

Intelligentes Laden

Finanzielle Einsparpotentiale und Strommarkt-Erlöse
durch flexibles und bidirektionales Laden von Elektroautos

4. Februar 2025

Im Auftrag von Rabot Energy, eine Marke der RABOT Charge GmbH

Autoren:

Clemens Lohr (lohr@neon.energy)

Anselm Eicke (eicke@neon.energy)

Lion Hirth (hirth@neon.energy)

Intelligentes Laden

Finanzielle Einsparpotentiale und Strommarkt-Erlöse durch flexibles und bidirektionales Laden von Elektroautos

Diese Studie ist verfügbar unter www.neon.energy/intelligentes-laden

Neon Neue Energieökonomik ist ein energiewirtschaftliches Beratungsunternehmen mit Sitz in Berlin. Als Boutique sind wir seit 2014 spezialisiert auf anspruchsvolle quantitative und ökonomisch-theoretische Analysen rund um den Strommarkt. Mit Beratungsprojekten, Studien und Schulungen unterstützen wir Entscheidungsträger bei den aktuellen Herausforderungen und Zukunftsfragen der Energiewende. Zu unseren Kunden gehören Regierungen, Regulierungsbehörden, Netzbetreiber, Energieversorger und Stromhändler aus Deutschland und Europa.

Kontakt:

Neon Neue Energieökonomik GmbH
Karl-Marx-Platz 12
12043 Berlin

Prof. Dr. Lion Hirth
hirth@neon.energy
+49 157-55 199 715



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Methodik	6
2.1 Annahmen zum Elektroauto.....	6
2.2 Ladestrategien.....	7
2.3 Stromtarife und Preiskomponenten	8
3 Einsparpotentiale	11
3.1 Einsparpotentiale durch intelligentes Laden	11
3.1.1 Bestehende Einsparpotentiale	12
3.1.2 Zukünftig denkbare Einsparpotentiale	13
3.2 Einsparpotentiale mit bidirektionalem Laden	15
3.3 Einordnung	17
3.3.1 Sonstige Kosten und Erlöse.....	17
3.3.2 Vergleich	17
4 Robustheit der Ergebnisse	19
4.1 Keine Flexibilitätseinschränkungen	19
4.2 Anderes Verteilnetz	20
4.3 Anderes Fahrprofil	21
5 Fazit	23
6 Literaturübersicht	24

Zusammenfassung

Intelligentes Laden. Elektrofahrzeuge benötigen im Schnitt nur eine halbe Stunde am Tag, um ihre Batterien wieder aufzuladen. Wird dieser Zeitpunkt intelligent gewählt, kann man von günstigen Strompreisen profitieren, beispielsweise in der späten Nacht oder mittags. Dies ist bereits heute mit einem dynamischen Stromtarif möglich. Darüber hinaus werden zum 1. April dieses Jahres zeitvariable Netzentgelte eingeführt, so dass das Optimierungspotential nochmal steigt. Langfristig bieten sich weitere Erlöschancen durch bidirektionales Laden, also die Rückspeisung zuvor gespeicherten Stroms ins Netz bei sehr hohen Strompreisen oder extremer Netzbelastung. Intelligentes Laden lohnt sich dabei nicht nur für Verbraucher, sondern nützt auch dem Stromsystem, da dadurch teure Stromerzeugung vermieden, mehr Wind- und Solarstrom genutzt und Netze entlastet werden.

Diese Studie. Diese Kurzstudie untersucht das Einsparpotential von intelligentem Laden von Elektroautos in verschiedenen Konstellationen. Unsere Analyse basiert auf einer viertelstundenscharfen Optimierung des Ladeverhaltens. Dies geschieht, indem Ladezeitpunkte so verschoben werden, dass die ohnehin vorhandene Flexibilität der Batterie optimal ausgenutzt wird – ohne Fahrverzicht oder Zusatzinvestitionen. Dabei untersuchen wir die Einsparungen, die mit den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen erreichbar sind, sowie die zusätzlichen Vorteile, die durch zukünftige regulatorische Anpassungen wie bidirektionales Laden möglich werden. Wir ermitteln dabei die Einsparung durch das intelligente Laden selbst; darüber hinaus sind dynamische Stromtarife im Vergleich zu Festpreistarifen generell günstiger (die Ersparnis für den Verzicht auf eine Preisgarantie), was wir hier jedoch nicht berücksichtigt haben. Synergieeffekte durch lokale Solarstromerzeugung und sonstigen flexiblen Verbrauch im Haushalt vernachlässigen wir ebenfalls.

Ergebnisse. Unsere Modellierungsergebnisse zeigen große Einsparpotentiale auf. Intelligentes Laden auf Basis eines einfachen dynamischen Stromtarifs senkt die Stromrechnung bereits um rund 50%. Kommen zeitvariable Netzentgelte und andere Strompreiskomponenten hinzu, sinken die Kosten um mehr als 80%. Mit bidirektionalem Laden kann man sogar netto Geld verdienen, also eine negative Stromrechnung realisieren. Vergleichbare Ergebnisse findet man für verschieden Autotypen, Fahrprofile und Verteilnetze. Dynamische Stromtarife erlauben auch Haushalten ohne eigene PV-Anlage von günstigen Strompreisen zu profitieren, so dass Elektromobilität für eine breitere Zielgruppe attraktiver wird.

