



© VDE FNN

# Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Ladevorgänge an privaten Ladepunkten

Wissenschaftliche Untersuchung zur Gleichzeitigkeit von  
ungesteuerten Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen

Oktober 2021

# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>6</b>  |
| 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         |
| <b>2</b> | <b>Vorgehensweise, Methodik und Daten</b>                            | <b>8</b>  |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>Kernergebnisse der Simulationen</b>                               | <b>20</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung der Netzplanung</b> | <b>31</b> |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>                        | <b>32</b> |
| <b>6</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>35</b> |

# 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.