet sich dabei nicht nur komplizierter, sondern ist aus datenschutzrechtlichen Gründen unter den gegebenen regulatorischen Voraussetzungen kaum umsetzbar.

Als Beitrag für mögliche Umsetzungen zeigt das Kapitel bisherige Realisierungsmöglichkeiten auf und stellt erweiterte Integrationsansätze für Smart-Grid-Lösungen vor. Dabei wird E-Mobilität als integrativer Bestandteil intelligenter Energiesysteme diskutiert. Anhand des Aggregationskonzepts eines Virtuellen Kraftwerks (engl. Virtual Power Plant: VPP) werden Planungs-, Prognose- und Optimierungstechniken vorgestellt. Außerdem wird der Mehrwert der E-Mobilität im Kontext liberalisierter Energiemärkte aufgezeigt. Neben der mathematischen Formulierung eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodells werden Funktionen, welche in Bezug zur Integration der E-Mobilität stehen, in ausgewählten Fallstudien vorgestellt. In numerischen Simulationen wird einerseits die vorgestellte Modellierungsmethode validiert, zum anderen werden Ladestrategien mit E-Fahrzeugen analysiert und bewertet.

1.2 Regulatorische Rahmenbedingungen, Netzplanung und -integration

Der Verkehrs- und Transportsektor ist für rund 30 % des Endenergiebedarfs sowie 19 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Dabei werden täglich etwa 3 Mrd. km pro Tag zurückgelegt. Das Hauptverkehrsmittel bleibt weiterhin der Personenkraftwagen (Pkw) mit ca. 75 % der Personenkilometer.¹ Dies summiert sich bei 47 Mio.

¹Nach Mobilität in Deutschland (MiD) Kurzreport 2017, Modal Split (hochgerechnet).

angemeldeten Pkw zu mehr als 630 Mrd. km im Jahr. Wird von einer Vollelektrifizierung bei einem konservativen Ansatz von 0,25 kWh/km spezifischem Energiebedarf ausgegangen, inkl. Fahrzeugklimatisierung und 15 % Verluste von der Erzeugung bis zur Speicherung in der Batterie, entspricht das einer benötigten zusätzlichen Energiemenge in der Größenordnung von 150 TWh pro Jahr bzw. 430 GWh pro Tag allein für den Pkw-Verkehr.

In diesem Fall beträgt die zusammengefasste Ladeleistung zur Energiebereitstellung für diese E-Fahrzeuge bei einer üblichen Ladeleistung von 3–10 kW pro Anschlusspunkt mehreren GW. Mit einer Durchdringungsrate von ca. 150 000 E-Fahrzeugen und 17.400 aufgebauten öffentlichen Ladepunkten (engl. Charging Point: CP) ist man jedoch mit Stand heute allein von dem Ziel, 1 Mio. E-Fahrzeuge und 100 000 weitere öffentliche Ladepunkte umzusetzen, weit entfernt. Dabei sind die vorhandenen ca. 3 Mio. Lastkraftwagen (Lkw) und etwa 80 000 Kraftomnibusse (Bus) noch gar nicht berücksichtigt.

Sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene sind weitreichende Maßnahmen erforderlich, falls eine CO₂-neutrale Verkehrs- und Energieversorgung zeitnah gelingen soll. Bisherige Richtlinien und Verordnungen und deren Auswirkungen sind in Tab. 1.1 aufgeschlüsselt.

Die Umsetzung der europäischen Energieeffizienzrichtlinie 2018/844 und deren Überführung in nationales Recht können so beispielsweise zu einer Steigerung der Anzahl an Ladepunkten führen. Weiter fortgeschritten ist die Umsetzung der EU-Richtlinie 2014/94 für den Aufbau von Ladeinfrastruktur auf nationaler Ebene mit dem Inkrafttreten der Ladesäulenverordnung, durch welche verbindliche Regelungen zu Ladesteckerstandards erreicht werden konnten. Dabei stellt das Combined Charging System (CCS) als kabelgebundene Lösung den derzeitigen Standard im europäischen und amerikanischen Raum für Ladesteckerstandards mit Gleich- und Wechselspannung dar. Neben dem konduktiven Anschluss mit einem entsprechenden kompatiblen Ladestecker ist auch ein kabelloser Anschluss möglich. Diese kontaktlosen Lösungen sind jedoch kaum in Serienfertigung realisiert oder durch Standardisierungs- und Normungsprozesse definiert.