Empfehlungen. Um die hohen Einsparpotentiale zu realisieren, braucht es eine flächendeckende Versorgung mit günstigen Smart Metern. Damit dezentrale Flexibilität systematisch netzdienlich wird, sollten außerdem zeitvariable Netzentgelte entbürokratisiert und weiterentwickelt werden. Mittelfristig sollte Politik und Regulierung bidirektionales Laden ermöglichen.

1 Einleitung

Elektrifizierung. Mit der Elektrifizierung von Mobilität und Wärmesektor halten neue Stromverbraucher wie Elektroautos und Wärmepumpen zunehmend Einzug in private Haushalte. Eine hohe Gleichzeitigkeit ihres Betriebs kann Verbrauchsspitzen erzeugen, die eine erhebliche Herausforderung für die Erzeugungsseite und den Netzbetrieb darstellen. Gleichzeitig bieten die zusätzlichen Speicher, die durch diese Technologien in das Energiesystem eingebracht werden, ein enormes Flexibilitätspotenzial. Durch eine gezielte zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs lassen sich Betriebskosten erheblich senken, ohne dabei den Komfort der Nutzer einzuschränken.

Intelligentes Laden. Elektrofahrzeuge werden im Durchschnitt weniger als eine Stunde am Tag bewegt und benötigen nur einen Bruchteil der verbleibenden Zeit, um ihre Batterien wieder aufzuladen. Der Zeitpunkt des Ladens kann also relativ einfach verschoben werden und dabei von günstigeren Strompreisen profitiert werden. Beispielsweise kann eine Verschiebung des Ladevorgangs von den Abendstunden auf die spätere Nacht, insbesondere im Winter, erhebliche Kosteneinsparungen erwirken. Ähnliches gilt, bisher vor allem in den Sommermonaten, für eine Verschiebung in die frühen Nachmittagsstunden. Darüber hinaus bietet bidirektionales Laden – also die Rückspeisung zuvor gespeicherten Stroms ins Netz – zusätzliche Erlöschancen. Dies könnte beispielsweise bei sehr hohen Strompreisen oder einer extremen Netzbelastung relevant werden.

Dynamische Stromtarife. Grundvoraussetzung für solche Einsparungen sind zeitvariable Stromtarife, die – im Gegensatz zu Festpreistarifen – echte Knappheitssignale aus der Stromerzeugung und der Netzkapazität an die Verbraucher weitergeben. Endkunden können bereits heute von stündlich aktualisierten Großhandelspreisen profitieren. Ab April werden Verteilnetzbetreiber zudem verpflichtet, zeitvariable Netzentgelte anzubieten. Voraussetzung dafür ist allerdings eine zeitlich aufgelöste Messung des Stromverbrauchs, die in den meisten Haushalten den Einsatz neuer Zähler wie Smart Meter erfordert.

Diese Studie. In dieser Kurzstudie analysieren wir das Einsparpotential durch intelligentes Laden in Verbindung mit verschiedenen zeitvariablen Stromtarifen. Dieses ermitteln wir mithilfe eines Optimierungsmodells, aus dem ein viertelstundenscharfes Ladeprofil hervorgeht. Ziel der Optimierung ist es, die Stromrechnung aus Verbraucherperspektive zu minimieren. Dabei beleuchten wir sowohl die Einsparungen, die mit im aktuellen Rechtsrahmen vorgesehenen Stromtarifen möglich sind, als auch die zusätzlichen Vorteile künftiger regulatorischer Anpassungen. Zu diesen gehört etwa die Einführung stufenloser, zeitvariabler Netzentgelte oder zeitvariabler Steuern, Abgaben und Umlagen. Zudem untersuchen wir, welchen Mehrwert bidirektionales Laden bietet, um Kosten weiter zu reduzieren und die Flexibilität im Stromsystem zu erhöhen.

2 Methodik

Grundlegendes Vorgehen. Wir schätzen die Einsparpotentiale beim flexiblen Laden eines Batterie-elektrischen Autos ab. Als Einsparpotential definieren wir die Reduktion der Stromrechnung, die durch eine zeitliche Verschiebung des Ladens gegenüber sofortigem Laden erreicht werden kann. Die Lastverschiebung erfolgt dabei lediglich unter Ausnutzung der vorhandenen Batterie, also ohne Zusatzinvestitionen. Dabei beschränken wir uns auf die Versorgung mit Netzstrom und vernachlässigen lokale Erzeugung (z.B. PV-Anlagen) und den sonstigen Verbrauch im Haushalt.

