

© VDE FNN

Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Ladevorgänge an privaten Ladepunkten

Wissenschaftliche Untersuchung zur Gleichzeitigkeit von
ungesteuerten Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen

Oktober 2021

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Hintergrund	6
1.2	Ziel der Untersuchung	6
1.3	Abgrenzung des Betrachtungsbereichs	7
1.4	Gliederung des Dokuments	7
1.5	Begleitung der Studie	7
2	Vorgehensweise, Methodik und Daten	8
2.1	Metastudie und Datengrundlage	8
2.1.1	Grobkategorisierung in Themenbereiche	8
2.1.2	Betrachtete Datenquellen	9
2.2	Verwendete Datengrundlage	10
2.2.1	Ladeinfrastruktur	10
2.2.2	Ladeenergiebedarf	11
2.2.3	Ladeverhalten	12
2.2.4	Korrelation von Ladevorgängen mit anderen Lasten	14
2.3	Validierung der Eingangsdaten anhand von Messwerten	15
2.4	Simulationsmethodik	16
2.5	Untersuchungskonzept für Simulationsrechnungen und Sensitivitäten	20
3	Kernergebnisse der Simulationen	20
3.1	Basis-Variante	20
3.2	Gebietstypen	23
3.3	Ladeleistung	25
3.4	Ladeverhalten: „Tanken“ versus „Laden“	26
3.5	Laden vor Abfahrt	28
3.6	Exkurs: Wirkungen möglicher Ladesteuerungsmechanismen	29
3.6.1	Sperrzeit	29
3.6.2	Anreize für die Wahl des Ladebeginns (Happy Hour)	30
4	Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung der Netzplanung	31
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	32
6	Literaturverzeichnis	35

Bildverzeichnis

Bild 1:	Verteilung der Gesamtwegstrecke je PKW und Tag nach Gebietstypen	11
Bild 2:	Stündliche Ankunfts-wahrscheinlichkeiten differenziert nach Wohnort und Arbeitsort für Wochentage (Montag - Freitag)	12
Bild 3:	Stündliche Abfahrts-wahrscheinlichkeiten für das Weg-Ziel „Arbeit“ an Wochentagen (Montag - Freitag)	13
Bild 4:	Wahrscheinlichkeitsverteilung der am Tag nachgeladenen Strecke bei den Varianten „Laden“ und „Tanken“ für das Ladeverhalten	14
Bild 5:	Standardlastprofile H0 Haushalt und G1 Gewerbe werktags 8-18h (Quelle: Repräsentative VDEW-Lastprofile, VDEW, 1999)	15
Bild 6:	Beispielhaftes Ergebnis eines Simulationslaufs für vorstädtischen Gebietstyp und Ladeleistung 11 kW: Aggregierte Lastprofile von unterschiedlich großen Ladepunkt-Kollektiven	17
Bild 7:	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gleichzeitigkeit für 10 und 150 Ladepunkte bei vorstädtischem Gebietstyp und Ladeleistung 11 kW	18
Bild 8:	Beispielhafter Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte für einen vorstädtischen Gebietstyp und eine Ladeleistung von 11 kW	19
Bild 9:	Gewählte Parametrierung in der Basis-Variante.....	21
Bild 10:	Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und des Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl der Ladepunkte in der Basis-Variante	22
Bild 11:	Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte in der Basis-Variante für eine große Zahl von Ladepunkten.....	23
Bild 12:	Gewählte Parametrierung für die betrachteten Gebietstypen	24
Bild 13:	Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und des Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte je betrachtetem Gebietstyp	24
Bild 14:	Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und der Ladeleistung	25
Bild 15:	Gewählte Parametrierung zur Nachbildung der beiden betrachteten Varianten des Ladeverhaltens für das betrachtete vorstädtische Gebiet.....	27
Bild 16:	Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Ladeverhalten „Tanken“ versus „Laden“ für das betrachtete vorstädtische Gebiet bei einer Ladeleistung von 11 kW je Ladepunkt	27
Bild 17:	Gewählte Parametrierung zur Nachbildung des Abfahrtszeitprofils	28
Bild 18:	Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Tagesnutzungsprofil	28
Bild 19:	Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und der betrachten Sperrzeiten.....	30
Bild 20:	Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Ladeverhalten „Tanken“ versus „Laden“ bei Reaktion auf „Happy Hour“-Anreiz	31

Kurzfassung

Die Bedeutung von Elektro-PKW für den Individualverkehr in Deutschland nimmt zügig zu, sodass sich mit Blick auf die Stromversorgung u. a. die Frage stellt, welche Auswirkungen Ladevorgänge dieser Fahrzeuge auf die Stromnetze haben. Ziel dieser Studie ist es, die von Elektrofahrzeugen durch ungesteuerte Ladevorgänge an Heimladepunkten verursachten Lastbeiträge abzuschätzen und ein Berechnungswerkzeug zur Anwendung in der Netzplanung zu entwickeln.

Die Untersuchung liefert folgende wesentliche Ergebnisse:

- Bei kleinen Kollektiven von unter fünf Ladepunkten muss mit hinreichender Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass innerhalb des Simulationszeitraums zumindest kurzzeitig alle Ladepunkte genutzt werden und sich ein Gleichzeitigkeitsfaktor von eins ergibt. Mit zunehmender Kollektivgröße wird es jedoch immer unwahrscheinlicher, dass alle Ladepunkte des Kollektivs gleichzeitig aktiv sind, sodass der Gleichzeitigkeitsfaktor anfänglich sehr schnell und mit zunehmender Ladepunktzahl langsamer abnimmt. Er beträgt in der untersuchten Basis-Variante mit einer Ladeleistung von 11 kW bei einer Kollektivgröße von 10 Ladepunkten 0,6, bei 20 Ladepunkten 0,35, bei 50 Ladepunkten 0,26 und bei 150 Ladepunkten noch ca. 0,17.

Für die Netzdimensionierung ist allerdings nicht der Gleichzeitigkeitsfaktor an sich relevant, sondern der resultierende Leistungsbeitrag, der sich aus der Multiplikation von Gleichzeitigkeitsfaktor, Anzahl der Ladepunkte und Ladeleistung ergibt. Auch wenn der Gleichzeitigkeitsfaktor und der spezifische Lastbeitrag je Ladepunkt mit zunehmender Anzahl der Ladepunkte sinken, steigt der absolute Leistungsbeitrag mit der Anzahl der Ladepunkte kontinuierlich an. Zusätzlich muss bei der Netzdimensionierung die zeitliche Korrelation des Lastbeitrags durch Ladevorgänge mit der sonstigen Last beachtet werden. Aus dem verwendeten Tagesnutzungsprofil lässt sich schließen, dass die meisten Ladevorgänge zwischen 16 und 18 Uhr beginnen. Angesichts von Ladedauern im Stundenbereich fällt der durch Ladevorgänge verursachte Leistungsbeitrag mit der Abendspitze der sonstigen Haushaltslast zusammen und erhöht damit in Netzbereichen mit überwiegendem Haushaltsnachfrageprofil die zeitgleiche Höchstlast praktisch vollständig um diesen Leistungsbeitrag.

- In großstädtischen Gebieten sind die Tageswegstrecken und spezifischen Verbrauchswerte und somit auch die Menge an nachzuladender Energie und die Ladedauer im Mittel geringer als in vorstädtischen Gebieten. Bei dörflichen Gebieten verhält es sich umgekehrt. Mit sinkender Ladedauer reduziert sich bei gleichbleibender Anzahl und spezifischer Leistung der Ladepunkte die Wahrscheinlichkeit, dass Ladepunkte gleichzeitig genutzt werden, sodass sich in großstädtischen Gebieten ein geringerer und in dörflichen Gebieten ein höherer Gleichzeitigkeitsfaktor ergibt als in der Basis-Variante. Die resultierenden Leistungsbeiträge der Ladepunkte liegen beim großstädtischen Gebietstyp um rund 20 % niedriger und beim dörflichen um rund 20 % höher als beim vorstädtischen Gebietstyp der Basis-Variante.
- Die Ladedauer hängt naturgemäß stark von der Leistung der Ladepunkte ab. Erwartungsgemäß zeigt sich, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor bei einer Ladeleistung von 3,7 kW deutlich höher und bei einer Ladeleistung von 22 kW deutlich niedriger ist als in der Basis-Variante (11 kW). Die resultierenden Leistungsbeiträge hingegen sind bei 22 kW deutlich höher und bei 3,7 kW deutlich niedriger als in der Basis-Variante (11 kW).
- Die durchschnittliche Dauer von Ladevorgängen hängt auch von deren Häufigkeit ab. Je weiter die zeitlichen Abstände zwischen den Ladevorgängen, desto länger dauern diese (bei unverändertem Mobilitätsverhalten), aber desto geringer wird auch die Zahl der Ladevorgänge pro Tag. Beide Effekte kompensieren sich jedoch gegenseitig teilweise, sodass die Lastbeiträge durch Ladevorgänge nur relativ geringfügig von diesem Aspekt des Ladeverhaltens abhängen.

- Insbesondere bei kalten Außentemperaturen ist es vorteilhaft, den Ladevorgang nicht direkt nach Abschluss der letzten Fahrt des Tages zu starten, sondern erst so spät, dass die Batterien unmittelbar vor Abfahrt vollständig geladen sind. Die Batterien sind dann bereits vorgewärmt und damit leistungsfähiger. Die Auswertung von Mobilitätsdaten zeigt, dass die Abfahrten am Morgen in einem deutlich engeren Zeitfenster erfolgen als die Ankünfte am Nachmittag und Abend. Durch die Konzentration der Abfahrten auf wenige Stunden synchronisieren sich die Ladevorgänge naturgemäß stärker, sodass Gleichzeitigkeitsfaktoren und Leistungsbeitrag ca. 30 % höher sind als bei Laden bei Ankunft.
- Primär wird in der Studie auf natürliches Ladeverhalten ohne externe Steuerung fokussiert. Ergänzend wurden aber auch Simulationen zur Illustration der Wirkungsweise möglicher Steuerungen durch Vorgaben oder Anreize durchgeführt. Die Untersuchungen hierzu zeigen, dass sich je nach Art eines Steuerungssignals (netzdienlich oder marktorientiert), dessen Parametrierung und des Ausmaßes der Reaktion der Fahrzeugnutzer Gleichzeitigkeiten ergeben können, die in positiver oder negativer Richtung deutlich von den Gleichzeitigkeiten abweichen, die sich bei ungesteuertem Ladeverhalten ergeben. Diese (erwartungskonformen) Ergebnisse implizieren nicht per se, dass bei der Netzauslegung die Wirkungen bestimmter möglicher Steuerungsmechanismen bereits berücksichtigt werden sollten. Es könnte vielmehr Gegenstand einer Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen für die Netzauslegung sein, die Höhe der im Planungsstadium (auch heute schon üblicherweise) berücksichtigten Leistungsreserven mit Blick auf die Wirkungen bestimmter Steuerungsmechanismen anzupassen. In jedem Fall bestätigen diese Ergebnisse aber, dass Ladesteuerungen durch Vorgaben oder Anreize *betrieblich* zu erhöhten Netzbelastungen und ggf. Netzengpässen führen können wie auch zu deren Abschwächung beitragen können.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der Anteil der Elektrofahrzeuge an der Gesamtzahl der auf den deutschen Straßen fahrenden PKW nimmt stetig zu. Es ist zu erwarten, dass die Zahl der Elektrofahrzeuge bis 2030 bereits auf mehrere Millionen Fahrzeuge angestiegen sein wird. Daher stellt sich die Frage, welche Auswirkungen die Ladevorgänge dieser Fahrzeuge auf die Stromnetze haben. Eine einfache Addition der Bemessungsleistungen der in einem (Netz-)Bereich befindlichen Ladepunkte führt offensichtlich zu einer Überschätzung des Beitrags der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen zur Gesamtlast, da mit zunehmender Kollektivgröße die Wahrscheinlichkeit abnimmt, dass die Fahrzeuge tatsächlich auch gleichzeitig aktiv laden. Dies ist keine grundlegend neue Erkenntnis, da das Abnahmeverhalten von Stromverbrauchern insbesondere in Niederspannungsnetzen allgemein stochastischer Natur ist, d. h. starke Durchmischungseffekte aufweist. Daher müssen Netzbetreiber bei der Auslegung der Stromnetze das Verhalten der Kunden und Gleichzeitigkeiten der Verbrauchsprofile verschiedener Kundentypen berücksichtigen.

Anders als bei sonstigen Kundentypen gibt es bei den Verbrauchsprofilen von Ladepunkten für Elektrofahrzeuge größere Unsicherheiten, da diese Profile u. a. stark vom Mobilitätsverhalten der Fahrzeugnutzer abhängen. Netzbetreiber können hier nicht auf weit zurückreichende Betriebserfahrungen zurückgreifen, sodass beispielsweise eine Ableitung von Gleichzeitigkeiten auf Basis von Messdaten aktuell noch nicht möglich ist. Dennoch müssen Netzbetreiber auch heute bereits Annahmen zur Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen und den daraus resultierenden Lastbeiträgen von Elektrofahrzeugen treffen, um Netze bestmöglich und zukunftsfähig auslegen zu können.

Eine Metastudie (1), deren Erstellung das Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) gemeinsam mit dem BDEW im Jahr 2018 beauftragt hat und in der die aktuellen Forschungserkenntnisse zur Elektromobilität zusammengetragen und bewertet sind, kommt u. a. zu der Erkenntnis, dass die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen eine zentrale Kenngröße bei der Netzintegration von Elektrofahrzeugen ist und diesbezüglich weiterer Forschungsbedarf besteht. Um hieran anknüpfend einen Beitrag zur Abschätzung des Lastbeitrags von Heimpladepunkten für Elektrofahrzeuge zu leisten, hat VDE FNN eine Studie zur „Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Ladevorgänge an privaten Ladepunkten“ erstellen lassen, deren Ergebnisse in diesem Bericht zusammengefasst werden.

1.2 Ziel der Untersuchung

VDE FNN möchte mit dieser Studie die Verteilnetzbetreiber bei der Auslegung von Stromnetzen mit Blick auf die stark steigende Zahl von Elektrofahrzeugen unterstützen. Hierzu werden in der Studie die von Elektrofahrzeugen verursachten Lastbeiträge abgeschätzt und ein Berechnungswerkzeug zur Anwendung in der Netzplanung entwickelt.

Zur Erreichung dieses Ziels ist es zunächst erforderlich, die (Höchst-)Lastbeiträge, die durch Ladevorgänge künftig entstehen werden, abzuschätzen und zu analysieren, wovon diese im Wesentlichen abhängen. Anschließend sollen darauf basierend Gleichzeitigkeitsfaktoren für Ladevorgänge in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung der Ladepunkte und die daraus resultierenden Lastbeiträge bestimmt werden. Weiter ist zu untersuchen, wie stark Parameteränderungen bei technischen Eigenschaften der Ladepunkte, dem Mobilitätsverhalten sowie dessen Deckung die Gleichzeitigkeiten und Lastbeiträge beeinflussen. Schließlich sollen die zentralen Ergebnisse in einem Berechnungswerkzeug zusammengeführt werden, mit dem die Gleichzeitigkeit und die Lastbeiträge einer bestimmten Anzahl von Ladepunkten in Abhängigkeit von wesentlichen Einflussfaktoren schnell ermittelt werden können.

1.3 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Diese Studie fokussiert auftragsgemäß ausschließlich auf private Ladepunkte (Heimladepunkte) für Elektrofahrzeuge, da hieraus die weitreichendsten zusätzlichen Anforderungen für die Niederspannungsnetze hervorgehen. Einrichtungen mit einer größeren Zahl von Ladepunkten hinter einem Netzanschluss etwa im Bereich von Parkhäusern, Tiefgaragen, Einzelhandelsparkplätzen oder Unternehmensparkplätzen verfügen in der Regel über eigene Lademanagementsysteme und weisen gänzlich andere Gleichzeitigkeitseigenschaften auf als einzelne private Ladepunkte. Sie müssen daher bei der Netzplanung separat und mit den jeweils individuell vereinbarten Netzanschlussleistungen berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Studie wird der Fokus primär auf das „natürliche“ Ladeverhalten gelegt, das nicht durch externe Vorgaben oder Anreize beeinflusst wird. Dieses ergibt sich im Wesentlichen aus dem Mobilitätsverhalten der Nutzer und ihren Entscheidungen über den Anschluss der Fahrzeuge an die Ladepunkte.

Hinsichtlich Fahrzeugtypen werden im Rahmen der Studie ausschließlich Fahrzeuge mit rein batterieelektrischem Antrieb (BEV) betrachtet. Diese weisen höhere Batteriekapazitäten auf als Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und führen somit zu stärkeren Auswirkungen auf die Netzbelastung. Darüber hinaus müssen Netzbetreiber – zumindest bei kleinen Kollektiven – damit rechnen, dass ausschließlich BEV vorhanden sind. Insofern stellt diese Einschränkung eine Abschätzung zur sicheren Seite dar.

1.4 Gliederung des Dokuments

Der vorliegende Bericht ist in die Bereiche

- Vorgehensweise, Methodik und Daten (Kap. 2),
- Kernergebnisse der Simulationen (Kap. 3) und Berechnungswerkzeug (Kap. 4) sowie
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (Kap. 5)

gegliedert.

In Kapitel 2 wird beschrieben, wie auf Basis einer Literaturrecherche relevante Einflussfaktoren für die sich einstellenden Gleichzeitigkeiten der Ladevorgänge identifiziert werden. Gleichzeitig werden bei der Literaturlauswertung vorhandene Daten zusammengetragen, die für die Parametrierung der Simulationsrechnungen benötigt werden. Anschließend wird die für die Studie verwendete Simulationsmethodik beschrieben und ein Untersuchungskonzept abgeleitet, auf dem die in Kapitel 3 vorgestellten Simulationsergebnisse basieren. Das Grundkonzept sowie wesentliche Eingangs- und Ergebnisgrößen des im Zuge dieser Studie erstellten Berechnungswerkzeugs zur Unterstützung der Netzplanung werden in Kapitel 4 vorgestellt. Abschließend werden wesentliche Erkenntnisse der Studie und abgeleitete Schlussfolgerungen in Kapitel 5 zusammengefasst.

1.5 Begleitung der Studie

VDE FNN hat eine interdisziplinär besetzte Expertengruppe aus Verteilnetzbetreibern, Herstellern (für Fahrzeuge, Wallboxen, IT-Services und Steuerungsgeräte), Wissenschaft, Elektrohandwerk und Prüfung/Zertifizierung eingesetzt, die die Erarbeitung der Studie begleitet hat.

Darüber hinaus hat die Firma SMA Solar Technology AG Messdaten zu Ladevorgängen zur Auswertung zur Verfügung gestellt, die zur Validierung der in der Studie verwendeten Einflussgrößen genutzt wurden. Die Studienautoren danken der SMA Solar Technology AG für die freundliche Unterstützung.