Tab. 1.1 Ausgewählte Richtlinien und Verordnungen zur Förderung der E-Mobilität

Maßnahme	Inhalte und Auswirkungen
Umsetzung der europäischen Energieeffizienzrichtlinie 2018/844 mit Vorschriften für Baumaßnahmen	1. Nichtwohngebäude – mindestens ein Ladepunkt und Verlegen von Schutzrohren für Elektrokabel von mindestens 20 % aller vorhandenen Stellplätze. Bis 2025 Festlegung einer Mindestanzahl an Ladepunkten mit mehr als 20 Stellplätzen vorgesehen 2. Wohngebäude – Verlegung von Kabelschutzrohren für alle vorhandenen Stellplätze
Umsetzung EU-Richtlinie 2014/94 mit Inkrafttreten der Ladesäulenverordnung (LadesäulenVO)	Definition von Mindestanforderungen für Aufbau und Betrieb öffentlich zugänglicher Ladepunkte sowie technischer Anforderungen zur Gewährleistung der Interoperabilität
Ergänzung der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV)	Mitteilungspflicht jeglicher Ladeeinrichtungen für E-Fahrzeuge an den Netzbetreiber vor deren Inbetriebnahme, ab einer Summen-Bemessungsleistung von 12 kVA Zustimmung des Netzbetreibers erforderlich

1.2.1 Anschluss von Ladeinfrastruktur unter Einhaltung technischer Vorgaben

Bevor eine Ladeinfrastruktur an das Energieversorgungsnetz angeschlossen wird, muss bereits in der Planungsphase der notwendige Leistungsbedarf bestimmt werden. Hierbei sind neben den vorgesehenen Ladestrategien zusätzliche Leistungsbedarfe, wie z. B. Kühlung und Wirkungsgrad der Leistungselektronik, bei der Auslegung mit zu berücksichtigen.

Wie alle anderen elektrischen Verbrauchsmittel sind auch Ladeeinrichtungen für E-Fahrzeuge ab einer Bemessungsleistung von 4,6 kVA im Drehstromsystem dreiphasig anzuschließen. Diese Anforderungen sind in den Technischen Anschlussregeln vom VDE Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz in der VDE AR-N 4100² bzw. in der VDE AR-N 4110 weiter spezifiziert. Vor Inbetriebnahme einer Ladeinfrastruktur gilt eine Meldepflicht an den Netzbetreiber. Die Ergänzungen in der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV)³ sehen sogar eine vorherige Zustimmung des Netzbetreibers ab einer Bemessungsleistung von 12 kVA vor. Diese Regelungen wurden bereits in die technischen Anschlussbedingungen der Netzbetreiber (z. B. TAB NS Nord 2019, gültig ab Mai 2019) aufgenommen. Die folgenden Informationen und Parameter werden dabei meist durch Netzbetreiber abgefragt:

- Standort (privat, öffentlich, privat-öffentlich)
- Hersteller/Typ der Ladeinfrastruktur
- Lageplan der Ladeeinrichtung vorhanden
- Art und Anzahl (Ladesäule, Wallbox, Sonstiges)
- max. Netzentnahmeleistung bzw. bei DC Netzanschlussleistung bezogen auf AC
- Anzahl Ladepunkte (AC 1ph/3ph, DC \leq 4,6 kVA)

Zusätzliche Angaben können je nach Netzbetreiber variieren und beziehen sich im Wesentlichen auf die Regel- und Steuerbarkeit sowie die Rückspeisung. Demnach ergibt sich auch bei den Anforderungen an ein Lademanagement ein noch zu harmonisierender Abstimmungsbedarf.