Optimierung. Für die Berechnung verwenden wir eine viertelstundenscharfe Optimierung des Ladeverhaltens basierend auf historischen Zeitreihen für das Jahr 2023. Grundannahme der Optimierung ist, dass das Fahrprofil ohne Einschränkung realisiert werden kann. Entsprechend muss das Elektroauto vor jeder Fahrt ausreichend geladen werden. Ziel ist es, die Flexibilität der Batterie auszunutzen und die Ladezeitpunkte so zu verschieben, dass die Strombezugskosten minimiert werden. Die optimale Ladestrategie hängt dabei vom Stromtarif ab.

2.1 ANNAHMEN ZUM ELEKTROAUTO

Fahrprofil. Tabelle 1 fasst die technischen Daten des Elektroautos zusammen. Das Verbrauchsprofil entspricht dem einer Berufspendlerin mit einem VW ID 3 Pure von [Gaete-Morales et al. \(2021\)](#). Die Fahrleistung von rund 10,442 km liegt laut Mobilitätspanel des KIT ([Ecke et al., 2023](#)) leicht unter dem bundesweiten Durchschnitt von 11,676 km. Rund 72% der dafür notwendigen elektrischen Energie werden dabei über die eigene Wallbox bereitgestellt, wodurch sich ein signifikantes Verschiebepotential der Ladezeitpunkte ergibt.

Tabelle 1. Übersicht der technischen Daten des Elektroautos (Standard-Fall)

	Standard-Fall
Speichergröße	45 kWh
Maximale Ladeleistung	11 kW
Jahresstromverbrauch EV	2180 kWh
Jährliche Fahrleistung	10442 km
Ladeverfügbarkeit	75%
Ladeanteil außerhalb des Haushalts	28%
Ladeverluste der Batterie	je 5% für Laden & Entladen
Batteriedegradationskosten	5 ct/kWh

Technische Beschränkungen. Das Optimierungsmodell berücksichtigt die physikalischen Grenzen der Batterie. Laden ist nur möglich, wenn das Elektroauto zu Hause steht und wird außerdem durch die vorhandene maximale Ladeleistung der Wallbox und die Speicherkapazität der Batterie eingeschränkt. Weiterhin ist das Laden und Entladen der Batterie verlustbehaftet. Ladevorgänge außerhalb des eigenen Zuhauses (z.B. an öffentlichen Ladepunkten) geben wir aus Konsistenzgründen als Ladevorgänge modellexogen vor. Die dabei entstehenden Kosten fließen nicht in die von uns analysierte Stromrechnung ein, da sie unabhängig von der Ladestrategie anfallen.

Flexibilitätseinschränkungen. Um Überoptimieren zu vermeiden und der Möglichkeit spontaner Fahrten Rechnung zu tragen, schränken wir die Optimierung der Batterie weiter ein. So muss der Ladegrad der Batterie jeden Morgen um 6 Uhr bei mindestens 60% liegen. Damit wird insbesondere verhindert, dass die Batterie des Elektroautos regelmäßig lediglich so stark geladen wird, dass eine Fahrt gerade noch so beendet werden kann. Weiterhin limitieren wir beim bidirektionalen Laden die Entladetiefe auf mindestens 20% der Batteriespeicherkapazität. Den Einfluss dieser Flexibilitätseinschränkungen analysieren wir in Abschnitt 4.1.

2.2 LADESTRATEGIEN

Intelligentes Laden. Um den Mehrwert von intelligentem Laden zu bestimmen, vergleichen wir die Stromkosten des optimierten Ladens mit einer konventionellen (nicht intelligenten) Ladestrategie. Bei diesem „sofortigem Laden“ beginnt der Ladevorgang nach einer Fahrt direkt mit dem Anschluss des Elektroautos an die Wallbox. Der Ladevorgang läuft bei maximaler Anschlussleistung, bis die Batterie vollständig geladen ist. Als intelligentes Laden bezeichnen wir die für einen gegebenen Stromtarif optimale Ladestrategie, welche die oft langen Standzeiten zwischen zwei Fahrten ausnutzt. Dabei wird mit dem Laden auf einen günstigen Strompreis gewartet und damit die Last in einen späteren Zeitraum verschoben.

Bidirektionales Laden. Neben der Verschiebung des Ladezeitpunkts, die bereits heute möglich ist, sollen zukünftig auch die Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit die Rückspeisung von Strom ins Netz, dem bidirektionales Laden, vergütet werden kann. Dabei können für den eingespeisten Strom Zusatzerlöse in Höhe des Großhandelspreises erzielt werden. Beim Entladen berücksichtigen wir darüber hinaus die zusätzlich durchgespeicherte Energie und die damit verbundene geringere Zyklenzahl für mögliche Fahrten in Form von Degradationskosten pauschal in Höhe von 5 ct/kWh (Sagaria et al., 2025). Ladegradspezifische Degradation und Selbstentladung sind nicht im Modell abgebildet.