2 Vorgehensweise, Methodik und Daten

Um relevante Einflussfaktoren für die Gleichzeitigkeiten der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen zu identifizieren, sind zu Beginn alle Erfahrungen, Kenntnisse, Messwerte und sonstigen Daten zusammenzutragen, die bereits heute über den Einsatz von Elektrofahrzeugen und das Ladeverhalten der Fahrzeugnutzer vorliegen. Auf Grundlage der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Literaturrecherche wurden hierfür zunächst Themenbereiche identifiziert und die Inhalte der verwendeten Studien, Reallabore und wissenschaftlichen Veröffentlichungen hinsichtlich der beschriebenen Themenbereiche zusammengefasst.

Die durch die Metastudie gewonnenen und nach Themenbereichen gebündelten Erkenntnisse wurden mit der studienbegleitenden Expertengruppe des VDE FNN diskutiert und dienen als Grundlage für die in der Simulation verwendeten Eingangsgrößen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die für die Simulationen benötigten Daten in einheitlicher Weise vorliegen und mit Blick auf Netzplanungszwecke valide quantifiziert werden können. Einen Überblick über die für die Simulationen verwendete Datengrundlage gibt Abschnitt 2.2.

Neben der Metastudie und dem Expertengremium des VDE FNN konnte für die Validierung der Datengrundlage auch auf reale Messwerte zurückgegriffen werden. Hierfür standen die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Messwerte der SMA Solar Technology AG zur Verfügung. Hierdurch konnten insbesondere bestimmte mit Unsicherheiten behaftete Annahmen beispielsweise zu der Frage, inwieweit Ankunftszeitpunkte am Zielort und Startzeitpunkte der Ladevorgänge korrelieren, an Messdaten gespiegelt und damit Parametrierungsunsicherheiten reduziert werden.

Auf dieser fundierten und validierten Datengrundlage beruht die Parametrierung der Simulationen. Dies beinhaltet einerseits fest vorgegebene Parameter und andererseits Parameter mit einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Simulationsmethodik, die im Kern auf einer Monte-Carlo Simulation beruht, ist in Abschnitt 2.4 genauer erläutert.

Da die Eingangsgrößen auch weiterhin mit Unsicherheiten behaftet sind, wurden die Simulationsergebnisse daraufhin analysiert, wie stark sich die Einflussfaktoren auf die Ergebnisse auswirken. Für diese Sensitivitätsanalysen wurden je einer der zuvor als wesentlich identifizierten Einflussfaktoren variiert, ausgehend von einem definierten und geeigneten Arbeitspunkt, im Weiteren als Basis-Variante bezeichnet. Das Untersuchungskonzept hierfür ist in Abschnitt 2.5 beschrieben.

2.1 Metastudie und Datengrundlage

Die im Folgenden beschriebene Grobkategorisierung bündelt die gewonnenen Erfahrungen, Erkenntnisse und Messwerte zur Nutzung von E-Fahrzeugen und deren Ladeverhalten in Themenbereiche. Aus diesen Themenbereichen lassen sich die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen ableiten. Anschließend werden die relevantesten Datenquellen der jeweiligen Themenbereiche hervorgehoben.

2.1.1 Grobkategorisierung in Themenbereiche

Um die im Rahmen der Metastudie gewonnenen Erkenntnisse und Daten zu kategorisieren, werden die Faktoren, die einen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen haben können, nach Themenbereichen gruppiert. Es ist offensichtlich, dass die Gleichzeitigkeitsfaktoren von der in einem Netzbereich vorhandenen Fahrzeugzahl, also der Kollektivgröße, abhängen. Darüber hinaus sind zahlreiche weitere Einflussfaktoren zu beachten.

Folgende Themenbereiche sind relevant:

- **Ladeinfrastruktur**

Unter dem Begriff der Ladeinfrastruktur werden in dieser Studie die Ladetechnologie, die Ladeleistung und die Eigenschaften der Ladekurve zusammengefasst. Den größten Einfluss auf die Gleichzeitigkeiten hat hierbei die Ladeleistung. Es ist zu identifizieren, welche Ladeleistungen derzeit üblich sind und ob eine Veränderung in den nächsten Jahren zu erwarten ist. Außerdem sollen Erkenntnisse gesammelt werden, inwieweit die Ladetechnologie und die Eigenschaften der Ladekurven Auswirkungen auf die Gleichzeitigkeiten der Ladevorgänge haben können.

- **Ladeenergiebedarf**

Der tägliche Ladeenergiebedarf wird durch die beiden Faktoren des spezifischen Energieverbrauchs des Fahrzeugs und der täglichen Fahrleistung bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass Einflussfaktoren, welche auf deutschlandweiten oder jahresübergreifenden Mittelwerten basieren, ggf. differenziert werden müssen. Beispiele hierfür sind höhere Fahrleistungen in ländlicheren Gebieten und erhöhte Energieverbräuche der Fahrzeuge durch einen Heizbedarf im Winter.

- **Ladeverhalten**

Die Kategorie Ladeverhalten beschreibt, um welche Uhrzeit die Ladevorgänge starten und wie viel Reichweite beim Ladevorgang geladen wird. In der Literatur sind derzeit keine umfangreichen, speziell für die E-Mobilität erhobenen Daten vorhanden. Dennoch kann das Ladeverhalten durch geeignete Annahmen näherungsweise abgeschätzt werden, beispielsweise durch die Annahme, dass die Ankunftszeit am Zielort immer auch dem Startzeitpunkt eines Ladevorgangs entspricht. Ferner gehört in diese Kategorie die Frage, ob Ladepunkte regelmäßig von mehreren Fahrzeugen genutzt werden.

- **Wechselwirkung mit anderen Lasten**

Grundsätzlich werden Ladevorgänge im ungesteuerten Fall nicht durch andere Lasten beeinflusst. Für die Netzdimensionierung der unteren Spannungsebenen ist jedoch die zeitliche Überschneidung der Ladevorgänge und der sonstigen Lasten und hierbei insbesondere der Haushaltslast relevant. Neben der Erkenntnis, zu welcher Uhrzeit die Lastspitze der Ladevorgänge zu erwarten ist, ist deshalb auch die Tageszeit der Lastspitze von Haushalten und gewerblichen Stromverbrauchern entscheidend.

2.1.2 Betrachtete Datenquellen

Die Metastudie basiert auf einer Auswertung von 55 Studien, Reallaborergebnissen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Im Rahmen dieser Studie wird der Fokus darauf gelegt, die für die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen relevanten Informationen zusammenzutragen und diese in die genannten Themenbereiche zu bündeln.

Relevante Informationen zum Themenbereich Ladeinfrastruktur enthalten der „Leitfaden Netzintegration Elektromobilität“ (2) und die Studie „Agora Energiewende - Verteilnetzausbau für die Energiewende“ (3). Die Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ (4), in der 155.000 Haushalte zu ihrem alltäglichen Verkehrsverhalten befragt wurden, bietet unter anderem einen umfassenden Datensatz zum Verhalten von Fahrzeugnutzern und deren täglicher Fahrleistung. Zur Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs des Fahrzeugs wurden insbesondere Angaben von Fahrzeugherstellern ausgewertet. Für die Untersuchung der Wechselwirkung mit anderen Lasten wurde die Studie „Repräsentative VDEW-Lastprofile“ (5) verwendet.

Die Erkenntnisse zu allen Themenbereichen konnten anhand der in den verschiedenen Reallaboren dokumentierten Messungen und Angaben plausibilisiert werden. Dazu gehört unter anderem das Pilotprojekt „Die E-Mobility-Allee“ (6) der Netze BW, in dem über anderthalb Jahre das

Netznutzungsverhalten eines Kollektivs von zehn Elektrofahrzeugen in einem typischen Wohngebiet mit Eigenheimen, wie es häufig in Ballungsräumen vorkommt, beobachtet wurde.

2.2 Verwendete Datengrundlage

Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse und Daten in der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Systematisierung näher vorgestellt. Bei der Auswahl der konkret zu betrachtenden Daten ist zu beachten, welche der möglichen Einflussgrößen mit Blick auf Netzplanungszwecke valide quantifiziert werden können und über längere Zeiträume unverändert bleiben. Beispielsweise wird die Nennladeleistung eines Fahrzeugs, z. B. 2-phasig mit 7,4 kW oder 3-phasig mit 11 kW, Einfluss auf die resultierende Gleichzeitigkeit und Netzbelastung haben. Allerdings sind die Ladeleistungen fahrzeug- und teilweise sogar ausstattungspezifisch, sodass sich diese Aspekte möglicherweise für Netzplanungszwecke nicht sinnvoll als direkte Eingangsgröße berücksichtigen lassen. Daher sind für solche Größen plausible Durchschnittswerte oder Bandbreiten anzusetzen.

2.2.1 Ladeinfrastruktur

Im Mittelpunkt der Studie steht die Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren an privaten Ladepunkten. Deshalb werden im Weiteren keine Schnellladestationen, Betriebshöfe von Bussen und Flottenfahrzeugen, Carsharing-Ladestationen oder öffentliche Ladesäulen berücksichtigt. Bei großen Firmenparkplätzen ist ohnehin davon auszugehen, dass ein Lademanagement zum Einsatz kommt, um die Anschlussleistung zu begrenzen. Bei den privaten Ladepunkten wird in dieser Studie zwischen Ladepunkten in Wohngebieten und Gewerbegebieten unterschieden. Eine Differenzierung zwischen diesen beiden Kategorien ist notwendig, da sich hierbei die Tageszeiten, in denen die maximale Gleichzeitigkeit auftritt, und damit die zeitlichen Korrelationen mit weiteren Lasten voneinander unterscheiden. Wird das Fahrzeug nach der Ankunft am Zielort geladen, ist eine hohe Gleichzeitigkeit in Gewerbegebieten morgens und in Wohngebieten am späten Nachmittag oder abends zu erwarten.

Für die Netzdimensionierung ist nicht allein die Höhe der Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen, sondern der aus der Gleichzeitigkeit und spezifischen Ladeleistung resultierende Leistungsbeitrag entscheidend. Die typische Anschlussleistung für Heimpladepunkte liegt zwischen 3,7 und 22 kW. Während das 1-phasige Laden mit 3,7 kW heute bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen verbreitet ist, ist bei (rein) batterieelektrischen Fahrzeugen davon auszugehen, dass diese, zumindest in der sehr nahen Zukunft, überwiegend 3-phasig mit einer Ladeleistung von mindestens 11 kW geladen werden. Zum Teil werden heute auch private Ladepunkte mit einer Ladeleistung von 22 kW errichtet. Ladeleistungen über 22 kW werden in dieser Studie nicht berücksichtigt, da diese überwiegend für die Langstreckenmobilität eingesetzt werden und daher für die Betrachtung von Heimpladepunkten nicht relevant sind. Ebenso wird in der Studie nicht unterschieden, ob es sich um AC- oder DC-Ladeinfrastruktur handelt, da für die Ermittlung von Gleichzeitigkeiten und Leistungsbeiträgen nur die Höhe der Ladeleistung entscheidend ist. Darüber hinaus werden private Heimpladepunkte heute aus Kostengründen praktisch ausschließlich in Wechselstromtechnik ausgeführt.

Während eines Ladevorgangs wird die Bemessungsleistung des Ladepunktes in der Regel nicht durchgehend abgerufen. Jedes Fahrzeugmodell weist hier seine eigene spezifische Ladekurve auf, die die maximal mögliche Ladeleistung in Abhängigkeit vom aktuellen Ladezustand (State of Charge, SOC) des Elektrofahrzeugs definiert. Diese Ladecharakteristik des Elektrofahrzeugs hängt von mehreren Einflussfaktoren ab. Dazu gehören die Ladeleistung, die Anzahl der verwendeten Phasen, das Ladeverfahren, die Temperatur der Batterie, die Batteriekapazität und der aktuelle SOC. In der Leistungskategorie der Heimplader wird in der Regel davon ausgegangen, dass bis zu einem SOC von 80 % mit voller Ladeleistung geladen werden kann. Eine hohe Batteriekapazität macht in der Regel ein längeres Laden mit maximaler Ladeleistung möglich. Vor dem Hintergrund, dass in Zukunft mit steigenden

Batteriekapazitäten der Fahrzeuge gerechnet wird, ist in den Simulationen vereinfacht ein Ladevorgang mit durchgängiger Bemessungsleistung modelliert.

2.2.2 Ladeenergiebedarf

Der Ladeenergiebedarf wird durch die Fahrleistung (in km) und den spezifischen Energieverbrauch des Fahrzeugs (in kWh/100 km) bestimmt. Die Literaturlauswertung zeigt, dass sowohl der Energieverbrauch als auch die Fahrleistung mit zunehmender Bevölkerungsdichte des Wohnorts abnehmen. Somit kann festgehalten werden, dass der Wohnort des Fahrzeughalters den Ladeenergiebedarf beeinflusst. Weiter werden in der Netzplanung, aufgrund der unterschiedlichen Siedlungsstruktur und Charakteristika der Netze, ebenfalls vielfach Gebietstypen unterschieden, sodass eine Differenzierung auch im Rahmen dieser Untersuchung sinnvoll erscheint.

Die Daten der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ (4) liegen aufgeschlüsselt nach fünf regionalstatistischen Gemeindetypen vor. Im Rahmen dieser Studie werden Daten der Gemeindetypen Metropole (Gebietstyp „großstädtisch“), zentrale Stadt, Mittelstadt (Gebietstyp „vorstädtisch“) und kleinstädtischer, dörflicher Raum (Gebietstyp „dörflich“) verwendet, da sich hier die Fahrleistungen hinreichend stark voneinander unterscheiden.

In Bild 1 ist die Verteilung der Gesamtwegstrecke eines Tages für die Wochentage Montag bis Freitag je PKW nach den oben beschriebenen Gebietstypen städtisch, vorstädtisch und dörflich dargestellt. Die Daten der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ (4) wurden für die Simulation auf die auf der x-Achse dargestellten Werte diskretisiert. Die durchschnittliche Tageswegstrecke eines PKW in einem städtischen Gebiet beträgt somit ca. 31 km, im vorstädtischen Gebiet 38 km und im dörflichen Gebiet 42 km.

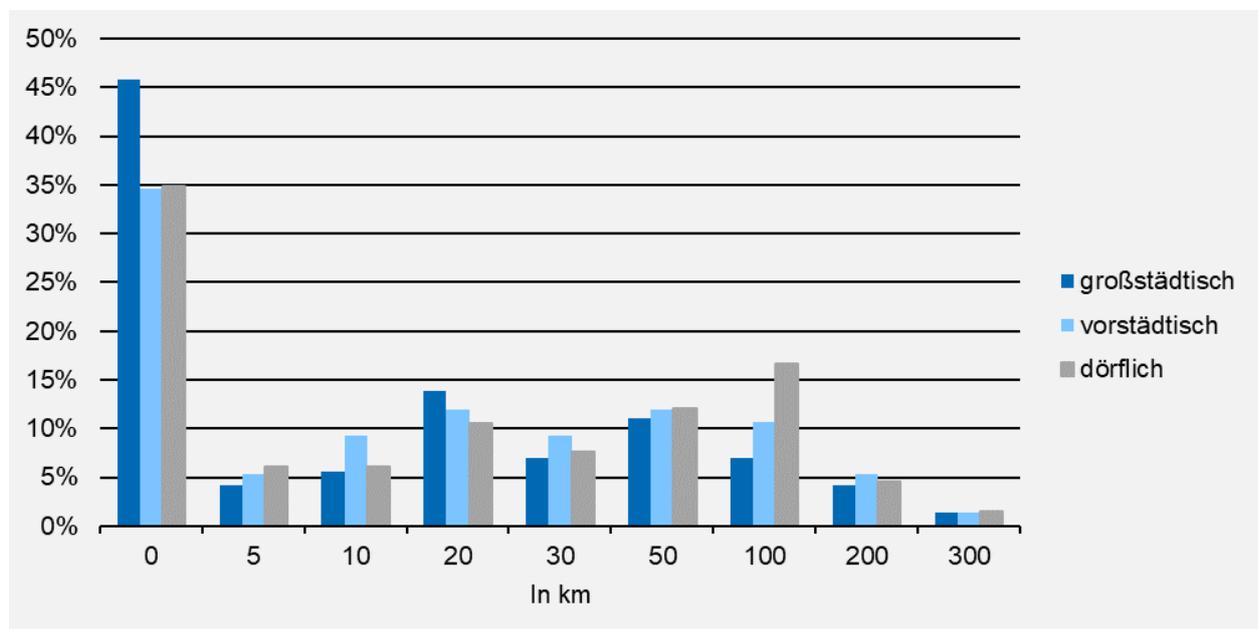


Bild 1: Verteilung der Gesamtwegstrecke je PKW und Tag nach Gebietstypen

Der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge wird anhand von Herstellerangaben auf Basis einer Vielzahl unterschiedlicher Elektrofahrzeugmodelle bestimmt. Bei Elektrofahrzeugen steigt der Verbrauch je zurückgelegtem Kilometer mit steigender Geschwindigkeit deutlich an, gleichzeitig kann bei im Stadtverkehr häufig stattfindenden Bremsvorgängen Energie zurückgewonnen werden. Dadurch ergeben sich in ländlicheren Gebieten, in denen häufigere Überlandfahrten und geringere Stadtverkehrsanteile unterstellt werden, höhere und in städtischen Gebieten entsprechend niedrigere Energieverbräuche. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei niedrigen oder hohen Temperaturen die Klimatisierung der

Fahrzeuge zu einem höheren Energieverbrauch führt. Um dem temperaturbedingten Mehrverbrauch Rechnung zu tragen und die in der Praxis auftretenden Gleichzeitigkeiten nicht zu unterschätzen, werden die aus den Herstellerangaben abgeleiteten durchschnittlichen gebietsabhängigen spezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge jeweils um 4 kWh/100 km nach oben korrigiert. Damit werden im Sinne einer Abschätzung nach oben im Rahmen dieser Studie für den Energieverbrauch in großstädtischen Gebieten 20 kWh/100 km, in vorstädtischen Gebieten 24 kWh/100 km und in dörflichen Gebieten 28 kWh/100 km angesetzt.

2.2.3 Ladeverhalten

Für die Höhe der Gleichzeitigkeit sind insbesondere die Verteilung der Startzeitpunkte der Ladevorgänge über den Tagesverlauf und die Dauer der Ladevorgänge entscheidend. Im Rahmen dieser Studie werden unter dem Begriff Ladeverhalten deshalb zwei Aspekte berücksichtigt, nämlich zum einen die Uhrzeit, zu der Ladevorgänge gestartet werden, zum anderen die Häufigkeit der Ladevorgänge. Die nachzuladende Reichweite und somit die Dauer der Ladevorgänge erhöhen sich, je seltener ein Fahrzeug geladen wird.