Wird durch den Kunden die Ladeinfrastruktur als steuerbare Verbrauchseinrichtung ausgelegt,⁴ ist der Grundbaustein bereits mit dem notwendigen Aufbau einer separaten Messlokation als Zählpunkt geregelt. Ist darüber hinaus eine zentrale Steuerung vorgesehen, muss diese zusätzlich nach den Vorgaben des Messstellenbetreibers erfolgen. Hierbei legt der Messstellenbetreiber unter Maßgabe des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) die Art der Datenübertragung und der Kommunikationseinrichtung fest. In der aktuellen Version der AR-N 4100 sind außerdem die Grundlagen für die Belastbarkeit und der Aufbau von Zählplätzen definiert, sowie die Möglichkeit zur Steuerung mittels Unterbrechbarkeit beschrieben.

²Neuerung für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz, seit April 2019 in Kraft.

³Gemäß der im Februar 2019 gefassten Beschlüsse, u. a. in § 19 (2) bezüglich der Mitteilungspflicht.

⁴Nach § 14a Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) zur Inanspruchnahme reduzierter Netzentgelte.

Im Falle einer Rückspeisung (engl. Vehicle-to-Grid: V2G) in das Energieversorgungsnetz ist die Ladeinfrastruktur mit dem angeschlossenen E-Fahrzeug als Erzeugungsanlage zu verstehen. Hierfür sind in der AR-N 4100 besondere Anforderungen definiert, u. a. zusätzliche Angaben zur Bemessungsleistung, dem Leistungsfaktor, der Speicherkapazität sowie der Normkonformität. Die aufgeführten Informationspflichten sind in die technischen Anschlussregeln der Netzbetreiber entsprechend überführt und wurden ergänzt bzw. weiter spezifiziert. Aktuell gelten außerdem Richtlinien für Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz VDE AR-N 4105 sowie für Netzurückwirkungen DIN EN 61 000-2-3 und DIN EN 61 000-2-13, welche in Zukunft zusammengeführt werden sollen.

1.2.2 Netzanschlussmöglichkeiten von E-Fahrzeugen

Der Netzanschluss von E-Fahrzeugen wird sich in erster Linie nach dem Kundenbedarf richten. Das heißt, es wird berücksichtigt, wann es für den Kunden notwendig und möglich ist, zu laden. Ladepunkte für E-Fahrzeuge verfügen je nach Ausführung der installierten Ladeinfrastruktur über eine Ladeleistung von etwa 3 kW bis 500 kW und werden über das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz gespeist. Bezüglich des Pkw-Verkehrs ist davon auszugehen, dass Ladevorgänge primär in den Hauptstandzeiten der Fahrzeuge zu Hause oder am Arbeitsplatz stattfinden werden. Ein geringer Teil der Ladevorgänge wird am Zielort (engl. destination charging), wie zum Beispiel einem Hotel, stattfinden, an dem die E-Fahrzeuge längere Zeiten verweilen. Die verbleibenden Ladevorgänge werden über Schnellladeinfrastruktur auf der Strecke (engl. high power charging) stattfinden. Beim Nutz- und Wirtschaftsverkehr zeichnet sich eine ähnliche Tendenz ab, wobei Ladevorgänge hier primär in einem Depot (engl. depot charging), Betriebshof bzw. an Endhaltestellen stattfinden werden.

Die Netzanschlussmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur variieren je nach Standort und sind zum Teil an den jeweiligen Anwendungsfall gekoppelt. Demnach ist der Aufbau von Ladepunkten von den Interessen des jeweiligen Kunden, Betreibers bzw. Unternehmens abhängig. Abb. 1.1 zeigt mögliche Umsetzungen der andiskutierten Netzanschlüsse (1) in Wohngebäude bzw. am Arbeitsplatz, (2) auf Parkplätzen und Haltestellen und (3) in Depots und an E-Tankstellen.

Ein Anschluss am Wohnort oder Arbeitsplatz wird bei den meisten E-Fahrzeugen auf der Niederspannungsebene erfolgen. Die Ladestation kann hierbei mit dem Hausanschluss, üblicherweise mit einer Leistung 11 kW und 22 kW AC dreiphasig, gekoppelt werden.