2.3 STROMTARIFE UND PREISKOMPONENTEN

Stromtarife und Preiskomponenten. Die Kosten für den Strombezug eines Haushalts ergeben sich aus dem Ladeprofil und dem ausgewählten Stromtarif. Dieser setzt sich aus drei Preiskomponenten zusammen:

- Großhandelspreis für die Stromerzeugung (exkl. weiterer Beschaffungskosten)
- Netzentgelten
- Steuern, Abgaben und Umlagen

Für die drei Preiskomponenten gibt es unterschiedliche Ausgestaltungs-Optionen (Tabelle 2). Deren Kombination ermöglicht eine Vielzahl verschiedener Stromtarife. Sämtliche Zeitreihen für die Komponenten basieren auf historischen Daten aus dem Jahr 2023. Die Höhe einzelner Komponenten wurde so gewählt, dass die Stromrechnung bei sofortigem Laden identisch ist.

Tabelle 2. Ausgestaltungs-Optionen der Preiskomponenten von Stromtarifen

Preiskomponente	Ausgestaltungs-Optionen
Strompreis (Erzeugung)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitinvariant • Day-ahead • Intraday
Netzentgelte (Netz)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitinvariant • Zeitvariabel mit 3 Stufen (§14a, Modul 3) • Zeitvariables Netzentgelt mit 8760 Stufen (nach Neon-Methode)
Steuern, Abgaben und Umlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitinvariant • Zeitvariabel (skaliert mit Day-ahead Preis)

Stromerzeugungskosten. Die Flexibilisierung des Ladevorgangs auf Basis von Großhandelsstrompreisen ist bereits heute möglich. Ein darauf optimiertes Laden verschiebt den Ladevorgang, soweit technisch und ohne Nutzungseinschränkungen möglich, in die Stunden mit den niedrigsten Großhandelspreisen. Die Day-ahead Strompreise sind nach der Day-ahead Auktion am Vortag um 12 Uhr bekannt. Eine darüberhinausgehende Optimierung am kontinuierlichen Intraday-Markt ermöglicht Ladevorgänge in besonders günstige Viertelstunden verschieben zu können, was sich aufgrund der höheren Preisvolatilität im Intraday-Markt im Vergleich zum Day-ahead-Markt noch stärker lohnt. Wir bilden diesen Aspekt in Form von ID1-Preisen im Model ab.

Realoption. Mit dem Beginn des Intraday-Handels besteht die Möglichkeit, Strom kontinuierlich zu kaufen und zu verkaufen und damit weitere Erlöse zu erzielen. Durch den kontinuierlichen Handel kann von Preisschwankungen über die Zeitspanne des Intradayhandels profitiert werden. Das folgende Beispiel verdeutlicht dies. Um 16:00 Uhr ist die Viertelstunde mit den niedrigsten Intraday-Preisen in der folgenden Nacht von 3:00 – 3:15 Uhr. Das Beladen des Autos würde für diesen Zeitpunkt angesetzt und entsprechend Strom eingekauft. Wenn zu einem späteren Zeitpunkt der Intraday-Preis für die Viertelstunde von 4:15 – 4:30 Uhr die günstigste Viertelstunde ist, würde der zuvor beschaffte Strom wieder

verkauft und günstiger für die neue Viertelstunde eingekauft werden. Die Batterie besitzt also einen Optionswert. Da wir diese Realloption in der Modellierung nicht berücksichtigen, unterschätzen wir die insgesamt möglichen Einsparpotentiale am Intraday-Markt.

Zeitvariable Netzentgelte. Ab April 2025 müssen alle Verteilnetzbetreiber nach §14a des EnWG im Rahmen des sog. Modul 3 der entsprechenden BNetzA-Festlegung ein zeitvariables Netzentgelt anbieten. Dazu hat die BNetzA einige Vorgaben gemacht: Vorgesehen sind mehrere Zeitfenster mit drei Preisstufen der örtlich geltenden Netzentgelte. Die Zeitfenster und Preisstufen werden kalenderjährlich festgelegt und gelten für das gesamte Netzgebiet. Anhand historischer Einspeise- und Verbrauchslastgänge für die Niederspannungsebene verschiedener Verteilnetzbetreiber schätzen wir darüber hinaus eine viertelstündliche Zeitreihe der Netzkosten als stufenlose zeitvariable Netzentgelte ab (Neon, 2024). Diese können in Netzgebieten mit hohen Erzeugungsüberschüssen in einzelnen Stunden auch negativ sein, so dass es auch Anreize für einen zusätzlichen, netzdienlichen Verbrauch geben kann. Sowohl die Höhe der zeitinvarianten als auch die der stufenlosen zeitvariablen Netzentgelte ermitteln wir entsprechend der resultierenden Netzentgelte, die bei sofortigem Laden bei zeitvariablen Netzentgelten mit drei Stufen anfallen. Wir verwenden dafür zunächst beispielhaft die drei Preisstufen von Stromnetz Berlin als verbrauchsdominiertes Verteilnetz. In Abschnitt 4.2 analysieren wir darüber hinaus auch das Einsparpotential im LEW Verteilnetz, welches hohe PV-Erzeugung aufweist.