Auf die Verteilung der Startzeitpunkte der Ladevorgänge kann durch die stündliche Ankunfts-wahrscheinlichkeitsverteilung geschlossen werden, wenn davon ausgegangen wird, dass der Ladevorgang unmittelbar nach der Ankunft des Fahrzeuges am Wohnort oder Arbeitsplatz beginnt. Ankunfts-wahrscheinlichkeiten an Wohnort und Arbeitsstelle können dem Datensatz der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ (4) entnommen werden. Die in der vorliegenden Untersuchung genutzten Verteilungen sind in Bild 2 dargestellt. In blau dargestellt ist die stündliche Ankunfts-wahrscheinlichkeit unter der Woche am Wohnort. Analog dazu ist die Ankunfts-wahrscheinlichkeit am Arbeitsplatz, die für die Gleichzeitigkeit in Gewerbegebieten relevant ist, in türkis abgebildet. Diese ist erwartungsgemäß in den Morgenstunden mit Beginn der Arbeitszeiten am höchsten, wohingegen sich die Ankunft am Wohnort auf die späten Nachmittags- und frühen Abendstunden konzentriert. Da die höchsten zu erwartende Gleichzeitigkeiten bei einer konzentrierten Ankunftszeitverteilung auftreten, werden nachfolgend nur die Tage von Montag bis Freitag berücksichtigt. Durch die weniger einheitlichen Tagesabläufe der Fahrzeugnutzer an Samstagen und Sonntagen sind die Ankunftszeitverteilungen an diesen Tagen weniger konzentriert.

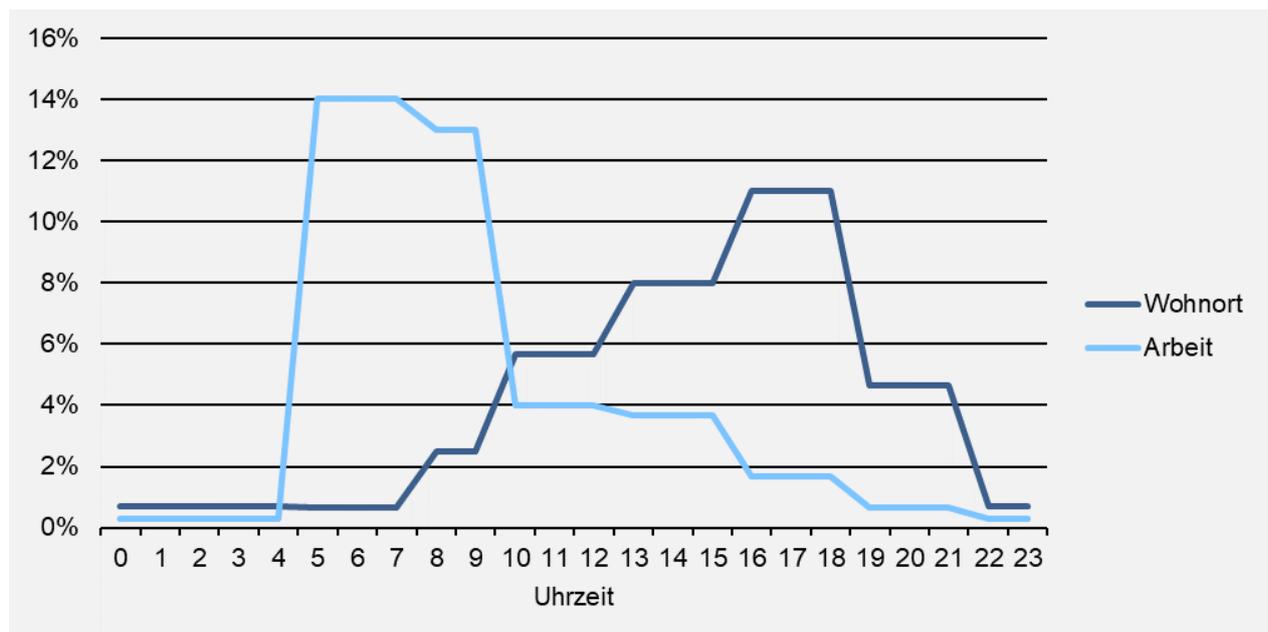


Bild 2: Stündliche Ankunfts-wahrscheinlichkeiten differenziert nach Wohnort und Arbeitsort für Wochentage (Montag - Freitag)

In einer Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich ein weiteres Nutzerverhalten in Bezug auf den Start von Ladevorgängen untersucht. Dabei wird angenommen, dass Ladevorgänge am Wohnort nicht mit der Ankunft beginnen, sondern auf die Zeit vor der Abfahrt gelegt werden. Der Ladevorgang wird derart gestartet, dass das Fahrzeug bei Abfahrt vollständig geladen ist. Für die Bestimmung des Abfahrtszeitpunkts wird ebenfalls der Datensatz der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ (4) verwendet. Berücksichtigt werden Abfahrtszeitpunkte von Wegen unter der Woche mit dem Weg-Ziel „Arbeit“. Die entsprechende Verteilung ist in Bild 3 dargestellt. Im Vergleich zu der Verteilung der Ankunftszeiten erfolgen die Abfahrten in einem kürzeren Zeitintervall, sodass die Verteilung der Abfahrtszeiten konzentrierter ist als die der Ankunftszeiten.

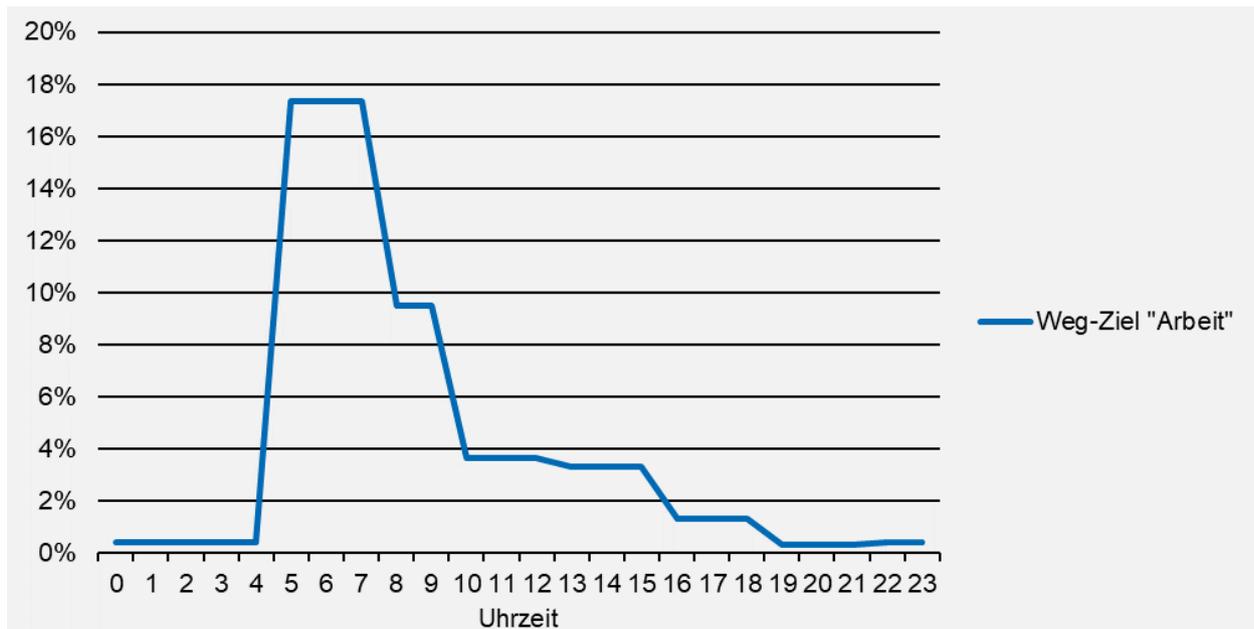


Bild 3: Stündliche Abfahrtswahrscheinlichkeiten für das Weg-Ziel „Arbeit“ an Wochentagen (Montag - Freitag)

Die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen wird neben der Verteilung der Ankünfte über den Tagesverlauf und damit dem Start der Ladevorgänge auch von der Dauer der Ladevorgänge entscheidend beeinflusst. Diese wird aus dem in Abschnitt 2.2.2 abgeleiteten täglichen Ladeenergiebedarf und der Häufigkeit des Nachladens bestimmt. Unter dem Ladeverhalten „Laden“ wird im Folgenden ein tägliches Nachladen der zurückgelegten Reichweite verstanden. Das Ladeverhalten „Tanken“ hingegen beschreibt ein Nachladen nach einer bestimmten Summe zurückgelegter Tagesstrecken – mit heute üblichen Batteriegrößen sind Strecken zwischen 100 km und 300 km einigermaßen sicher zurücklegbar, sodass anders als zuvor Ladevorgänge je Fahrzeug nicht mehr täglich, sondern erst nach einigen Tagen stattfinden. In Bild 4 sind die Verteilungen der Strecken, die nach dem Ansteckvorgang nachgeladen werden, für ein vorstädtisches Gebiet dargestellt. Beide Varianten des Ladeverhaltens weisen eine identische durchschnittliche Fahrleistung von 38 km pro Tag auf. Jedoch ist der Anteil von nachgeladenen Strecken von über 200 km bei der Variante „Tanken“ deutlich höher als bei der Variante „Laden“. Um bei beiden Varianten eine identische Durchschnittsfahrleistung zu erhalten, findet bei der Variante „Tanken“ bei einem größeren Anteil von Fahrzeugen kein Ladevorgang statt (gut 80 % statt gut 30 %). Die beiden Varianten bilden sehr unterschiedliche Verhaltensweisen ab, die die Eckpunkte der real zu erwartenden Verhaltensweisen repräsentieren dürften. In der Praxis wird sich somit sehr wahrscheinlich eine Mischung aus beiden Verhaltensweisen ergeben.

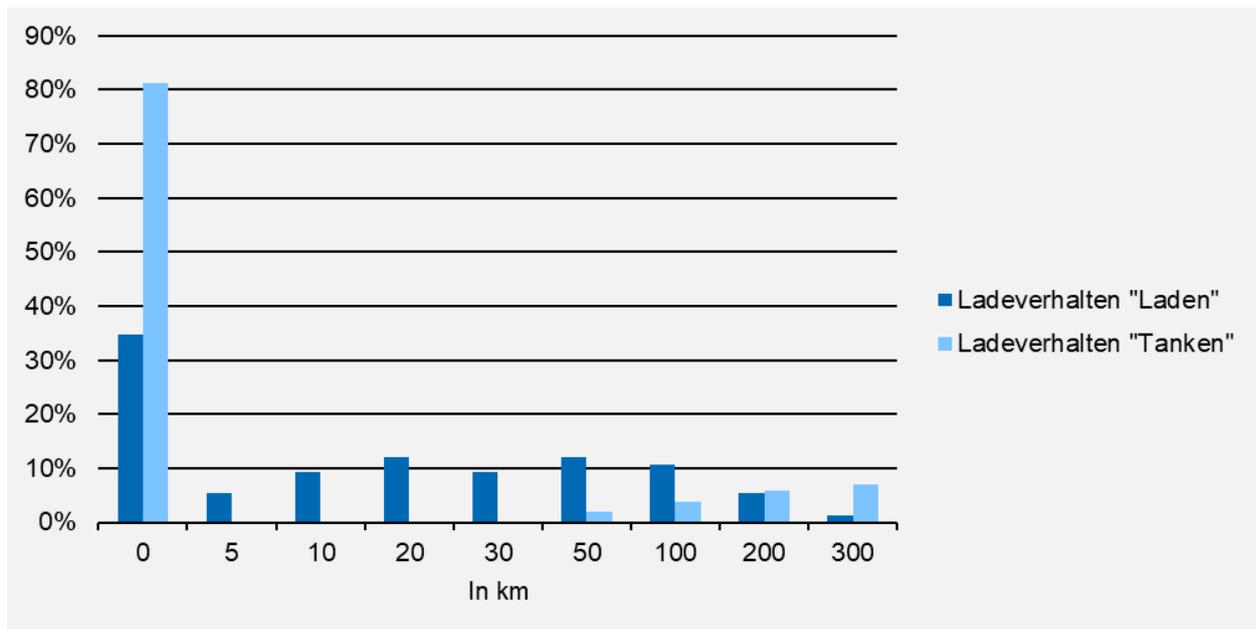


Bild 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung der am Tag nachgeladenen Strecke bei den Varianten „Laden“ und „Tanken“ für das Ladeverhalten

Die meisten der zuvor diskutierten Parameter beziehen sich jeweils auf ein einzelnes Fahrzeug, das an einem einzigen diesem Fahrzeug zugeordneten Ladepunkt lädt. Mit zunehmender Durchdringung von Elektrofahrzeugen ist allerdings zu erwarten, dass je Haushalt mit Heimpladeinfrastruktur durchschnittlich mehr als ein Elektrofahrzeug vorhanden ist. Entweder ist dann für jedes Fahrzeug ein eigener Ladepunkt installiert oder die Fahrzeuge müssen sich einen Ladepunkt teilen. Der Fall, dass für jedes Fahrzeug ein eigener Ladepunkt installiert ist, wird durch die für diese Studie gewählte Parametrierung abgedeckt. Sofern sich Fahrzeuge einen Ladepunkt teilen, kann die Ladedauer je Ladepunkt steigen, wodurch auch die Wahrscheinlichkeit für sich überlagernde Ladevorgänge und damit – bezogen auf die Zahl und Leistung der Ladepunkte – die Gleichzeitigkeit zunehmen. Derzeit ist in den großstädtischen und vorstädtischen Gebietstypen in mehr als 70 % und in dörflichen in mehr als 60 % der Haushalte nur ein Fahrzeug vorhanden. Zudem ist in naher Zukunft nicht mit einer so hohen Durchdringung von Elektrofahrzeugen zu rechnen, dass sich in einem signifikanten Teil der Haushalte mehrere Elektrofahrzeuge einen Heimpladepunkt teilen. Eine Vernachlässigung des Beitrags zur Gleichzeitigkeit von Fahrzeugen, die sich einen Ladepunkt teilen, führt zwar tendenziell zu einer Unterschätzung der auf die Ladepunkte bezogenen Gleichzeitigkeit. Angesichts des in der nahen Zukunft unbedeutenden Umfangs sind jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse zu erwarten. Aus diesen Gründen wird dieser Aspekt in der Studie nicht weiter betrachtet.

2.2.4 Korrelation von Ladevorgängen mit anderen Lasten

Die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen untereinander hängt nicht von der Höhe anderer Lasten ab. Jedoch ist für die Netzdimensionierung neben der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge untereinander auch deren zeitliche Korrelation mit sonstigen Lasten relevant. Es ist davon auszugehen, dass die Ansteckvorgänge nach der Ankunft am Wohnort auch mit zeitlich nur kurz versetztem Einschalten sonstiger Verbraucher einhergehen. Dies lässt sich auch aus den Standardlastprofilen des VDEW schließen, bei denen die Zeitpunkte der Spitzenlast, sowohl für Haushalte als auch für das Gewerbe, mit den Zeitpunkten der maximalen Ankunftswahrscheinlichkeit übereinstimmen (Bild 5).

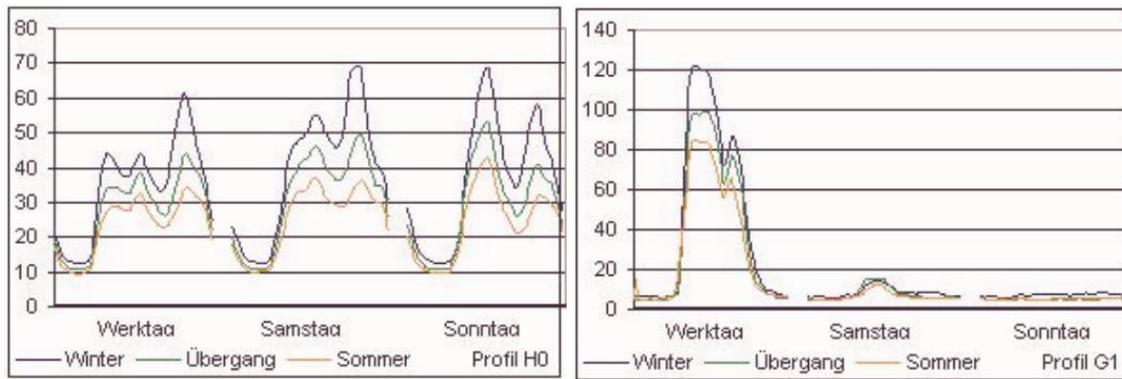


Bild 5: Standardlastprofile H0 Haushalt und G1 Gewerbe werktags 8-18h (Quelle: Repräsentative VDEW-Lastprofile, VDEW, 1999)

Bei Haushalten sind die Lastspitzen des Standardlastprofils am Wochenende höher als unter der Woche. Aufgrund der weniger konzentrierten Verteilung der Ankunftszeiten am Wochenende ist die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge an diesen Tagen jedoch als geringer einzuschätzen. Der Unterschied zwischen den Spitzenlasten am Wochenende und an den Wochentagen liegt bei den Standardlastprofilen bei ca. 10 %. Insbesondere bei einer hohen Durchdringung mit Heimpladepunkten wird die Abendspitze an den Tagen von Montag bis Freitag für das Netz dimensionierungsrelevant sein, da hier die höchste Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge und höchste resultierende Gesamtlast zu erwarten sind. Für die Netzdimensionierung ist somit, als konservative Abschätzung, die Summe aus bisheriger Lastspitze und maximalem Lastbeitrag der Ladepunkte anzusetzen. Dies gilt für die Annahme, dass der Startzeitpunkt der Ladevorgänge mit der Ankunft am Wohnort zusammenfällt und folglich die Lastspitze der Ladevorgänge in den späten Nachmittags- oder frühen Abendstunden entsteht.

Eine Verschiebung der Ladevorgänge aus den Abend- in die Nachtstunden kann die netzdimensionierungsrelevante Last verringern. Insbesondere bei einer 3-phasigen Ladeinfrastruktur mit einer Ladeleistung von mindestens 11 kW ist grundsätzlich vorstellbar, dass durch ungünstige zeitliche Synchronisation von Ladevorgängen in Verbindung mit einer hohen Durchdringung von Elektrofahrzeugen die Ladeleistung auch ohne sonstige Last dimensionierungsrelevant werden kann. Daher werden nachfolgend hierzu Sensitivitätsrechnungen durchgeführt.

In Gewerbegebieten korreliert der Lastbeitrag, der sich aus der Ladeleistung und der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge ergibt, zeitlich mit der sonstigen Last, da sowohl bei den Ladevorgängen als auch bei der sonstigen Last die Lastspitze morgens zu erwarten ist. Dies ist bei der Netzauslegung entsprechend zu berücksichtigen.

2.3 Validierung der Eingangsdaten anhand von Messwerten

Eine wesentliche Annahme, auf der die Berechnungen der Gleichzeitigkeiten beruhen, besteht darin, dass Ladevorgänge unmittelbar mit der Ankunftszeit beginnen. Angaben zur Verteilung von Ankunftszeiten über den Tag liegen zwar aus der Literatur- und Studienrecherche vor; die Studien enthalten aber keine Aussagen zu Ladevorgängen. Um diese und weitere wesentliche Annahmen überprüfen zu können, konnten im Rahmen der Studien reale Messdaten von Ladevorgängen an über 1.200 Ladepunkten ausgewertet werden, die die SMA Solar Technology AG für diese Studie freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

Die Daten beinhalten Leistungszeitreihen von Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen im Zeitraum Mai 2020 bis Februar 2021. Neben den Messwerten der Ladevorgänge sind auch Zeitreihen der PV-Erzeugung, des Netzbezugs und der Nutzung ggf. vorhandener Heimspeicher an den jeweiligen Standorten enthalten.

Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass die Systemlösung von SMA darauf ausgerichtet ist, in der PV-Anlage erzeugten Strom möglichst selbst zu verbrauchen und nicht in das Netz der öffentlichen Versorgung einzuspeisen, sodass an sonnigen Tagen Elektrofahrzeuge bevorzugt zur Mittagszeit mit PV-Strom geladen werden, wenn sie sich zu Hause befinden. Zudem ist davon auszugehen, dass die Daten für diesen Zeitraum Effekten aufgrund der Coronavirus-Pandemie unterliegen. Beispielsweise könnten die gefahrenen Gesamtstrecken in diesem Zeitraum niedriger liegen als in früheren Zeiträumen. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass die nachfolgend dargestellten Auswertung hierdurch signifikant verzerrt sind. Daher können die auf Basis dieser Daten gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen der Studie genutzt werden.

Die Verteilung der Startpunkte der Ladevorgänge ist einer der zentralen Einflussfaktoren bei der Bestimmung der Gleichzeitigkeit. Wie bereits erläutert, sind die Ladevorgänge jedoch zumindest an Tagen mit nennenswerter solarer Einstrahlung durch die PV-Erzeugung beeinflusst. In den Messwerten ist daher an diesen Tagen eine Spitze der Summenlast zur Mittagszeit erkennbar. An Tagen mit geringer oder keiner solaren Eigenerzeugung tritt dieser Einfluss jedoch nicht auf. Werden die Zeiträume der Ladevorgänge ausschließlich an Tagen mit geringer PV-Erzeugung ausgewertet, so ergibt sich ein zeitliches Ladeprofil, das sehr gut mit den Erkenntnissen zur Verteilung der Ankunftszeiten übereinstimmt.

Eine weitere grundlegende Annahme besteht darin, dass Ladevorgänge nicht mit einzelnen Wochentagen korreliert sind, dass also beispielsweise auch an Freitagabenden, vor langen Wochenenden und vor dem Ferienbeginn keine signifikant erhöhte Ladetätigkeit auftritt. Wenn derartige Korrelationen vorlägen, könnten sich an solchen Tagen erhöhte Gleichzeitigkeiten ergeben. Die Auswertung der Messwerte, die auch Feiertage und verlängerte Wochenenden abdecken, bestätigt jedoch, dass die Ladevorgänge an den Wochentagen Montag bis Freitag annähernd gleichverteilt sind und somit die o. g. Annahme zulässig ist.

Darüber hinaus konnte die Verteilung der an Heimpladepunkten tatsächlich abgerufenen Ladeleistungen ausgewertet werden. Die Messwerte deuten bei ca. 40 % der Ladepunkte auf eine Ladeleistung des Elektrofahrzeugs von 11 kW hin. Der Anteil der Ladepunkte, an denen Fahrzeuge mit einer Ladeleistung von 3,7 kW laden, beträgt ca. 25 % und der Anteil der Ladepunkte, an denen eine Ladeleistung von 7,4 kW abgerufen wird, 30 %. Der Anteil der Ladepunkte, deren Messwerte auf eine Ladeleistung des angeschlossenen Fahrzeugs von 22 kW schließen lassen, liegt mit ca. 5 % am niedrigsten. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig E-Fahrzeuge überwiegend dreiphasig mit mindestens 11 kW an Heimpladepunkten geladen werden. In dieser Studie wird eine Ladeleistung von 7,4 kW nicht berücksichtigt, da für die Abschätzung der Sensitivität einer geringeren Ladeleistung eine Ladeleistung von 3,7 kW als ausreichend erachtet wird.

2.4 Simulationsmethodik

In dieser Studie soll anhand von Simulationen rechnerisch ermittelt werden, welche Gleichzeitigkeiten bei Ladevorgängen zu erwarten sind und welche quantitative Relevanz die verschiedenen teilweise mit Unsicherheiten behafteten Einflussfaktoren hierbei haben. Die Simulationsmethodik muss hierfür in der Lage sein, alle potenziellen Einflüsse (siehe Abschnitt 2.2) zu berücksichtigen. Analytisch ist die Bestimmung der Gleichzeitigkeiten nur mit großem Aufwand lösbar. Deshalb wird im Rahmen dieser Studie ein stochastisches Verfahren, die Monte-Carlo Simulation, verwendet. Bei der Monte-Carlo Simulation werden die relevanten Eingangsgrößen auf Basis von Verteilungsfunktionen durch einen Zufallsgenerator gezogen und für jede Ziehung die Simulationsergebnisse bestimmt. Durch eine große Anzahl an Ziehungen und Simulationsschritten können auf diese Weise die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Ergebnisgrößen, hier also der Gleichzeitigkeiten, bestimmt werden. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden schrittweise näher beschrieben.

Der simulativ zu bestimmende Gleichzeitigkeitsfaktor ist mathematisch das Verhältnis aus zu einem bestimmten Zeitpunkt stattfindenden Ladevorgängen und der maximal möglichen Anzahl an Ladevorgängen. Um zu ermitteln, wann Ladevorgänge stattfinden, wird zunächst aus der Verteilung der Ankunftszeiten ein Wert gezogen, ab dem der Ladevorgang beginnt. Die Länge des Ladevorgangs ergibt sich aus der nachzuladenden Wegstrecke, die ebenfalls aus einer Verteilungsfunktion gezogen wird, sowie dem spezifischen Energieverbrauch des Fahrzeugs und der Leistung des Ladepunkts, die jeweils als fester Wert vorgegeben werden. Dieses Vorgehen wird für die Anzahl der betrachteten Ladepunkte, z. B. 10, wiederholt. Für jeden Ladepunkt ergibt sich so ein zeitabhängiges Ladeprofil. Anschließend werden diese Ladeprofile überlagert, sodass das Maximum zeitgleicher Ladevorgänge bestimmt werden kann. Exemplarisch sind in Bild 6 die Überlagerung von Ladeprofilen für 10, 50 und 150 Ladepunkte eines Simulationslaufs für einen vorstädtischen Gebietstyp und eine Ladeleistung von 11 kW dargestellt. Bei einer Gesamtanzahl von 150 Ladepunkten werden in dem dargestellten Simulationslauf maximal 16 Ladepunkte gleichzeitig benutzt. Dementsprechend beträgt die maximale Gleichzeitigkeit in diesem Beispiel 0,11 (16/150).

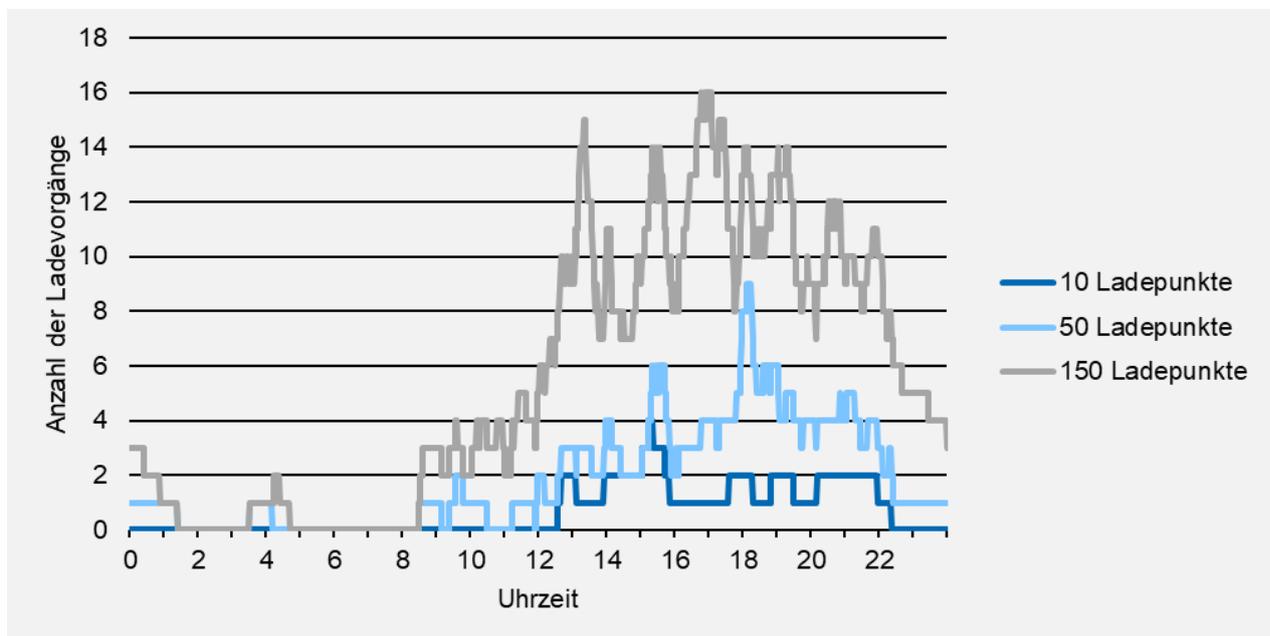


Bild 6: Beispielhaftes Ergebnis eines Simulationslaufs für vorstädtischen Gebietstyp und Ladeleistung 11 kW: Aggregierte Lastprofile von unterschiedlich großen Ladepunkt-Kollektiven

Um aus den Verteilungsfunktionen hinreichend viele Parameterkombinationen zu betrachten, müssen die Simulationsdurchläufe ausreichend oft wiederholt werden. In dieser Studie werden für jede Untersuchungsvariante 36.500 Simulationen für jede betrachtete Anzahl an Ladepunkten durchgeführt, was rechnerisch einem Simulationszeitraum von 100 Jahren entspricht. Eine beispielhafte, sich daraus ergebende Wahrscheinlichkeitsverteilung der in einem Durchlauf mit 36.500 Simulationen ermittelten maximalen Gleichzeitigkeit für 10 und 150 Ladepunkte ist für einen vorstädtischen Gebietstyp und eine Ladeleistung von 11 kW in Bild 7 dargestellt.

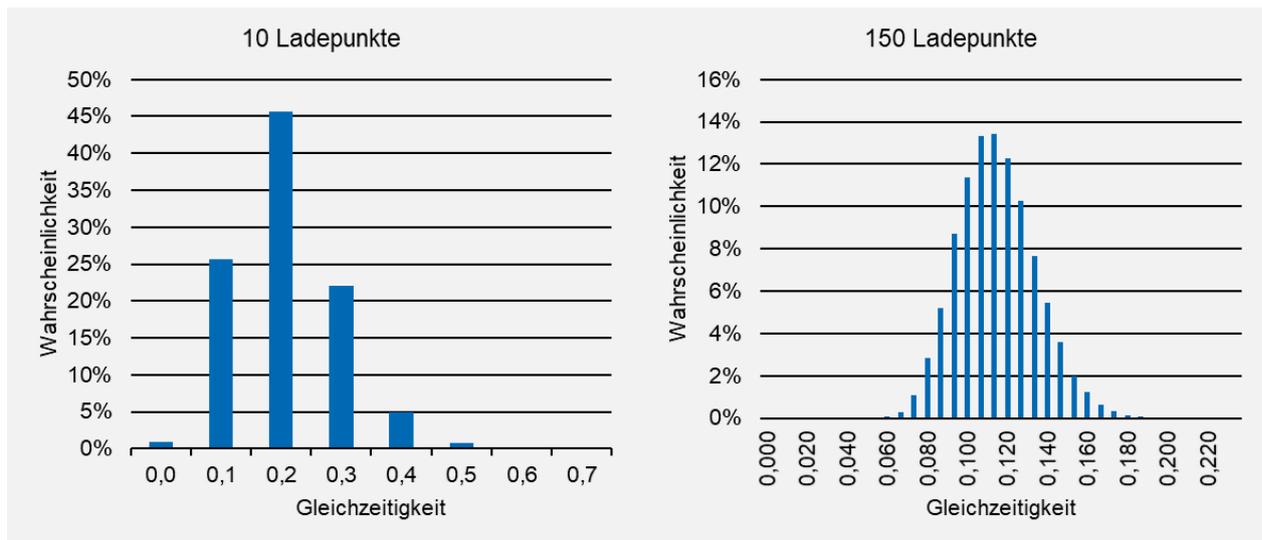


Bild 7: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gleichzeitigkeit für 10 und 150 Ladepunkte bei vorstädtischem Gebietstyp und Ladeleistung 11 kW

Die grafische Darstellung dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt, dass die Simulation auch Gleichzeitigkeiten ermittelt, die nur sehr selten auftreten. Mit steigender Zahl der Simulationsdurchläufe werden somit auch Ereignisse mit immer weiter sinkender Restwahrscheinlichkeit erfasst. Würde der maximal in der Simulation auftretende Gleichzeitigkeitswert, der methodenbedingt bei einer gegen unendlich gehenden Anzahl von Ziehungen gegen eins strebt, für die Netzdimensionierung verwendet, so würde das Netz auf sehr selten auftretende Belastungszustände ausgelegt. Darüber hinaus besteht bei Durchführung einer endlichen Zahl von Ziehungen eine gewisse Restwahrscheinlichkeit, dass in der Praxis Wertekombinationen auftreten, die durch die Verteilungen nicht abgedeckt sind. Somit könnten, wenn auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit, vereinzelt Gleichzeitigkeiten oberhalb der in der Simulation auftretenden Maximalwerte erreicht werden. Falls sichergestellt werden sollte, dass jederzeit beliebig viele Ladevorgänge durchgeführt werden können, müssten die Netze zwangsläufig auf eine Gleichzeitigkeit von 1 ausgelegt werden, d. h. auf die Möglichkeit eines gleichzeitigen Volllastbetriebs aller (perspektivisch) in einem Netzbereich befindlichen Ladepunkte.

Dies würde aber nicht nur einen erheblichen Investitionsaufwand verursachen, sondern auch der üblichen Praxis der Netzdimensionierung im Bereich der unteren Verteilnetzebenen widersprechen. Es ist nämlich üblich, gemäß standardisierter Netzplanungsgrundsätze bei der Netzdimensionierung spezifische Leistungswerte von z. B. einigen wenigen kW pro Wohneinheit heranzuziehen, die systematisch – und mit zunehmender Kollektivgröße zunehmend weit – unter den maximalen Bezugsleistungen der einzelnen Wohneinheiten liegen. Auch diese Praxis beruht auf Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, bei denen akzeptiert wird, dass – mit hinreichend niedriger Wahrscheinlichkeit – vereinzelt Netzbelastungen auftreten können, die die Nennbelastbarkeit der Betriebsmittel überschreiten und ggf. sogar Schutzauslösungen und Versorgungsunterbrechungen zur Folge haben können. Analog zu dieser üblichen und akzeptierten Praxis erfordert daher auch die Festlegung von Gleichzeitigkeitsansätzen für Ladevorgänge die Festlegung eines Grenzwerts, ab dem das Risiko des Auftretens höherer Gleichzeitigkeiten als hinreichend gering und somit hinnehmbar angesehen wird.

Im Rahmen dieser Studie wurde festgelegt, dass Gleichzeitigkeiten, die in weniger als 100 der durchgeführten 36.500 Simulationen auftreten, nicht zu berücksichtigen sind. Dies bedeutet, dass statistisch einmal pro Jahr eine Gleichzeitigkeit auftreten kann, die über der als Ergebnis jeweils dargestellten Gleichzeitigkeit liegt. Es ist allerdings zu beachten, dass in einer solchen Situation keineswegs zwingend eine Netzüberlastung auftritt, da hierfür u. a. auch das Zusammenspiel mit der

sonstigen Last maßgeblich ist. Eine detaillierte Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt zudem, dass Überschreitungen des zuvor genannten Grenzwerts im Allgemeinen weniger als eine Stunde anhalten. Solche Überschreitungen hätten aufgrund der thermischen Trägheit der Sicherungen und Betriebsmittel in der Regel keine Versorgungsunterbrechung zur Folge. Die Vernachlässigung der 100 größten in der Simulation auftretenden Gleichzeitigkeitswerte erscheint daher zur Gewinnung eines praxisgerechten planerischen Ansatzes in Analogie zur heutigen Netzplanungspraxis geeignet.

Abweichend hiervon wird bei kleinen Kollektiven mit bis zu 10 Ladepunkten nur eine Wahrscheinlichkeit einer einmal in 10 Jahren auftretenden Überschreitung des für die Planung verwendeten Gleichzeitigkeitsfaktors zugelassen. Bei kleineren Kollektiven ist die Wahrscheinlichkeit einer Unterschätzung der Gleichzeitigkeitsfaktoren systematisch höher, da die Nutzerverhalten weniger stark durchmischt sind als in großen Kollektiven.

In Bild 8 ist an dieser Stelle zunächst beispielhaft dargestellt, welche Verläufe der Gleichzeitigkeiten und Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl der Ladepunkte sich auf Basis dieser Simulationsmethodik für einen vorstädtischen Gebietstyp und eine Ladeleistung von 11 kW ergeben. Die vollständigen Ergebnisse für die in dieser Studie betrachteten Parameterkombinationen werden in Kapitel 3 dargestellt und ausgewertet.

Durch die Ganzzahligkeit der Ladevorgänge ergibt sich, wie im linken Teil erkennbar, ein Sägezahnmuster im Verlauf der Gleichzeitigkeiten. Der monoton steigende Verlauf des Leistungsbeitrags im rechten Teil ergibt sich aus dem Produkt der Gleichzeitigkeiten und einer Ladeleistung je Ladepunkt von (in diesem Beispiel) 11 kW.