Bei Ladevorgängen auf Parkplätzen bzw. (End-)Haltestellen befinden sich meist mehrere Ladestationen an einem Standort. Hier kann die Ladeleistung für E-Fahrzeuge bis zu 43 kW AC betragen. Ein Netzanschluss an eine kundeneigene 10/0,4 kV-Umrichterstation könnte bei größeren Stellplätzen wie Tiefgaragen oder Parkhäusern sinnvoll sein.

Kundeneigene Umrichterstationen sind ebenso für den Netzanschluss von Flottenladepunkten sowie Stellflächen für elektrifizierte Nutzfahrzeuge sinnvoll. Bei den Anschlussleistungen für Depots und E-Tankstellen gilt es, genügend Ladeplätze und ausreichende Ladekapazitäten vorzuhalten. Hierfür kommen DC-Ladestationen mit mindestens 50 kW zum Einsatz. Insbesondere Schnellladeinfrastruktur wird im gewerblichen Rahmen und an Langstreckenachsen mit einer Ladeleistung von 350 kW und darüber hinaus umgesetzt.

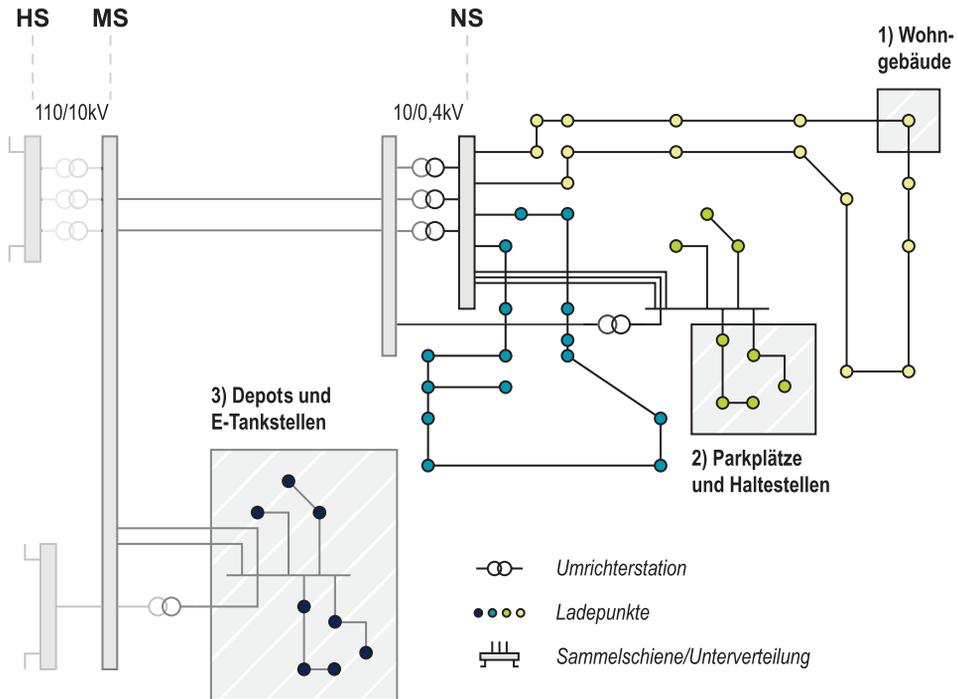


Abb. 1.1 Netzanschlussmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge, unterteilt nach typischen Spannungsebenen in Verteilnetzen

Bei einem gleichzeitig höheren Betrieb und entsprechender Auslastung der Ladeinfrastruktur erfolgt hier in der Regel ein Anschluss zum Mittelspannungsnetz mit nachgelagerter Unterverteilung zu den jeweiligen Ladepunkten.

Eine zukünftig denkbare Rückspeisung ins Energieversorgungsnetz stellt eine besondere Herausforderung hinsichtlich einer wirtschaftlichen Abrechnung dar, da beispielsweise die Energieaufnahme und -abgabe an unterschiedlichen Netzpunkten erfolgen kann. Außerdem gilt es zu prüfen, inwieweit sich die zusätzliche Be- und Entladung auf die Alterung der Fahrzeugbatterie sowie die Betriebszeiten und Robustheit des Fahrzeugs auswirkt und wie hier eine Kundenakzeptanz erreicht werden kann. Das Netzdesign und die Regularien sind aus heutiger Sicht nicht geeignet, diese Nutzung ausreichend abzubilden. Jedoch wird bei sinkenden Grenzkosten und einer hohen Ausbaurrate erneuerbarer Energien die Attraktivität, das E-Fahrzeug als Speicher im Energieversorgungsnetz zu nutzen, zunehmend interessanter.