Steuern, Abgaben und Umlagen. Steuern, Abgaben und Umlagen auf den Stromverbrauch sind aktuell, mit Ausnahme der Mehrwertsteuer, volumetrisch und zeitinvariant und lagen im Jahr 2023 bei rund 5,1 ct/kWh (BDEW, 2024). Wir ermitteln zusätzliche Einsparpotentiale, die sich aus der Einführung zeitvariabler Steuern, Abgaben und Umlagen ergeben. Dazu untersuchen wir den politisch diskutierten Fall, dass diese Zahlungen proportional zum Day-ahead-Strompreis skalieren („ad valorem“-Steuern). Dabei schließen wir Auszahlungen an Verbraucher bei negativen Strompreisen aus. Die Höhe der Zahlungen bei positiven Strompreisen entsprechen bei sofortigem Laden wie bei den anderen Preiskomponenten den bisherigen zeitinvarianten Zahlungen. Daraus ergibt sich bei einem Day-ahead-Preis von 10 ct/kWh ein Betrag von rund 4,6 ct/kWh. Liegt der Day-ahead-Preis bei 0 ct/kWh oder darunter, fallen auch keine Steuern, Abgaben und Umlagen an.

Stromtarif-Szenarien. Wir vergleichen die Einsparpotentiale der Ladestrategien in Abhängigkeit verschiedener Stromtarife. Neben dem zeitinvarianten Festpreistarif in Höhe von 30 ct/kWh (inkl. Mehrwertsteuer) betrachten wir dafür (sequenziell) folgende Ausgestaltungsoptionen der Preiskomponenten, die eine zunehmende Variabilität des Stromtarifs bedeuten:

1. Optimierung auf Basis des Day-ahead Strompreises
2. Optimierung auf Basis des Intraday-Preises (ID1)
3. Zusätzlich: zeitvariable Netzentgelte nach §14a des EnWG Modul 3 (mit drei Entgeltstufen)
4. Zusätzlich: optimale zeitvariable Netzentgelte (stufenlos)
5. Zusätzlich: Einführung von zeitvariablen Abgaben, Steuern und Umlagen

Den Preisverlauf für die Stromtarif-Szenarien 1) und 5) im Vergleich zum Festpreis zeigt Abbildung 1 beispielhaft für den 31. Mai 2023. Als sonniger Tag lagen hier die Strompreise meist unter dem Durchschnitt.

Stromtarife am 31. Mai 2023

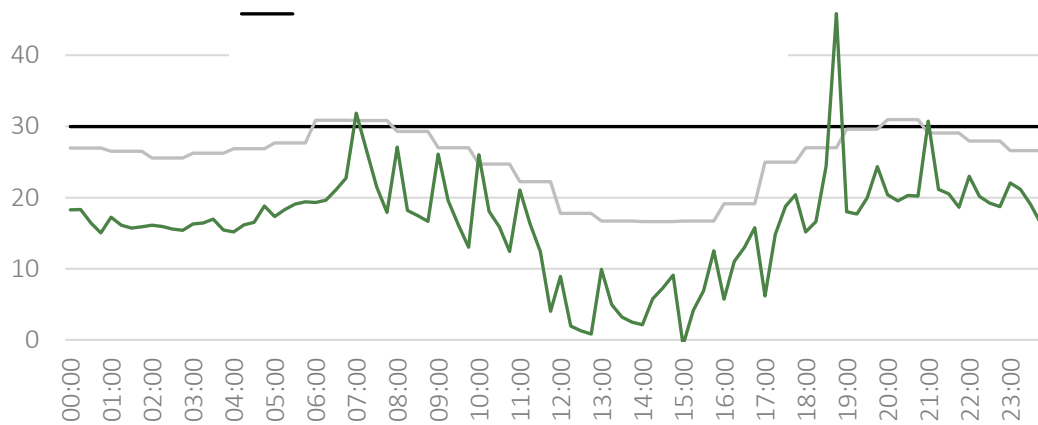


Abbildung 1: Strombezugspreise (inkl. Mehrwertsteuer) für drei exemplarische Stromtarife für den 31. Mai 2023. Die dynamischen Stromtarife bieten gegenüber dem Festpreistarif die Möglichkeit, eine Ladezeitraum mit besonders günstigen Preisen zu wählen.

Die Stromtarife in dieser Studie liegen insgesamt unter den üblichen Endkundentarifen, da wir Beschaffungs- und Vertriebskosten über die Großhandelspreise hinaus wie z.B. Risikoabsicherung, Vermarktungs- und Administrationskosten unberücksichtigt lassen. Weiterhin verzichten wir auf die in Tarifen üblichen Grundpreise, da diese von Verbrauchern auch ohne Elektroauto gezahlt werden müssen. Sämtliche unberücksichtigte Bestandteile sind jedoch pauschal, setzen daher keine Flexibilisierungsanreize und haben entsprechend keinen Einfluss auf das Einsparpotenzial von intelligentem Laden.