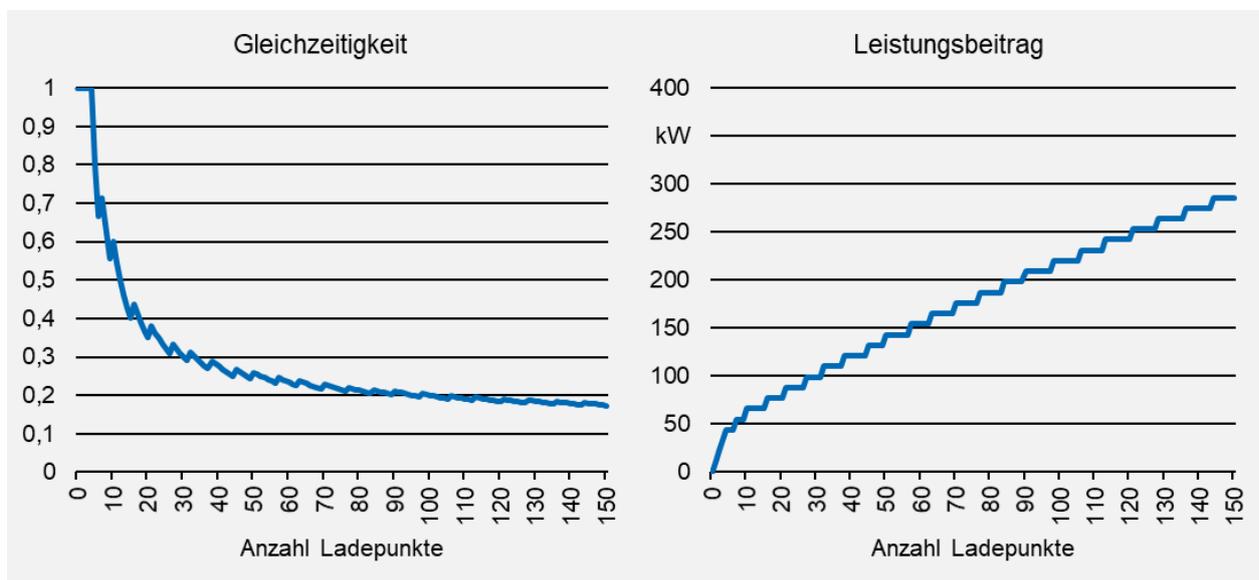


Bild 8: Beispielhafter Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte für einen vorstädtischen Gebietstyp und eine Ladeleistung von 11 kW

2.5 Untersuchungskonzept für Simulationsrechnungen und Sensitivitäten

Wie die Vielzahl der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Einflussfaktoren und der sich hieraus ergebenden Parametervariationen zeigt, würde bei vollständiger Permutation aller Einflussgrößen eine sehr große Zahl von Simulationsergebnissen entstehen, die eine Identifikation der wesentlichen Ergebnisse und Zusammenhänge erschwert. Insofern kommt der geeigneten Verdichtung der Ergebnisse eine hohe Bedeutung zu. Hierzu werden die Simulationsergebnisse daraufhin analysiert, wie stark sich die Variation des jeweils betrachteten Einflussfaktors auf die Ergebnisse auswirkt. Für die spätere Berücksichtigung in der zu entwickelnden Planungshilfe werden nur Einflussfaktoren mit hinreichend starkem Einfluss ausgewählt. Zudem wird berücksichtigt, dass manche Einflussgrößen miteinander in Verbindung stehen, wie z. B. die mittlere Tagesfahrstrecke und der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge, sodass eine Zusammenfassung einzelner Parameter zu Clustern sinnvoll ist. Naheliegende Cluster sind die zuvor vorgestellten Gebietstypen.

Um den Einfluss der Variation einzelner Parameter bestimmen zu können, wird zunächst ein geeigneter Arbeitspunkt als Basis-Variante definiert und bei jeder Simulationsrechnung nur eine Parametervariation vorgenommen. Grundsätzlich lassen sich die Einflussfaktoren in zwei Gruppen unterteilen, nämlich in solche, die die Ladedauer beeinflussen, und solche, die den Startzeitpunkt des Ladevorgangs beeinflussen. Zudem werden je nach Eigenschaft des Parameters dessen Wahrscheinlichkeitsverteilung oder nur dessen Wert angepasst.

3 Kernergebnisse der Simulationen

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Simulationsrechnungen dargestellt. Zunächst werden anhand eines Parametersatzes, der sogenannten Basis-Variante, grundlegende Zusammenhänge erläutert. Anschließend werden die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalysen vorgestellt.

3.1 Basis-Variante

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, sind für eine Simulationsrechnung eine Reihe unterschiedlicher Parameter zu besetzen. Insbesondere wirken die mittlere Tageswegstrecke, der spezifische Verbrauch des Elektrofahrzeugs, die Ladeleistung des Ladepunkts, das Ladeverhalten und das Tagesnutzungsprofil sowie die Größe des betrachteten Fahrzeugkollektivs auf die resultierende Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge. Da einzelne dieser Einflussgrößen über den Gebietstyp miteinander korreliert sind, werden für die betrachteten Gebietstypen jeweils konsistente Parametersätze verwendet. So sind z. B. in städtischen Gebieten die mittlere Tageswegstrecke und der spezifische Verbrauch im Durchschnitt deutlich geringer als in ländlichen Gebieten (s. Abschnitt 2.2.2).

Als Basis-Variante wird der Parametersatz eines vorstädtischen Gebietstyps verwendet, da die hierbei angesetzte mittlere Tageswegstrecke von 38 km (Bild 9) näherungsweise der durchschnittlichen täglichen Wegstrecke deutscher PKW entspricht (7).

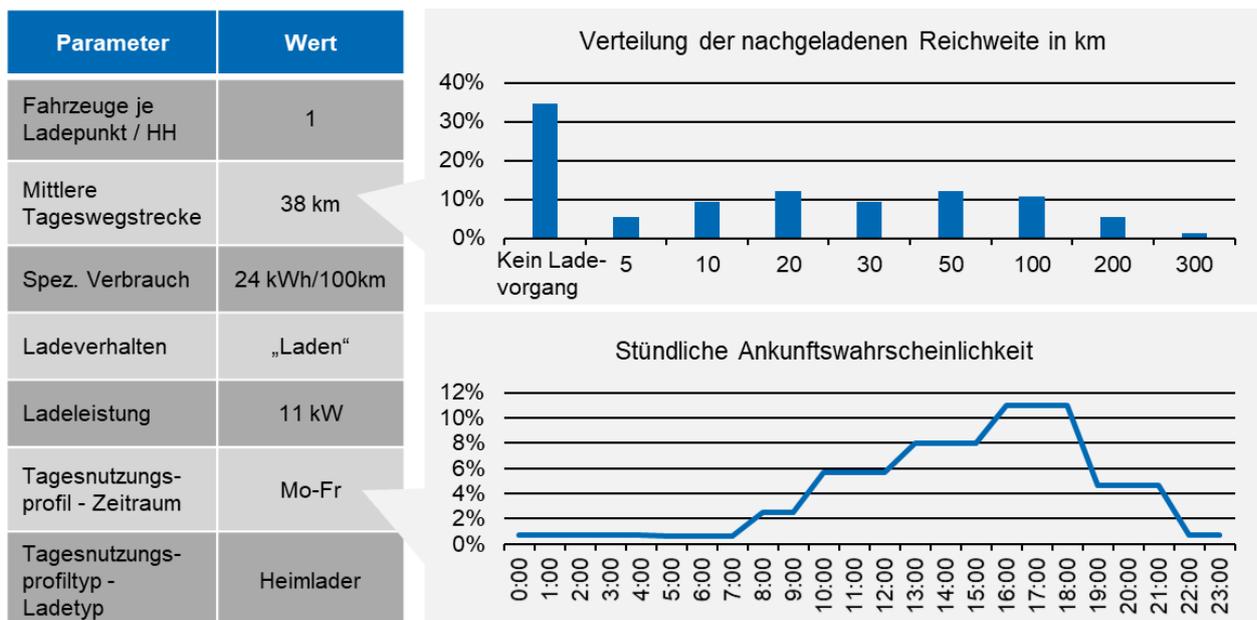


Bild 9: Gewählte Parametrierung in der Basis-Variante

In die einzelnen Iterationen der Simulation geht dabei nicht unmittelbar der Wert der mittleren Tageswegstrecke ein, sondern jeweils ein aus der Verteilung der Wegstrecken gezogener Wert, der in Verbindung mit dem spezifischen Verbrauch und der Ladeleistung des Ladepunkts die Ladedauer eines Fahrzeugs bestimmt. Die durchschnittliche Ladedauer beträgt in der Basis-Variante dementsprechend knapp 50 Minuten ($38 \text{ km} \cdot 24 \text{ kWh}/100 \text{ km} / 11 \text{ kW} \cdot 60 \text{ min}/\text{h}$). Ein Fahrzeug, das eine Tageswegstrecke von 100 km zurückgelegt hat, weist somit eine Ladedauer von gut 2 Stunden auf, und eines, das nur 10 km zurückgelegt hat, hingegen weniger als eine Viertelstunde.

Ob Ladevorgänge gleichzeitig stattfinden, hängt wiederum davon ab, zu welchem Zeitpunkt sie starten und wie lange sie dauern. Innerhalb eines Simulationslaufs werden für eine bestimmte Zahl von Ladepunkten Ziehungen des Ladebeginns und der Tageswegstrecke, die wie zuvor dargestellt die Ladedauer bestimmt, durchgeführt. Anschließend wird ausgewertet, wie viele der zu unterschiedlichen Zeitpunkten beginnenden und unterschiedlich lang andauernden Ladevorgänge zeitlich überlappen. Würden bei einer Kollektivgröße von 10 Ladepunkten beispielsweise 6 Ladevorgänge zumindest innerhalb einer Minute (Auflösung der Simulation, Abschnitt 2.4) überlappend stattfinden, ergäbe sich eine Gleichzeitigkeit von 0,6. Für jede Kollektivgröße, die in der vorliegenden Studie in der Regel jeweils zwischen 1 und 150 Ladepunkten variiert wird, werden 36.500 Ziehungen von Tageswegstrecken und Ladebeginn durchgeführt und daraus – unter Vernachlässigung von sehr selten auftretenden Extremfällen (Abschnitt 2.4) – das Maximum der aufgetretenen zeitlich überlappenden Ladevorgänge bestimmt.

Bei kleinen Kollektiven von unter fünf Ladepunkten muss mit hinreichender Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass innerhalb des Simulationszeitraums, zumindest kurzzeitig, alle Ladepunkte genutzt werden und sich ein Gleichzeitigkeitsfaktor von eins ergibt (Bild 10, linkes Diagramm). Mit zunehmender Kollektivgröße wird es jedoch immer unwahrscheinlicher, dass alle Ladepunkte des Kollektivs gleichzeitig aktiv sind, sodass der Gleichzeitigkeitsfaktor anfänglich sehr schnell, mit zunehmender Ladepunktzahl langsamer abnimmt. Bei einer Kollektivgröße von beispielsweise 10 Ladepunkten beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor 0,6, bei 20 Ladepunkten 0,35, bei 50 Punkten 0,26 und bei 150 Punkten noch ca. 0,17.

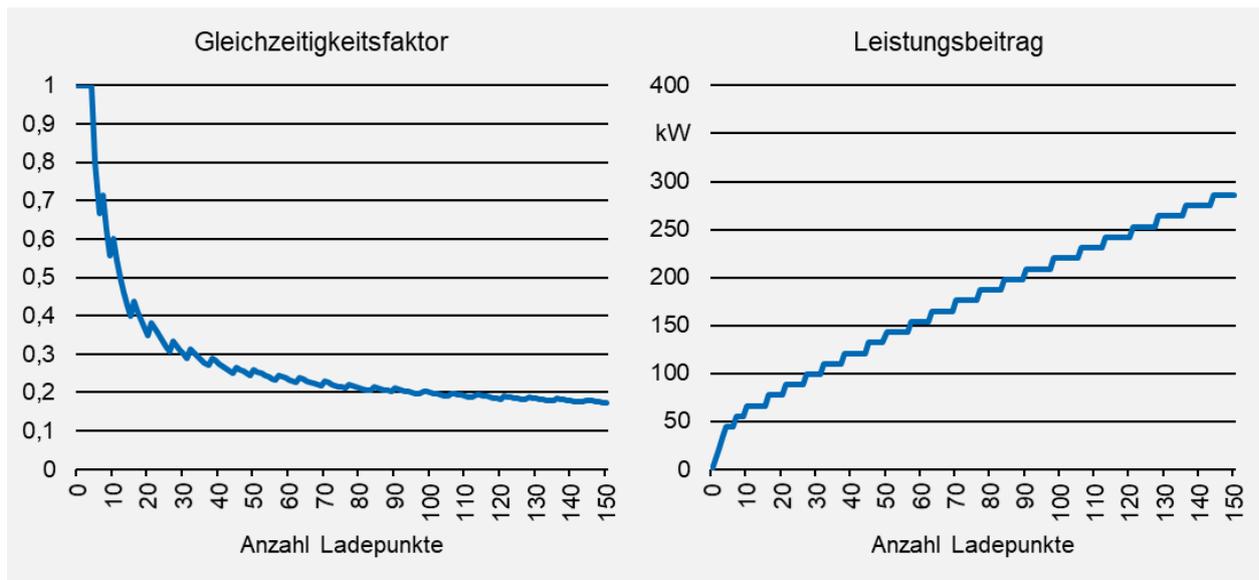


Bild 10: Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und des Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl der Ladepunkte in der Basis-Variante

Mit Blick auf die Netzdimensionierung ist allerdings nicht der Gleichzeitigkeitsfaktor an sich relevant, sondern der resultierende Leistungsbeitrag, der sich aus der Multiplikation von Gleichzeitigkeitsfaktor, Anzahl der Ladepunkte und Ladeleistung ergibt. Auch wenn der Gleichzeitigkeitsfaktor und der spezifische Lastbeitrag je Ladepunkt mit zunehmender Anzahl der Ladepunkte sinken, steigt der absolute Leistungsbeitrag mit der Anzahl der Ladepunkte kontinuierlich an. Aus Sicht der Niederspannungsleitungen (NS-Leitungen) sind Kollektive von nur einigen wenigen Ladepunkten, aus Sicht der Ortsnetzstations-Ebene (ONS-Ebene) von einigen zehn Ladepunkten und aus Sicht der Mittelspannungsleitungen (MS-Leitungen) und höherer Netzebenen einiger hundert Ladepunkte relevant. Beispielsweise beträgt der absolute Leistungsbeitrag bei 20 Ladepunkten (NS-Leitungsebene) 77 kW, was knapp 4 kW je Ladepunkt entspricht, bei 50 Ladepunkten (ONS-Ebene) 143 kW, entsprechend knapp 3 kW je Ladepunkt, und bei 150 Ladepunkten (MS-Leitungsebene) 286 kW, was 1,9 kW je Ladepunkt entspricht.

Ab etwa 100 Ladepunkten nimmt der Gleichzeitigkeitsfaktor mit steigender Anzahl von Ladepunkten nur noch langsam ab. Exemplarisch wird nachfolgend aufgezeigt, wie sich der Gleichzeitigkeitsfaktor bis zu einer Anzahl von 1.500 Ladepunkten entwickelt. Bei 1.500 Ladepunkten beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor in der Basis-Variante ca. 0,12 (Bild 11). Die Gleichzeitigkeit verringert sich damit im Vergleich zu 150 Ladepunkten zwar um ca. 30 %, allerdings ist der absolute Rückgang über einen weiten Bereich nur sehr moderat.

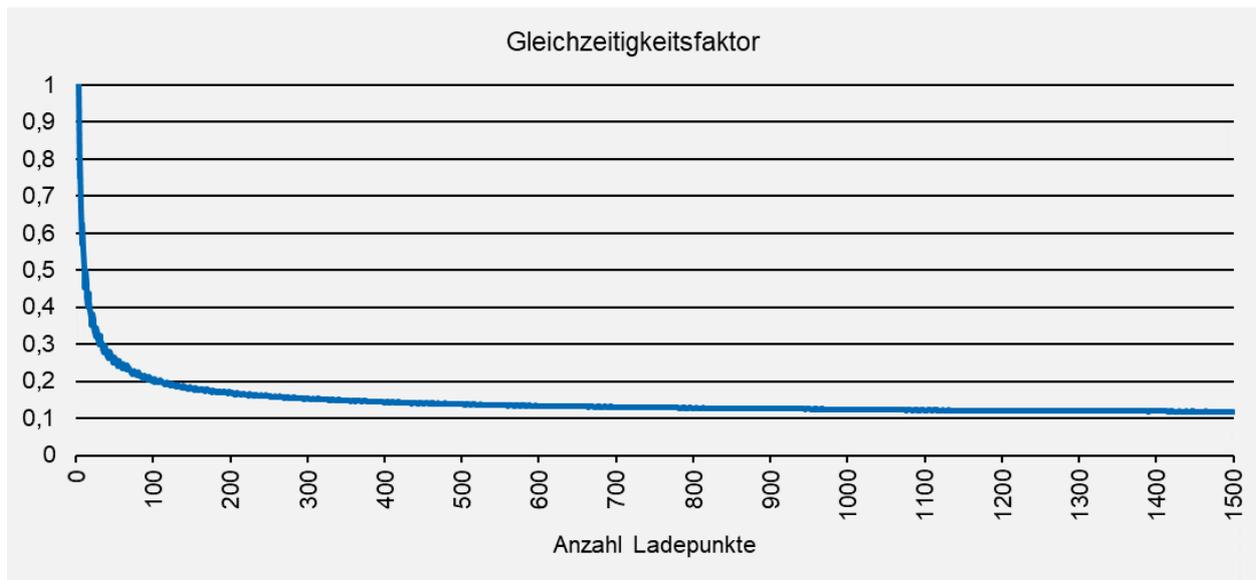


Bild 11: Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte in der Basis-Variante für eine große Zahl von Ladepunkten

Schließlich muss für die Netzdimensionierung die Korrelation des Lastbeitrags durch Ladevorgänge mit der sonstigen Last beachtet werden. Aus dem verwendeten Tagesnutzungsprofil lässt sich schließen, dass die meisten Ladevorgänge zwischen 16 und 18 Uhr beginnen. Angesichts von Ladedauern im Stundenbereich fällt der durch Ladevorgänge verursachte Leistungsbeitrag mit der Abendspitze der sonstigen Haushaltslast zusammen und muss damit in Netzbereichen mit überwiegendem Haushaltsnachfrageprofil praktisch vollständig der Bestandslast überlagert werden.

3.2 Gebietstypen

In Kapitel 2 wurde bereits erläutert, dass sowohl mittlere Tageswegstrecken als auch spezifische Energieverbräuche der Fahrzeuge gebietsspezifische Unterschiede aufweisen. In großstädtischen Gebieten sind die Tageswegstrecken üblicherweise kürzer als in vorstädtischen und dörflichen Gebieten. Gleichzeitig ist der spezifische Energieverbrauch in der Stadt wegen der geringeren gefahrenen Geschwindigkeiten und häufigeren Bremsvorgänge mit Möglichkeit der Energierückgewinnung (Rekuperation in die Fahrzeugbatterie) geringer. In dörflichen Gebieten hingegen ist der Verbrauch wegen höherer Geschwindigkeiten und weniger Gelegenheit zur Rekuperation höher. Auf Basis der Literaturrecherche und in Abstimmung mit den die Studie begleitenden Experten werden in den Parametersätzen für die Gebietstypen großstädtisch und dörflich gegenüber der Basis-Variante die Tageswegstrecke um 7 km verringert bzw. um 4 km erhöht sowie der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge um 4 kWh verringert bzw. erhöht (Bild 12). Im Übrigen werden für diese beiden Gebietstypen die gleichen Parameter angesetzt wie in der Basis-Variante.