1.2.3 Netznutzungskonzepte als Anreize für verbesserte Integration von Ladeinfrastruktur

In der Regel werden Netzanschlüsse zum Betrieb einer Ladeinfrastruktur an das allgemeine Energieversorgungsnetz angeschlossen. Daneben sind jedoch noch weitere Netzan-

schluss- und Netzbetriebskonzepte anwendbar. In Bezug auf das E-Fahrzeug ist es dabei ausschlaggebend, ob ein Bezug oder eine Lieferung in das allgemeine Energieversorgungsnetz durch eine Rückspeisung stattfindet. Dabei kann das E-Fahrzeug als Verbrauchseinrichtung oder Erzeugungseinheit (EZE) klassifiziert werden. Tab. 1.2 fasst mögliche Netzanschluss- und Netzbetriebskonzepte zusammen und stellt die daraus resultierenden Auswirkungen zur Integration von Ladeinfrastruktur für E-Mobilität vergleichend gegenüber. Die zusätzlichen Netznutzungskonzepte zum öffentlichen Energieversorgungsnetz umfassen Kundenanlagen, Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung und geschlossene Verteilnetze.

Sofern ein räumlich zusammenhängendes Areal genutzt wird, kann der Betrieb des Energieversorgungsnetzes sowie der darin integrierten Ladeinfrastruktur selbstständig als Kundenanlage übernommen werden. Weiterhin gilt jedoch die Sicherstellung eines unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung sowie zum Zwecke der Belieferung, eine unabhängige, diskriminierungsfreie und unentgeltliche Bereitstellung gegenüber den Netznutzern. Die Anmeldung eines Ladepunktes als steuerbare Verbrauchseinrichtung gemäß § 14a EnWG ist innerhalb einer Kundenanlage jedoch nicht möglich.

Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung beschreiben Netze, die für den Transport von Energie des eigenen Unternehmens betrieben werden. Sie besitzen die gleichen Voraussetzungen, mit Ausnahme des unverfälschten Wettbewerbs. Durch die Anforderung, dass das Netz fast ausschließlich zu mehr als 90 % für die Eigenversorgung genutzt wird, ist ein Wettbewerb nicht gegeben.

Soll der Betrieb eines Netzes für ein Areal von Industrie- oder Gewerbekunden vorliegen und den angeschlossenen Kunden nicht unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden, gibt es die Möglichkeit der Einstufung als sogenanntes geschlossenes Verteilnetz. Die

Tab. 1.2 Netzanschluss- und Netzbetriebskonzepte für Energieversorgungsnetze

	Anforderungen	Auswirkung
Öffentliches Energieversorgungsnetz	Gewährleistung der personellen, technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit für den Betrieb des Netzes	Erfüllung aller Rechtsfolgen/Auflagen ^{*)} gemäß dem EnWG
Kundenanlage	Kunden, die innerhalb der Kundenanlage eigene Versorgungsverträge haben wollen, müssen extra mit Zwischenzählern abgerechnet werden	Gänzlich von Regulierung ausgenommen
Kundenanlage zur betrieblichen Eigenversorgung		Bei reiner Eigenbelieferung gänzlich von Regulierung ausgenommen
Geschlossenes Verteilnetz	Einhaltung der Entflechtungsregeln und Zusammenarbeitspflicht mit den Netzbetreibern	Partielle Erfüllung unter Ausschluss ausgewählter Rechtsfolgen/Auflagen ^{*)} gemäß dem EnWG

^{*)} u. a. Anschlusspflicht, Anreizregulierung, Netzzustands- und Netzausbauplanungsbericht, Entgeltgenehmigung, Beschaffung Verlustenergie, Monitoring.