3 Einsparpotentiale

In diesem Kapitel analysieren wir die quantitativen Einsparpotentiale, die sich durch flexibles Laden von Elektroautos erschließen lassen. Wir unterscheiden dabei Einsparungen, die mit den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen erreichbar sind, sowie die zusätzlichen Vorteile, die durch zukünftige regulatorische Anpassungen wie stufenlose, zeitvariable Netzentgelte oder bidirektionales Laden möglich werden.

3.1 EINSARPOTENTIALE DURCH INTELLIGENTES LADEN

Referenz-Stromrechnung. Die Stromrechnung bei sofortigem Laden (Referenz) beläuft sich auf 475 € pro Jahr (Abbildung 2). Diese berechnet sich aus der zu Hause geladenen Strommenge (1584 kWh) und dem Festpreis von 30 ct/kWh. Der Festpreis setzt sich zusammen aus 11,1 ct/kWh für die Stromerzeugung, 9,0 ct/kWh für Netzentgelte, 5,1 ct/kWh für Stromsteuer, Abgaben und Umlagen sowie zusätzlich 19% Mehrwertsteuer. Werden alle Steuern, Abgaben und Umlagen zusammengerechnet, tragen die drei Komponenten ähnlich zur Stromrechnung bei. Diese Kosten bleiben bei sofortigem Laden unabhängig vom gewählten Stromtarif, da die Preiskomponenten entsprechend angepasst wurden, um eine einheitliche Basis zu gewährleisten. Im Festpreistarif gibt es keine Anreize zur Flexibilisierung des Ladeverhaltens, wodurch es keinen Hebel für intelligentes Laden gibt und die Stromrechnung entsprechend unverändert bei 475 € liegt. Je nach Ausgestaltung der (zeit-)dynamischen Stromtarife können jedoch mit Flexibilisierung deutliche Kosteneinsparungen gegenüber der Referenz-Stromrechnung erzielt werden.

Stromrechnung im Referenzfall

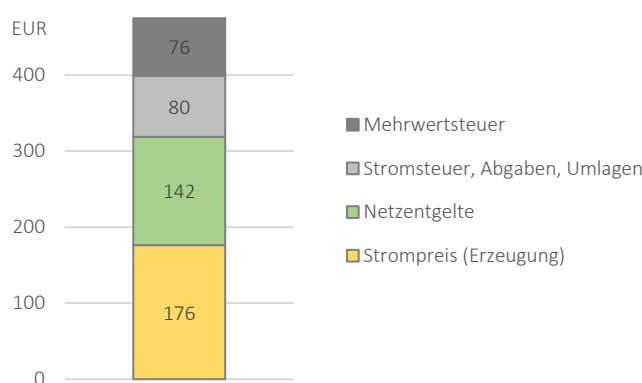


Abbildung 2: Stromrechnung aufgeteilt nach Preiskomponenten für den Festpreistarif oder bei Anwendung der Referenz-Ladestrategie (ohne Flexibilisierung) im Verteilnetz von Stromnetz Berlin.

3.1.1 Bestehende Einsparpotentiale

Intelligentes Laden bei Day-ahead-Preisen. Sind Haushalte mit stundenscharfen Zählern ausgestattet, können sie sich bereits heute mit dynamischen Stromtarifen versorgen lassen. So können bspw. Stromversorger die Day-ahead-Großhandelspreise an ihre Endkunden weitergeben, während die anderen Tarifbestandteile unverändert zeitinvariant bleiben. Ein solcher Stromtarif ermöglicht das Verschieben der Ladezeitpunkte in Stunden mit günstigem Börsenstrompreis. Abbildung 3 zeigt wie bei intelligentem Laden in dynamischen Stromtarifen die Ladevorgänge im Sommer in die frühen Nachmittagsstunden und im Winter in die Nacht verschoben werden, anstelle des sofortigen Ladens am Abend. Der nachmittägliche Ladezeitraum im Sommer mag angesichts des Pendlermobilitätsprofils verwundern. Da der tägliche Arbeitsweg allerdings nur einen Teil der Batteriekapazität beansprucht, kann mit dem Laden des Elektroautos oft auch auf Wochenenden oder andere freie Tage gewartet werden (an über 200 Tagen wird gar nicht geladen).

Durchschnittliche Ladeleistung: Sommer (links), Winter (rechts)