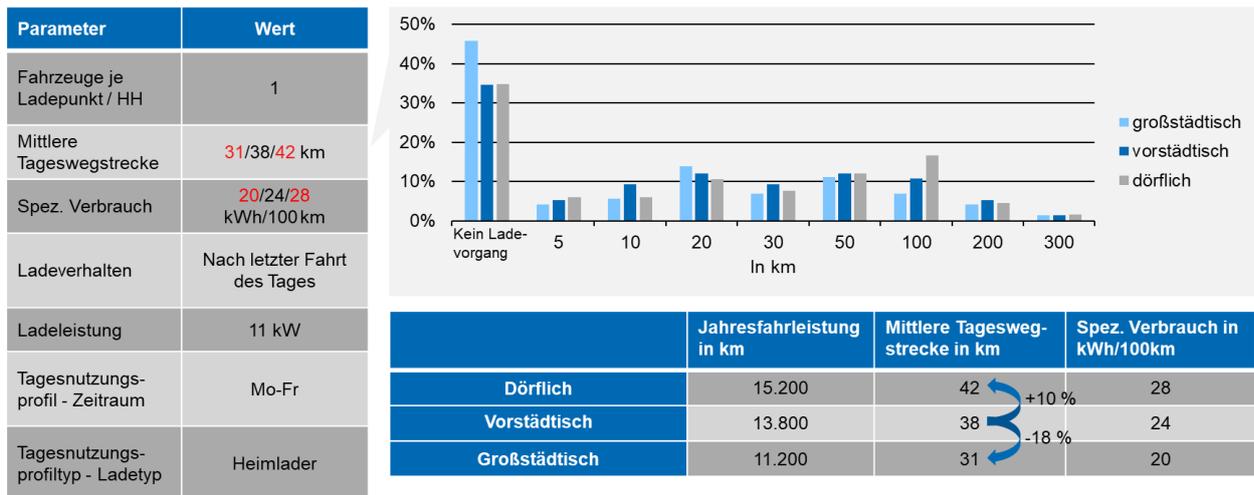


Bild 12: Gewählte Parametrierung für die betrachteten Gebietstypen

In großstädtischen Gebieten sind die Tageswegstrecken und spezifischen Verbrauchswerte und somit auch die Menge an nachzuladender Energie und die Ladedauer im Mittel geringer als in vorstädtischen Gebieten. Beim dörflichen Gebietstyp verhält es sich umgekehrt. Mit sinkender Ladedauer reduziert sich bei gleichbleibender Anzahl und spezifischer Leistung der Ladepunkte die Wahrscheinlichkeit, dass Ladepunkte gleichzeitig genutzt werden, sodass sich in großstädtischen Gebieten ein geringerer und in dörflichen Gebieten ein höherer Gleichzeitigkeitsfaktor ergibt als in der Basis-Variante (Bild 13).

Auch wenn die mittlere Wegstrecke beim dörflichen Gebietstyp nur um etwa 10 % über der Strecke der Basis-Variante und der spezifische Verbrauch gut 15 % über dem der Basis-Variante liegt, ist der Leistungsbeitrag für 150 Ladepunkte fast 20 % größer als in der Basis-Variante. Für den großstädtischen Gebietstyp ergibt sich ebenfalls ein um etwa 20 % geringerer Leistungsbeitrag für 150 Ladepunkte, wengleich hier die Parameteränderungen jeweils unter 20 % liegen. Es kann damit festgehalten werden, dass Veränderungen der Ladedauer nichtlinearen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen und den daraus abgeleiteten Leistungsbeitrag haben.

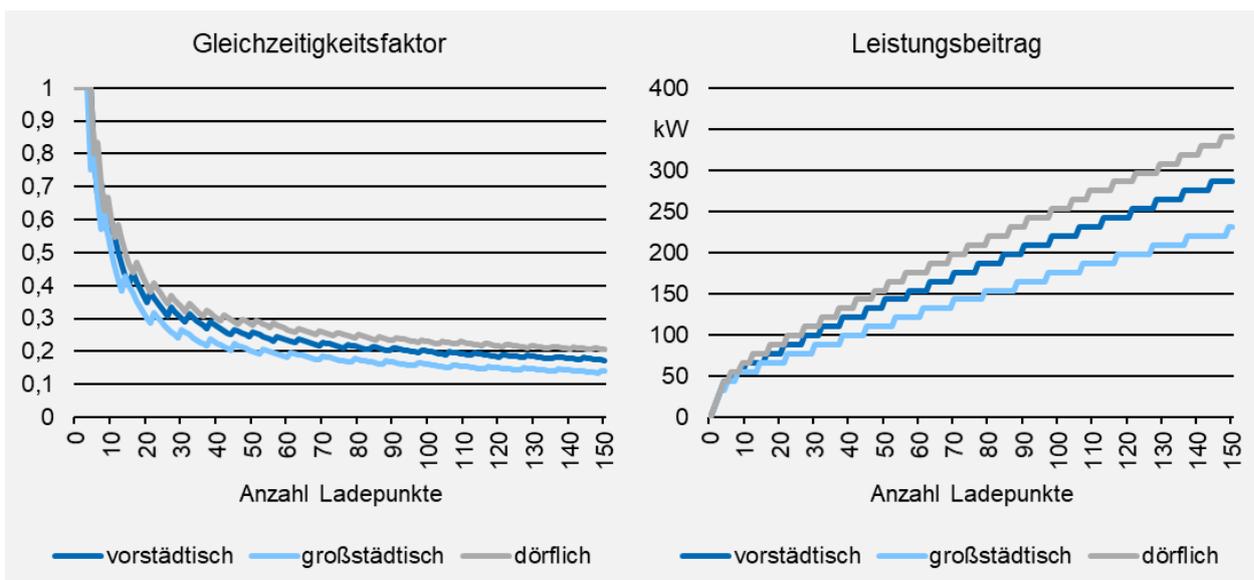


Bild 13: Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und des Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte je betrachtetem Gebietstyp

3.3 Ladeleistung

Zuvor wurde erläutert, dass die Ladedauer entscheidenden Einfluss auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen aufweist. Neben der Ladeenergie, als Produkt aus Tageswegstrecke und spezifischem Energieverbrauch des Fahrzeugs, wirkt die Höhe der Ladeleistung unmittelbar auf die Ladedauer. Offensichtlich führt eine Verdopplung der Ladeleistung bei gleicher Ladeenergie zu einer Halbierung der Ladedauer, wenn vereinfachend von Nichtlinearitäten infolge ladeleistungsabhängiger Verluste und Ladekurven abgesehen wird. Um den Effekt der Ladeleistung zu quantifizieren, wird für die Parametrierung der Basis-Variante neben der Leistung von 11 kW (Basis-Variante, dreiphasige Ladung mit 16 A) auch 3,7 kW (einphasige Ladung mit 16 A) sowie 22 kW (dreiphasige Ladung mit 32 A) angesetzt.

Da die Ladedauern und damit auch die Wahrscheinlichkeit für zeitlich überlappende Ladevorgänge mit sinkender Ladeleistung ansteigen, steigt der Gleichzeitigkeitsfaktor bei der Variante mit einer Ladeleistung von 3,7 kW im Vergleich zur Basis-Variante deutlich an, während der Faktor entsprechend bei Ansatz von 22 kW abnimmt (Bild 14). Bei 150 Ladepunkten beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor bei 3,7 kW etwa 0,31 und bei 22 kW ca. 0,12, statt ca. 0,17 in der Basis-Variante (11 kW). Zwar ist die Gleichzeitigkeit bei einer Ladeleistung von 3,7 kW fast doppelt so hoch wie in der Basis-Variante, allerdings beträgt die Höhe der Ladeleistung im Vergleich dazu nur ein Drittel. Bei Betrachtung des resultierenden Leistungsbeitrags, der für die Netzauslegung relevant ist, verkehren sich die Reihenfolgen der betrachteten Ladeleistungsvarianten um. Der Leistungsbeitrag von 150 Ladepunkten ist bei einer Ladeleistung von 22 kW mit knapp 400 kW mehr als doppelt so hoch wie bei einer Ladeleistung von 3,7 kW (gut 170 kW).

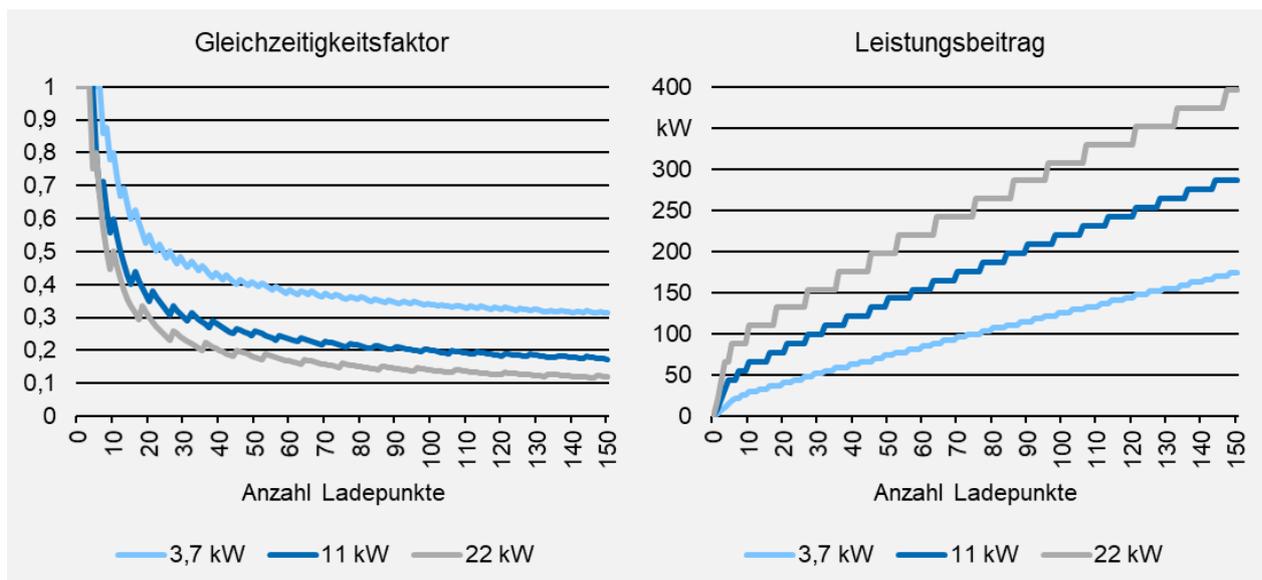


Bild 14: Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und der Ladeleistung

Um zu identischen Leistungsbeitragsverläufen zu kommen, müssten sich die Gleichzeitigkeitsfaktoren im gleichen Verhältnis verändern wie die Ladeleistungen. Wie in Abschnitt 3.2 bereits erörtert, haben Veränderungen der Ladedauer nichtlinearen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen und den daraus abgeleiteten Leistungsbeitrag. Zwar verändern sich durch eine Anpassung der spezifischen Ladeleistung die Ladedauern umgekehrt proportional, d. h. eine Verdopplung der Ladeleistung führt zu einer Halbierung der Ladedauer. Allerdings überlappen zeitlich nicht im gleichen Verhältnis entsprechend mehr oder weniger Ladevorgänge. Insbesondere die zeitliche Konzentration von Ladevorgängen im Zeitfenster zwischen 16 und 19 Uhr führt dazu, dass sich z. B. bei Halbierung der Ladezeit die Gleichzeitigkeit nicht ebenfalls halbiert.

Es bleibt somit festzuhalten, dass die Höhe der Ladeleistung einen signifikanten Einfluss auf die Gleichzeitigkeit und den absoluten Leistungsbeitrag aufweist. Allerdings kann der Netzplaner bei Auslegung eines Netzes angesichts des üblicherweise mehr als 10 Jahre umfassenden Planungshorizonts, der den Entwicklungshorizont von Fahrzeugen deutlich übersteigt, kaum valide abschätzen, mit welcher Leistung Fahrzeuge in dem jeweiligen Gebiet geladen werden. Perspektivisch kann allerdings davon ausgegangen werden, dass Fahrzeug-Onboard-Ladeeinrichtungen mit mindestens 11 kW ausgelegt werden und heute teilweise noch übliche geringere Ladeleistungen an Bedeutung verlieren. Weiter ist ein vollständiges Aufladen eines Fahrzeugs während üblicher Standzeiten (8 - 12 Stunden) bei den in den kommenden 10 Jahren typischerweise zu erwartenden Batteriekapazitäten von unter 100 kWh in der Regel gewährleistet, sodass aus Nutzersicht kein zwingender, alltäglicher Bedarf nach einer 22-kW-Lademöglichkeit bestehen wird. Insofern erscheint die Annahme einer Ladeleistung von mindestens 11 kW als üblicher Leistungsansatz sinnvoll, sofern nicht bekannt ist, dass andere Ladeleistungen installiert wurden.

3.4 Ladeverhalten: „Tanken“ versus „Laden“

Eine weitere Einflussgröße, die die Dauer je Ladevorgang beeinflusst, ist das Ladeverhalten. In den bisher vorgestellten Untersuchungsvarianten ist unterstellt, dass täglich nach der letzten Fahrt des Tages die Fahrzeugbatterie wieder vollständig geladen wird („Laden“). Angesichts der bereits heute üblichen Batteriegrößen und mittleren Tageswegstrecken sind tägliche Ladevorgänge jedoch nicht zwingend notwendig.

In der Metastudie finden sich keine Hinweise zur Frequenz von Ladevorgängen, daher müssen Annahmen zur Ladefrequenz getroffen werden. Bei den heute üblichen Batteriegrößen können Strecken zwischen 100 km und 300 km einigermaßen sicher zurückgelegt werden. Daher ist es plausibel, dass Fahrzeuge nach einer solchen Strecke (spätestens) wieder aufgeladen werden müssen. Um ein Laden bei einem niedrigen Ladezustand der Batterie nachzubilden („Tanken“), wird die Verteilung der Wegstrecken bis zum Ladevorgang angepasst, indem die Häufigkeit von Wegstrecken über 200 km deutlich erhöht wird. Bei einer mittleren Tageswegstrecke von 38 km würden somit beispielsweise bei der Nachladung einer 200 km entsprechenden Energiemenge Ladevorgänge nur gut alle fünf Tage stattfinden. Damit weiterhin im Durchschnitt die mittlere Tageswegstrecke unverändert bleibt, wird die Häufigkeit der nicht täglich geladenen Fahrzeuge entsprechend erhöht (Säule „0km“ in Bild 15). In Summe wird damit von dem jeweils betrachteten Fahrzeugkollektiv in beiden betrachteten Varianten des Ladeverhaltens die gleiche Strecke zurückgelegt.

Parameter	Wert
Fahrzeuge je Ladepunkt / HH	1
Mittlere Tageswegstrecke	38 km (konstant)
Spez. Verbrauch	24 kWh/100km
Ladeverhalten	„Tanken“
Ladeleistung	11 kW
Tagesnutzungsprofil - Zeitraum	Mo-Fr
Tagesnutzungsprofiltyp - Ladetyp	Heimlader

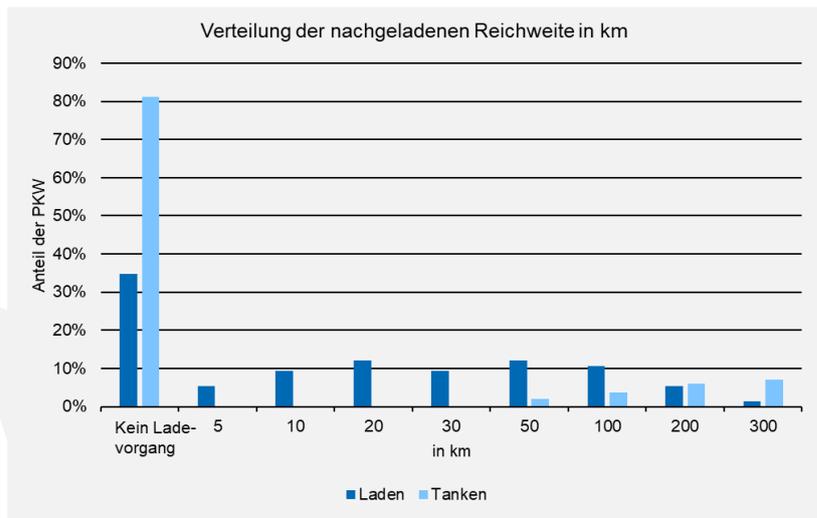


Bild 15: Gewählte Parametrierung zur Nachbildung der beiden betrachteten Varianten des Ladeverhaltens für das betrachtete vorstädtische Gebiet

Das zur Illustration gewählte Zahlenbeispiel mit 200 km nachgeladener Reichweite alle fünf Tage und 38 km täglich nachgeladener Reichweite zeigt bereits die beiden wesentlichen Effekte auf: Einerseits steigt die Ladedauer bei geringerer Ladefrequenz deutlich an, andererseits sinkt gleichzeitig die Zahl der potenziell überhaupt noch an einem Tag ladenden Fahrzeuge. Durch die längere Ladedauer steigt zwar die Chance, dass sich Ladevorgänge zeitlich überschneiden und sich der Gleichzeitigkeitsfaktor erhöht, allerdings ist gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für Überschneidungen durch die geringere Anzahl an Ladevorgängen reduziert. Diese beiden Effekte wirken gegenläufig und heben sich bei den durchgeführten Simulationen weitgehend gegenseitig auf. Die Gleichzeitigkeitsverläufe unterscheiden sich zwischen den beiden Varianten nur wenig (Bild 16). Der resultierende Leistungsbeitrag liegt bei der Variante „Tanken“ für die Anzahl von 150 Ladepunkten ca. 10 % unterhalb des Werts der Basis-Variante („Laden“). Die Auswirkung der Einflussgröße „Ladeverhalten“ hat somit eine deutlich kleinere Sensitivität auf die Ergebnisse als die zuvor untersuchten Größen.

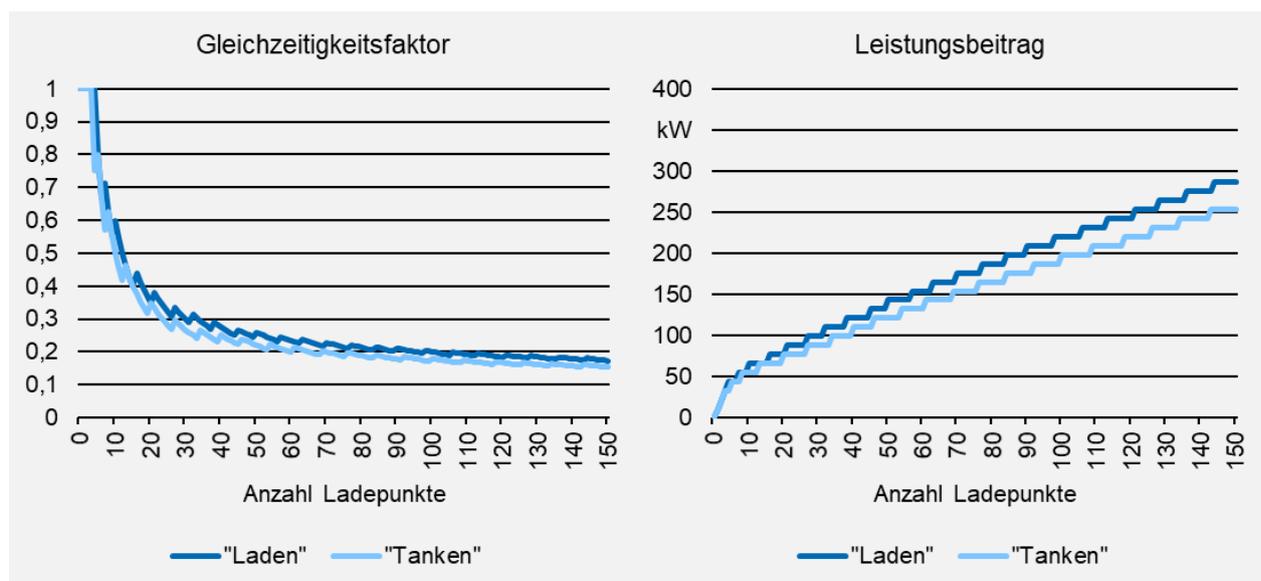


Bild 16: Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Ladeverhalten „Tanken“ versus „Laden“ für das betrachtete vorstädtische Gebiet bei einer Ladeleistung von 11 kW je Ladepunkt

3.5 Laden vor Abfahrt

Insbesondere bei kalten Außentemperaturen ist es vorteilhaft, den Ladevorgang nicht, wie in den bisher dargestellten Analysen unterstellt, direkt nach Abschluss der letzten Fahrt des Tages zu starten, sondern erst so spät, dass die Batterien unmittelbar vor Abfahrt vollständig geladen sind. Die Batterien sind dann bereits vorgewärmt und damit leistungsfähiger. Wiesen die Abfahrtszeiten die gleiche zeitliche Verteilung auf wie die Ankunftszeiten, so würden sich jeweils identische Gleichzeitigkeiten und Leistungsbeiträge ergeben. Allerdings zeigt die Auswertung von Mobilitätsdaten (Abschnitt 2.2.3), dass die Abfahrten am Morgen in einem deutlich schmaleren Zeitfenster erfolgen als die Ankünfte am Nachmittag und Abend (Bild 17).

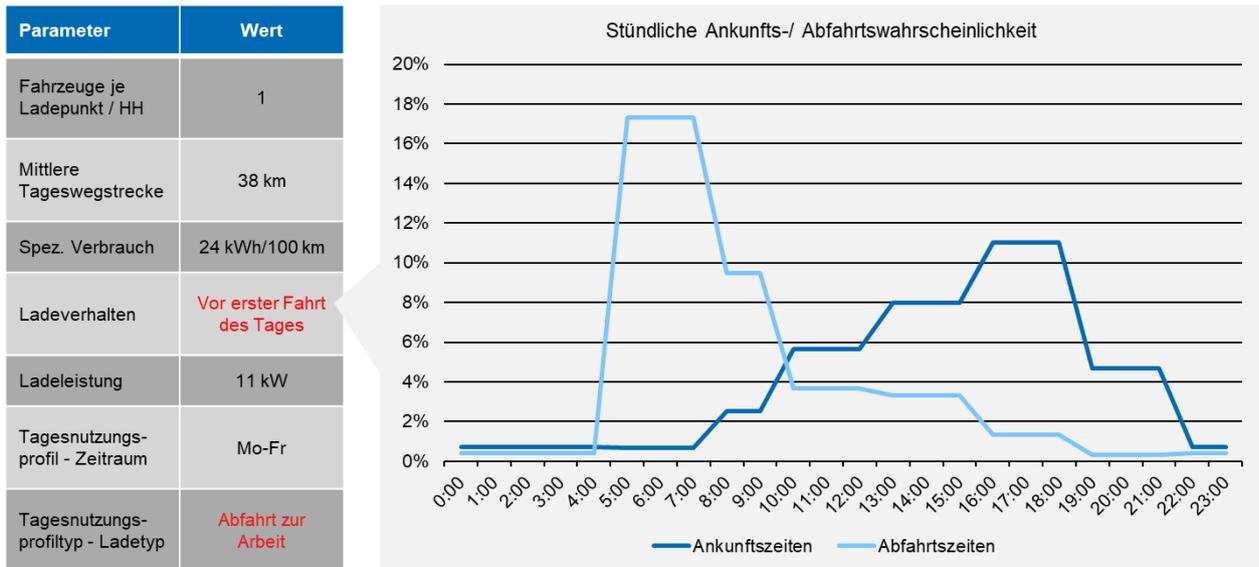


Bild 17: Gewählte Parametrierung zur Nachbildung des Abfahrtszeitprofils

Durch die Konzentration der Abfahrten auf wenige Stunden synchronisieren sich Ladevorgänge, da diese ebenfalls in einem kürzeren Zeitfenster abgeschlossen sein müssen und damit mehr Ladevorgänge gleichzeitig stattfinden. Im Vergleich zur Basis-Variante sind der Gleichzeitigkeitsfaktor und der Leistungsbeitrag bei 150 Ladepunkten etwa ein Drittel höher, wenn vor Abfahrt geladen wird.

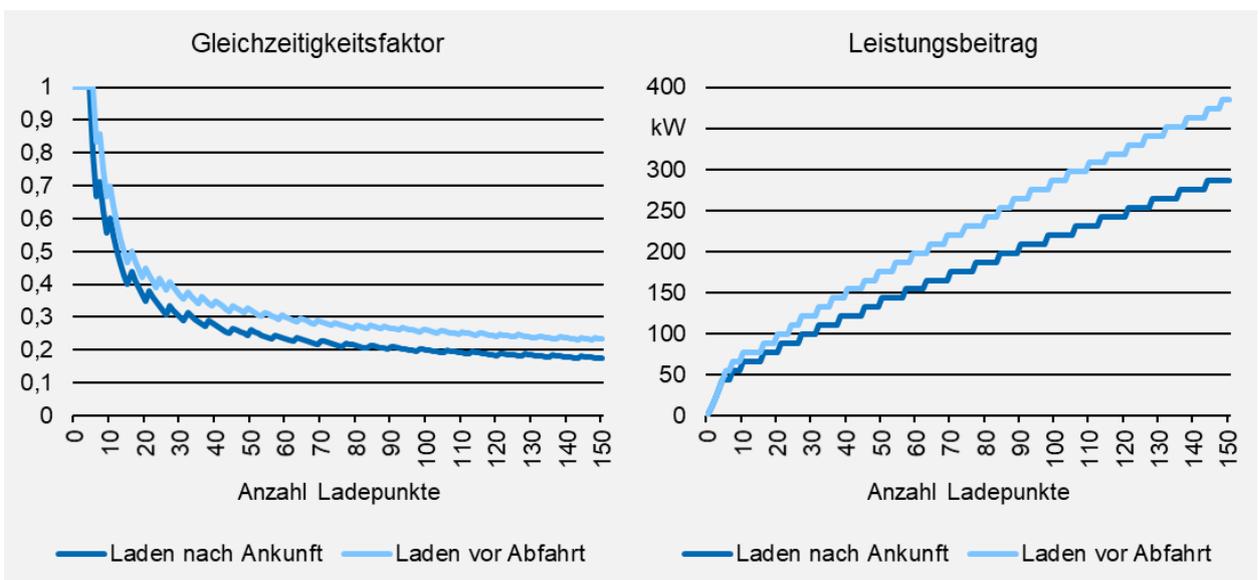


Bild 18: Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Tagesnutzungsprofil

3.6 Exkurs: Wirkungen möglicher Ladesteuerungsmechanismen

Da die Ankunftszeiten und damit auch Ladevorgänge tendenziell mit der Spitzenlast von Haushalten zusammenfallen, kann durch den zusätzlichen Leistungsbeitrag von Elektrofahrzeugen Netzausbaubedarf entstehen. Vielfach wird daher in der aktuellen Diskussion gefordert, das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen netzdienlich zu steuern. Zugleich hat die Flexibilität der Ladevorgänge auch für den systemweiten Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch einen Wert, der durch marktorientierte Steuerungsmechanismen realisiert werden kann. Es ist daher absehbar, dass verschiedene Steuerungsmechanismen – auch in Kombination miteinander – zur Anwendung kommen werden, über deren Gestaltung aktuell noch intensiv diskutiert wird (z. B. im Zusammenhang mit der Umsetzung von §14a EnWG) oder die bereits im Gesetzesrahmen verankert sind (s. §41a EnWG zu dynamischen Stromtarifen).

Diese Studie fokussiert zwar primär auf Gleichzeitigkeiten, die infolge natürlicher, also ungesteuerter Ladevorgänge entstehen. Als Exkurs wurden jedoch mit dem Simulationsmodell zusätzlich auch Analysen durchgeführt, die bestimmte Ladesteuerungsmechanismen berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Analysen sollen beispielhaft die Wirkungsweise dieser Mechanismen aufzeigen. Die Analysen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, und auch die verwendeten Parametrierungen sind rein exemplarisch und nicht als Empfehlungen anzusehen.

3.6.1 Sperrzeit

Eine Möglichkeit, die im Zusammenhang mit einer möglichen netzdienlichen Ladesteuerung intensiv diskutiert wird, ist die Einführung von Sperrzeiten, in denen Ladevorgänge gedrosselt oder vollständig unterbunden werden. Die Wirkungen derartiger Sperrzeiten werden nachfolgend untersucht. Dabei werden Reduktionsgrade der spezifischen Ladeleistung um 100 % und um 50 % betrachtet.

Eine Reduktion der Ladeleistung um 100 % in einem bestimmten Zeitraum führt dazu, dass nach Aufhebung der Sperrzeit alle Fahrzeuge, die zu Beginn der Sperrzeit noch nicht vollständig geladen waren, und alle Fahrzeuge, die einen Ladevorgang während der Sperrzeit begonnen hätten, gleichzeitig beginnen zu laden. Dementsprechend ist die sich ergebende maximale Gleichzeitigkeit höher als in der Basis-Variante mit ungesteuertem Ladeverhalten. Bei einer Sperrzeit zwischen 17 und 19 Uhr und einer Leistungsreduktion um 100 % verdoppeln sich bei 150 Ladepunkten nahezu die Gleichzeitigkeit und der resultierende Leistungsbeitrag (Bild 19). Wird die Dauer der Sperrzeit weiter ausgedehnt, steigen der Gleichzeitigkeitsfaktor und der Leistungsbeitrag weiter, da immer mehr Ladevorgänge, die in diesem Zeitfenster unterbrochen werden oder nicht beginnen können, zeitlich synchronisiert werden.

Wird die Leistung der Ladevorgänge nicht vollständig, sondern nur teilweise reduziert, sinkt die zeitliche Synchronisation der Ladevorgänge nach Auslaufen der Sperrzeit, da bei teilweiser Reduktion zumindest die Möglichkeit besteht, dass einzelne Ladevorgänge bereits während der Sperrzeit beendet werden können. Exemplarisch wird dazu eine Reduktion der Ladeleistung um 50 % im Zeitraum von 16 bis 20 Uhr untersucht. Während der Sperrzeit (Verlauf „Sperrzeit 50 % (gesperrte Stunden)“ in Bild 19) ergibt sich erwartungsgemäß eine signifikant geringere Gleichzeitigkeit (bezogen auf die maximale Gleichzeitigkeit ohne Leistungsreduktion). Die Gleichzeitigkeit nach dem Ende der Sperrzeit (Verlauf „Sperrzeit 50 % (alle Stunden)“ in Bild 19) liegt wegen des zeitlichen Synchronisationseffekts zwar höher als im ungesteuerten Fall, aber signifikant niedriger als bei vollständiger Leistungsreduktion (Verlauf „Sperrzeit 100 %“ in Bild 19).

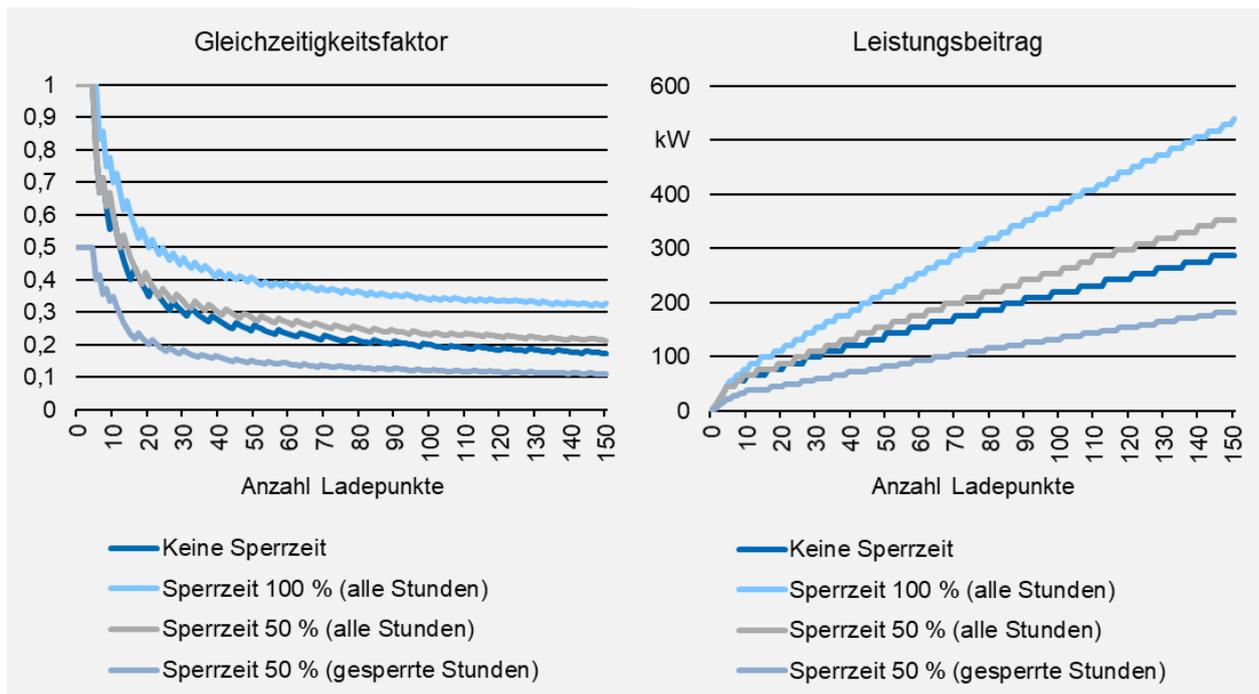


Bild 19: Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und der betrachteten Sperrzeiten

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der von Ladevorgängen hervorgerufene Lastbeitrag während eines Sperrzeitraums reduziert werden kann. Im Anschluss an den Sperrzeitraum können jedoch Synchronisationseffekte auftreten, die je nach Art der Umsetzung der Sperrzeit mitunter auch zu signifikant höheren Leistungsbeiträgen führen können als bei ungesteuertem Ladeverhalten.

3.6.2 Anreize für die Wahl des Ladebeginns (Happy Hour)

Neben der zuvor dargestellten Möglichkeit, mittels Sperrzeiten den Beginn eines Ladevorgangs zu beeinflussen, könnten auch Anreize an die Nutzer gesetzt werden, Ladevorgänge in bestimmte Zeiten zu verschieben. Ein möglicher Anreiz zu einer solchen Verschiebung ist z. B. die Gewährung von Preisreduktionen zu bestimmten Zeiten, was vielfach als „Happy Hour“ bezeichnet wird. Eine netzdienliche Steuerung könnte in diesem Zusammenhang z. B. mittels zeitvariabler Netzentgelte umgesetzt werden, ein marktorientierter Einsatz beispielsweise über reduzierte Strompreise. Bei einer „perfekten“ Reaktion auf ein solches Preissignal würden alle Nutzer diesem Signal folgen und somit alle Fahrzeuge, die freie Batteriekapazitäten aufweisen und an ihren Ladepunkt angeschlossen sind, zu Beginn der „Happy Hour“ gleichzeitig mit dem Ladevorgang beginnen. Damit würden sich nahezu über den gesamten betrachteten Bereich der Ladepunktzahlen Gleichzeitigkeiten von über 0,8 ergeben (Bild 20). Bei einer derartig hohen Gleichzeitigkeit dürfte dieser Lastfall bereits unabhängig von der sonstigen Last auslegungsrelevant für die Netze sein.

Wird praxisnah davon ausgegangen, dass Elektrofahrzeuge analog zu heutigen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor erst nach Ausnutzung einer gewissen Reichweite betankt bzw. geladen werden, kommt es zwar weiterhin zu einer zeitlichen Synchronisation von Ladevorgängen, die dann jedoch eine geringere Anzahl an potenziell gleichzeitig ladenden Fahrzeugen betrifft, wie zuvor bereits bei der Sensitivitätsanalyse „Tanken versus Laden“ erläutert (Abschnitt 3.4). Bei der auch für die betreffende Sensitivitätsanalyse verwendeten Parametrierung eines solchen „Tankverhaltens“ ergeben sich deutlich geringere Gleichzeitigkeitsfaktoren als bei der im vorherigen Absatz beschriebenen Variante „Laden“. Infolge der stärkeren zeitlichen Synchronisation liegen die Gleichzeitigkeiten und der Lastbeitrag jedoch etwa 60 % über den Ergebnissen für die Basis-Variante (jeweils für 150 Ladepunkte). Allerdings beträgt

der spezifische Lastbeitrag bei 150 Ladepunkten etwa 3 kW je Ladepunkt und liegt damit nicht mehr deutlich über dem spezifischen Lastbeitrag der Haushalte. Bei einer zeitlichen Verschiebung von Ladevorgängen in Schwachlastzeiten (netzdienlicher Flexibilitätseinsatz) kann tendenziell einer durch Ladevorgänge hervorgerufenen stärkeren Netzauslastung entgegengewirkt werden. Ebenso kann bei einer Synchronisation von Ladevorgängen in Spitzenlastzeiten, die bei einer marktorientierten Steuerung nicht ausgeschlossen ist, die Netzauslastung deutlich über der liegen, die bei natürlichem Ladeverhalten auftritt.

Diese exemplarischen Analysen und Überlegungen bestätigen somit die Erwartung, dass Ladesteuerungen auf Basis von Preisanreizen sowohl zu einem Anstieg als auch zu einem Rückgang der Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen führen können, abhängig von der Parametrierung der Anreize, der Reaktion der Fahrzeugbesitzer und der Eigenschaften der Ladepunkte.