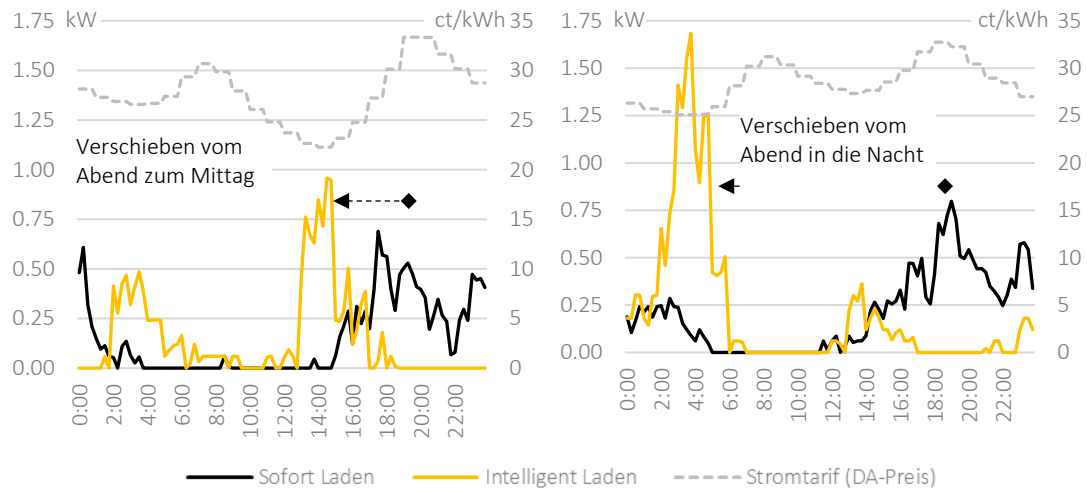


Abbildung 3: Durchschnittliche Ladeleistung (in kW) und Stromtarif (in ct/kWh) im Tagesverlauf gemittelt über den Zeitraum der Sommermonate (Apr. – Sep.) und Wintermonate (Okt. – Mrz.). Beim intelligenten Laden wird der Abend als Ladezeitraum aufgrund des hohen Strompreises weitestgehend gemieden. Stattdessen findet das Laden bevorzugt im Sommer am frühen Nachmittag und im Winter während der Nacht statt.

Einsparpotentiale. Die Einsparpotentiale durch Flexibilisierung des Ladeverhaltens steigen mit zunehmend variablem Stromtarif an (Abbildung 4). Bereits eine Weitergabe der Day-ahead-Preise ermöglicht mit intelligentem Laden Einsparungen in Höhe von 33% (156 € brutto p.a.) zu erzielen. Eine Optimierung anhand von Intraday-Preisen (ID1) generiert bereits Erlöse am Strommarkt und senkt damit die Stromrechnung weiter auf rund die Hälfte. Mit den ab April 2025 angebotenen zeitvariablen Netzentgelten mit drei Stufen nach EnWG §14a Modul 3 können auch die Netzentgeltkosten auf der Stromrechnung deutlich reduziert werden (ohne dabei die Erzeugungskosten signifikant zu erhöhen). Intelligentes Laden erlaubt also bereits im bestehenden Rechtsrahmen Einsparungen von 68% gegenüber sofortigem Laden.

Einsparpotentiale (Stromnetz Berlin)

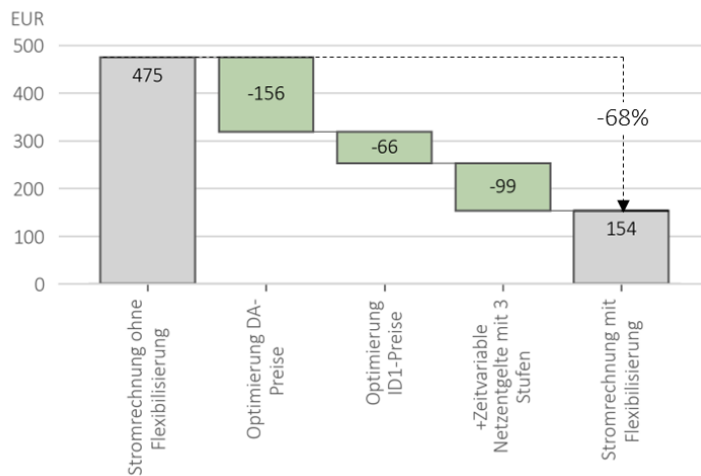


Abbildung 4: Einsparpotentiale (inkl. Mehrwertsteuer) im beschlossenen Rechtsrahmen für intelligentes Laden basierend auf den Netzentgelten von Stromnetz Berlin.

3.1.2 Zukünftig denkbare Einsparpotentiale

Zukünftige Maßnahmen. Über den bestehenden Rechtsrahmen hinaus sind noch weitere Maßnahmen denkbar, die zusätzliche Anreize für intelligentes Laden schaffen könnten. Dynamische Netzentgelte, die sich an der momentanen Netzsituation orientieren, könnten ein gezielteres und netzentlastendes Verhalten fördern. Zudem würde der Abbau zeitkonstanter Steuern, Abgaben und Umlagen ein unverzerrtes Reagieren auf Marktsignale ermöglichen. Wenn diese Änderungen im Stromtarif berücksichtigt werden, könnten Haushalte von weiteren Einsparpotenzialen profitieren.