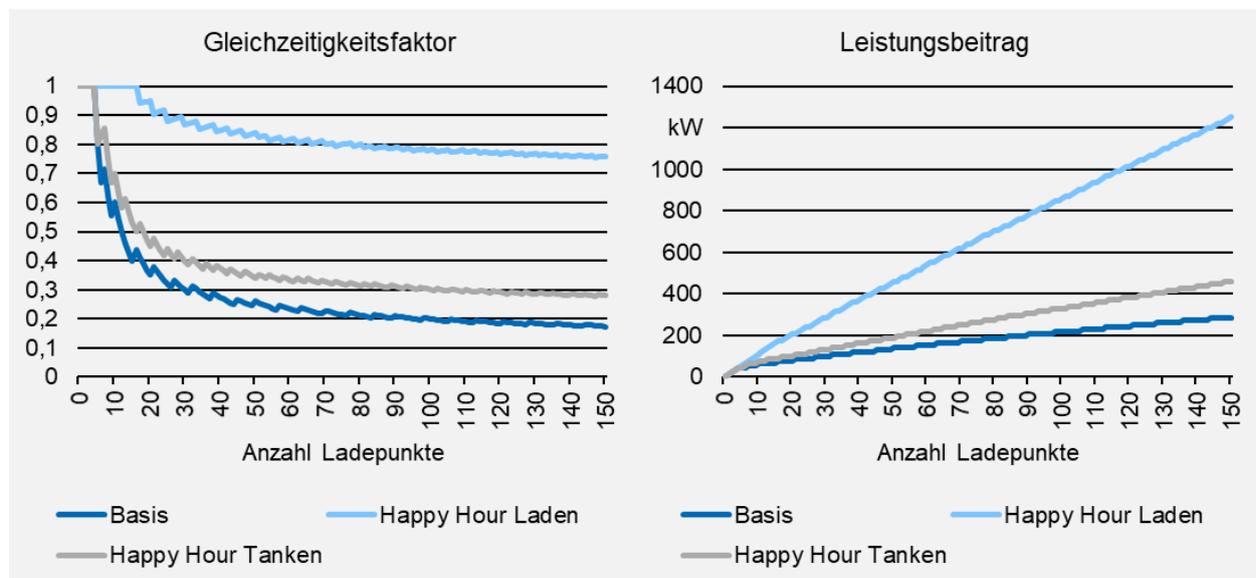


Bild 20: Verlauf der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte und vom Ladeverhalten „Tanken“ versus „Laden“ bei Reaktion auf „Happy Hour“-Anreiz

4 Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung der Netzplanung

Im Rahmen der Studienbearbeitung ist ein Berechnungswerkzeug auf Basis von MS Excel erstellt worden, in dem die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zusammengeführt wurden. Grundsätzlich muss bei der Konzeption eines solchen Werkzeugs zwischen Genauigkeit und Handhabbarkeit abgewogen werden. So hat beispielsweise die Tagesfahrleistung des jeweiligen Nutzers zwar einen Einfluss auf den zu erwartenden zeitgleichen Lastbeitrag, allerdings ist diese Information dem Netzplaner in der Praxis in der Regel nicht bekannt. Ebenso ist es mit Blick auf die angestrebte Unterstützung der Netzplanung wenig praktikabel, das zur Ergebnisberechnung entwickelte Monte-Carlo-Simulationsverfahren in das Werkzeug zu integrieren, da die Berechnung mehrerer 10.000 Simulationsläufe sehr zeitaufwändig ist und die Analyse von Parametervariationen erschwert. Insofern sind Vereinfachungen und praxisgerechte (gewichtete) Mittelwertbildungen erforderlich.

Im Werkzeug sind die durch die Simulationen ermittelten Gleichzeitigkeiten und Leistungsbeiträge in Abhängigkeit von den im Rahmen der Untersuchung als besonders relevant erkannten Einflussgrößen hinterlegt. Diese Größen sind der Regionstyp (großstädtisch, vorstädtisch, dörflich), der Siedlungstyp (Wohngebiet, Gewerbegebiet und Mischgebiet aus Wohn- und Gewerbegebiet), in dem die beiden Tagesnutzungsprofilaspekte Zeitraum und Ladetyp zusammengeführt sind, sowie die Ladeleistung (3,7 kW, 11 kW, 22 kW). Zwischenwerte, die nicht unmittelbar als Parametersatz hinterlegt sind, werden

durch das Werkzeug linear interpoliert. Als Ergebnisse stellt das Werkzeug jeweils den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors und des zugehörigen Leistungsbeitrags in Abhängigkeit von der Anzahl Ladepunkte grafisch dar.

Eine ausführliche Beschreibung der einstellbaren Eingangsparameter und der ermittelten Ergebnisgrößen ist im Werkzeug selbst enthalten, sodass an dieser Stelle auf eine weiterführende Darstellung verzichtet werden kann.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Bedeutung von Elektro-PKW für den Individualverkehr in Deutschland nimmt zügig zu, so dass sich mit Blick auf die Stromversorgung u. a. die Frage stellt, welche Auswirkungen Ladevorgänge dieser Fahrzeuge auf die Stromnetze haben. Ziel dieser Studie ist es, die von Elektrofahrzeugen durch ungesteuerte Ladevorgänge an Heimladepunkten verursachten Lastbeiträge abzuschätzen und ein Berechnungswerkzeug zur Anwendung in der Netzplanung zu entwickeln.

Basierend auf einer Auswertung einschlägiger Studien, Reallaborergebnisse und wissenschaftlicher Veröffentlichungen werden zunächst wesentliche Einflussgrößen identifiziert und konkrete Parameter für Berechnungen abgeleitet. Anschließend wird anhand von Simulationen rechnerisch ermittelt, welche Gleichzeitigkeiten bei Ladevorgängen zu erwarten sind, und aufgezeigt, welche quantitative Relevanz die zuvor identifizierten Einflussfaktoren haben. Hierzu wird ein stochastisches Verfahren eingesetzt, bei dem Verteilungen der Ergebnisgrößen auf Basis von Verteilungen der Eingangsgrößen ermittelt werden (Monte-Carlo Simulation).

Um den Einfluss der Variation einzelner Parameter bestimmen zu können, wird zunächst eine Basis-Variante definiert, in der für jede Einflussgröße ein typischer Wert angesetzt wird. Um zu prüfen, wie stark Parameteränderungen die Gleichzeitigkeiten und Lastbeiträge beeinflussen, wird anschließend im Sinne von Sensitivitätsanalysen jeweils eine Einflussgröße variiert. Schließlich werden die zentralen Ergebnisse in einem Berechnungswerkzeug zusammengeführt, mit dem die Gleichzeitigkeit und die Lastbeiträge einer bestimmten Anzahl von Ladepunkten in Abhängigkeit von wesentlichen Einflussfaktoren schnell ermittelt werden können.

Die Untersuchung liefert folgende wesentliche Ergebnisse:

- **Basis-Variante:** Bei kleinen Kollektiven von unter fünf Ladepunkten muss mit hinreichender Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass innerhalb des Simulationszeitraums zumindest kurzzeitig alle Ladepunkte genutzt werden und sich ein Gleichzeitigkeitsfaktor von eins ergibt. Mit zunehmender Kollektivgröße wird es jedoch immer unwahrscheinlicher, dass alle Ladepunkte des Kollektivs gleichzeitig aktiv sind, sodass der Gleichzeitigkeitsfaktor anfänglich sehr schnell und mit zunehmender Ladepunktzahl langsamer abnimmt. Er beträgt bei einer Kollektivgröße von 10 Ladepunkten 0,6, bei 20 Ladepunkten 0,35, bei 50 Ladepunkten 0,26 und bei 150 Ladepunkten noch ca. 0,17.

Für die Netzdimensionierung ist allerdings nicht der Gleichzeitigkeitsfaktor an sich relevant, sondern der resultierende Leistungsbeitrag, der sich aus der Multiplikation von Gleichzeitigkeitsfaktor, Anzahl der Ladepunkte und Ladeleistung ergibt. Auch wenn der Gleichzeitigkeitsfaktor und der spezifische Lastbeitrag je Ladepunkt mit zunehmender Anzahl der Ladepunkte sinken, steigt der absolute Leistungsbeitrag mit der Anzahl der Ladepunkte kontinuierlich an. Mit einer Ladeleistung von 11 kW je Ladepunkt beträgt beispielsweise der absolute Leistungsbeitrag bei 20 Ladepunkten 77 kW, was knapp 4 kW je Ladepunkt entspricht, bei 50 Ladepunkten 143 kW, entsprechend knapp 3 kW je Ladepunkt, und bei 150 Ladepunkten 286 kW, was 1,9 kW je Ladepunkt entspricht. Ab etwa 100 Ladepunkten

nimmt der Gleichzeitigkeitsfaktor mit steigender Anzahl von Ladepunkten nur noch langsam ab. Bei 1.500 Ladepunkten beträgt die Gleichzeitigkeit in der Basis-Variante ca. 0,12.

Zusätzlich muss bei der Netzdimensionierung die zeitliche Korrelation des Lastbeitrags durch Ladevorgänge mit der sonstigen Last beachtet werden. Aus dem verwendeten Tagesnutzungsprofil lässt sich schließen, dass die meisten Ladevorgänge zwischen 16 und 18 Uhr beginnen. Angesichts von Ladedauern im Stundenbereich fällt der durch Ladevorgänge verursachte Leistungsbeitrag mit der Abendspitze der sonstigen Haushaltslast zusammen und erhöht damit in Netzbereichen mit überwiegendem Haushaltsnachfrageprofil die zeitgleiche Höchstlast praktisch vollständig um diesen Leistungsbeitrag.

- **Sensitivität Gebietstypen:** Neben der Basis-Variante, die einen vorstädtischen Gebietstyp repräsentiert, werden ein großstädtischer und ein dörflicher Gebietstyp betrachtet. In großstädtischen Gebieten sind die Tageswegstrecken und spezifischen Verbrauchswerte und somit auch die Menge an nachzuladender Energie und die Ladedauer im Mittel geringer als in vorstädtischen Gebieten. Beim dörflichen Gebietstyp verhält es sich umgekehrt. Mit sinkender Ladedauer reduziert sich bei gleichbleibender Anzahl und spezifischer Leistung der Ladepunkte die Wahrscheinlichkeit, dass Ladepunkte gleichzeitig genutzt werden, sodass sich in großstädtischen Gebieten ein geringerer und in dörflichen Gebieten ein höherer Gleichzeitigkeitsfaktor ergibt als in der Basis-Variante. Die resultierenden Leistungsbeiträge der Ladepunkte liegen beim großstädtischen Gebietstyp um rund 20 % niedriger und beim dörflichen um rund 20 % höher als beim vorstädtischen Gebietstyp.
- **Sensitivität Leistung des Ladepunkts:** Die Ladedauer hängt naturgemäß stark von der Leistung der Ladepunkte ab. Um deren Einfluss auf Gleichzeitigkeiten und Lastbeiträge zu quantifizieren, werden neben der in der Basis-Variante unterstellten Leistung von 11 kW (dreiphasige Ladung mit 16 A) die Ladeleistungen 3,7 kW (einphasige Ladung mit 16 A) sowie 22 kW (dreiphasige Ladung mit 32 A) angesetzt. Hierbei zeigt sich erwartungsgemäß, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor bei einer Ladeleistung von 3,7 kW deutlich höher und bei einer Ladeleistung von 22 kW deutlich niedriger ist als in der Basis-Variante. Bei 150 Ladepunkten beträgt er bei 3,7 kW etwa 0,31 und bei 22 kW ca. 0,12 gegenüber ca. 0,17 in der Basis-Variante (11 kW). Bei kleineren Kollektiven ist der Gleichzeitigkeitsfaktor höher und beträgt bei 20 Ladepunkten bei 3,7 kW etwa 0,5 und bei 22 kW ca. 0,3 gegenüber ca. 0,35 in der Basis-Variante (11 kW). Bei Betrachtung der resultierenden Leistungsbeiträge kehren sich die Verhältnisse zwischen den drei Varianten um: Der Leistungsbeitrag von 150 Ladepunkten ist bei einer Ladeleistung von 22 kW mit knapp 400 kW mehr als doppelt so hoch wie bei einer Ladeleistung von 3,7 kW mit gut 170 kW; in der Basis-Variante (11 kW Ladeleistung) beträgt er 286 kW. Bei kleineren Kollektiven verstärkt sich diese Spreizung weiter. Der Leistungsbeitrag von 20 Ladepunkten ist bei einer Ladeleistung von 22 kW mit gut 130 kW mehr als dreimal so hoch wie bei einer Ladeleistung von 3,7 kW mit knapp 40 kW; in der Basis-Variante (11 kW Ladeleistung) beträgt er 77 kW.
- **Sensitivität Ladeverhalten:** Die durchschnittliche Dauer von Ladevorgängen hängt auch von deren Häufigkeit ab. Je weiter die zeitlichen Abstände zwischen den Ladevorgängen, desto länger dauern diese (bei unverändertem Mobilitätsverhalten), aber desto geringer wird auch die Zahl der Ladevorgänge pro Tag. Die Gleichzeitigkeit wird bei Änderungen der Ladehäufigkeit somit durch zwei gegenläufige Effekte beeinflusst. Es zeigt sich, dass sich die Wirkungen dieser Effekte weitgehend gegenseitig aufheben. Der resultierende Leistungsbeitrag liegt bei der als „Tanken“ bezeichneten Variante, bei der Fahrzeuge erst bei Unterschreiten einer definierten Reichweitschwelle geladen werden, bei 150 Ladepunkten nur um ca. 10 % niedriger als bei der als „Laden“ bezeichneten Verhaltensweise, die in der Basis-Variante unterstellt wird. Die betrachteten Unterschiede im Ladeverhalten haben somit nur relativ geringe Auswirkungen auf die untersuchten Ergebnisgrößen.
- **Sensitivität Laden vor Abfahrt:** Insbesondere bei kalten Außentemperaturen ist es vorteilhaft, den Ladevorgang nicht direkt nach Abschluss der letzten Fahrt des Tages zu starten, sondern erst so spät, dass die Batterien unmittelbar vor Abfahrt vollständig geladen sind. Die Batterien sind dann bereits vorgewärmt und damit leistungsfähiger. Wiesen die Abfahrtszeiten die gleiche zeitliche Verteilung auf wie die Ankunftszeiten, so hätte eine solche Änderung des Ladeverhaltens keine Auswirkungen auf

Gleichzeitigkeiten und Leistungsbeiträge. Allerdings zeigt die Auswertung von Mobilitätsdaten, dass die Abfahrten am Morgen in einem deutlich engeren Zeitfenster erfolgen als die Ankünfte am Nachmittag und Abend. Durch die Konzentration der Abfahrten auf wenige Stunden synchronisieren sich die Ladevorgänge naturgemäß stärker. Im Vergleich zur Basis-Variante nehmen bei dieser Variante des Ladeverhaltens der Gleichzeitigkeitsfaktor und der Leistungsbeitrag bei 150 Ladepunkten ungefähr um ein Drittel und bei 20 Ladepunkten um knapp 30 % zu.

- **Exkurs Ladesteuerung:** Da die Ankunftszeiten und damit auch Ladevorgänge tendenziell mit der Spitzenlast von Haushalten zusammenfallen, kann durch den zusätzlichen Leistungsbeitrag von Elektrofahrzeugen Netzausbaubedarf entstehen. Vielfach wird daher in der aktuellen Diskussion gefordert, das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen netzdienlich zu steuern. Zugleich hat die Flexibilität der Ladevorgänge auch für den systemweiten Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch einen Wert, der durch marktorientierte Steuerungsmechanismen realisiert werden kann. Es ist daher absehbar, dass verschiedene Steuerungsmechanismen – auch in Kombination miteinander – zur Anwendung kommen werden, über deren Gestaltung aktuell noch intensiv diskutiert wird. Diese Studie fokussiert zwar primär auf Gleichzeitigkeiten, die infolge natürlicher, also ungesteuerter Ladevorgänge entstehen. Als Exkurs wurden jedoch mit dem Simulationsmodell zusätzlich auch Analysen durchgeführt, die bestimmte Ladesteuerungsmechanismen berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Analysen sollen beispielhaft die Wirkungsweise dieser Mechanismen aufzeigen. Die Analysen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, und auch die verwendeten Parametrierungen sind rein exemplarisch und nicht als Empfehlungen anzusehen. Eine Möglichkeit für eine Ladesteuerung wäre die Einführung von **Sperrzeiten**, in denen Ladevorgänge gedrosselt oder vollständig unterbunden werden. Alternativ könnten z. B. Preisanreize zur Verlagerung von **Ladevorgängen** in Schwachlastzeiten gesetzt werden.

Durch **Sperrzeiten** kann der von Ladevorgängen hervorgerufene Lastbeitrag während der Sperrzeiten reduziert werden. Nach dem Ende der Sperrzeiten werden die unterbrochenen bzw. aufgeschobenen Ladevorgänge jedoch zumeist mit hoher Gleichzeitigkeit wieder aufgenommen. Durch diesen Synchronisationseffekt können je nach Art der Umsetzung der Sperrzeit nicht nur insgesamt geringere, sondern mitunter auch signifikant höhere Leistungsbeiträge entstehen als bei ungesteuertem Ladeverhalten.

Für die Variante einer Anreizsetzung zur **Verschiebung des Ladebeginns** wird hier beispielhaft die Einführung einer „Happy Hour“ mit reduzierten Ladestrompreisen untersucht. Bei einer perfekten Reaktion auf dieses Preissignal würden alle Fahrzeuge, die freie Batteriekapazitäten aufweisen und an ihren Ladepunkt angeschlossen sind, zu Beginn der „Happy Hour“ gleichzeitig mit dem Ladevorgang beginnen. Damit würden sich nahezu über den gesamten betrachteten Bereich der Ladepunktzahlen Gleichzeitigkeiten von über 0,8 ergeben. Bei einer derartig hohen Gleichzeitigkeit dürfte dieser Lastfall bereits unabhängig von der sonstigen Last auslegungsrelevant für die Netze sein. Wird wie bei der Untersuchung des Ladeverhaltens "Tanken" angenommen, dass Fahrzeuge erst bei Unterschreitung einer definierten Mindest-Reichweite geladen werden, so relativiert sich die durch das Preissignal ausgelöste Erhöhung der Gleichzeitigkeit sehr deutlich.

Je nach Art eines Steuerungssignals (netzdienlich oder marktorientiert), dessen Parametrierung und dem Ausmaß der Reaktion der Fahrzeugnutzer können sich Gleichzeitigkeiten ergeben, die in positiver oder negativer Richtung deutlich von den Gleichzeitigkeiten abweichen, die sich bei ungesteuertem Ladeverhalten ergeben.

Diese (erwartungskonformen) Ergebnisse implizieren nicht per se, dass bei der Netzauslegung die Wirkungen bestimmter möglicher Steuerungsmechanismen bereits berücksichtigt werden sollten. Es könnte vielmehr Gegenstand einer Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen für die Netzauslegung sein, die Höhe der im Planungsstadium (auch heute schon üblicherweise) berücksichtigten Leistungsreserven mit Blick auf die Wirkungen bestimmter Steuerungsmechanismen anzupassen. In jedem Fall bestätigen diese Ergebnisse aber, dass Ladesteuerungen durch Vorgaben oder Anreize *betrieblich* zu erhöhten Netzbelastungen und ggf. Netzengpässen führen können wie auch zu deren Abschwächung beitragen können.

6 Literaturverzeichnis

1. **FGH.** *Metastudie Forschungsüberblick Netzintegration Elektromobilität.* 2018.
2. **VDE FNN.** *Leitfaden Netzintegration E-Mobilität.* 2019.
3. **Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Regulatory Assistance Project (RAP).** *Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus.* 2019.
4. **Infas, DLR, IVT und infas 360.** *Mobilität in Deutschland (im Auftrag des BMVI).* 2018.
5. **VDEW.** *Repräsentative VDEW-Lastprofile.* 1999.
6. **Netze BW GmbH.** *Die E-Mobility-Allee.* 2019.
7. **Krafftahrt-Bundesamt.** *Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK), Zeitreihen 2016-2020.* 2021.

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Forum Netztechnik/Netzbetrieb im
VDE (FNN)
Bismarckstraße 33
10625 Berlin
Tel. +49 30 383868-70