Durchschnittliche Ladeleistung im Sommer

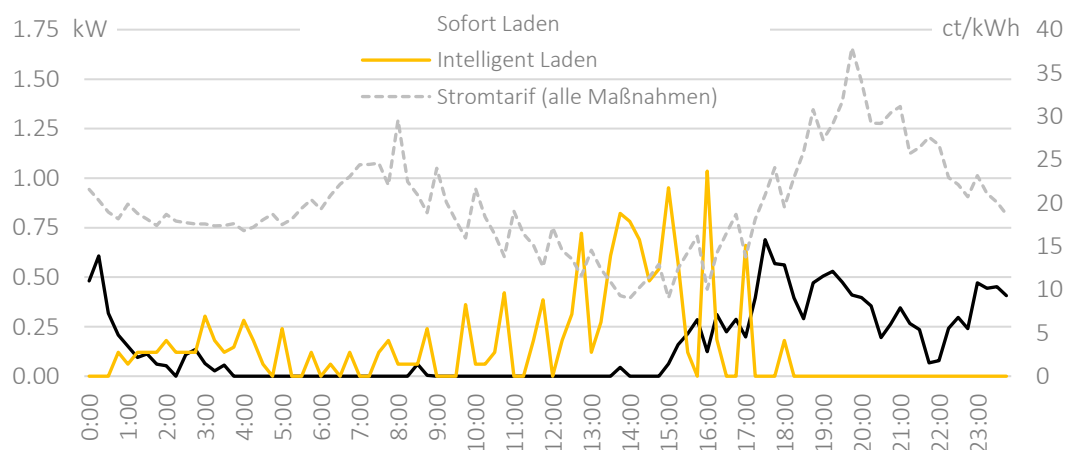


Abbildung 5: Durchschnittliche Ladeleistung (in kW) im Tagesverlauf für einen Stromtarif (in ct/kWh) mit maximaler Zeitvariabilität.

Intelligentes Laden bei starken Anreizen. Abbildung 5 zeigt den dynamischen Stromtarif mit Intraday-Preisen, zeitvariablen stufenlosen Netzentgelten und zeitvariablen Steuern, Abgaben und Umlagen in den Sommermonaten. Dieser weist auch im Durchschnitt neben tageszyklischem Tief am Mittag und Hoch am Abend signifikante innerstündliche Schwankungen auf, die sich aus den Intraday-Preisen ergeben. Diese hohe Preisvariabilität kann durch die grundsätzlich flexiblen Ladezeitpunkte ausgenutzt werden. Entsprechend weist auch ein optimiertes Ladeprofil starke und regelmäßige Schwankungen auf.

Einsparpotentiale (Stromnetz Berlin)

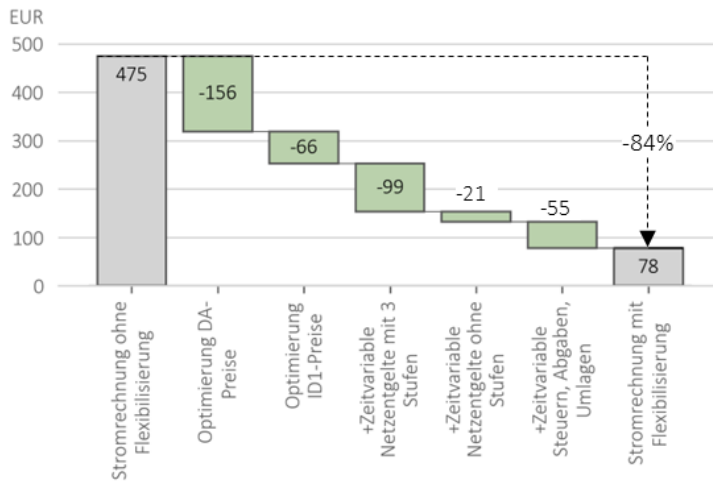


Abbildung 6: Einsparpotentiale für intelligentes Laden bei zukünftigen Anpassungen am regulatorischen Rahmen.

Einsparpotentiale. Mit der Einführung weiterer Maßnahmen kann die Stromrechnung weiter reduziert werden (Abbildung 6). Für das Stromnetz Berlin können die stufenlosen Netzentgelte jedoch lediglich weitere Einsparungen in Höhe von rund 21 € gegenüber jenen mit drei Stufen einbringen. Zeitvariable Steuern, Abgaben und Umlagen senken die Stromrechnung weiterhin um 55 €. Die Minderungen fallen etwas geringer aus, da allerdings auch der Posten kleiner als bspw. die Erzeugungskosten ist. Das gesamte Einsparpotential von intelligentem Laden ist jedoch so hoch, dass ein „Umsonst-Laden“ grundsätzlich denkbar ist.

3.2 EINSPARPOTENTIALE MIT BIDIREKTIONALEM LADEN

Bidirektionales Laden. Bidirektionales Laden ermöglicht die Rückspeisung von Strom aus der Batterie des Elektroautos ins Netz, welches aktuell rechtlich und regulatorisch noch nicht möglich ist, aber zukünftig möglich werden soll. In den folgenden Ergebnissen untersuchen wir die Mehrwerte von bidirektionalem Laden. Der Haushalt erhält dabei eine Vergütung zu dem Großhandelspreis des jeweiligen Stromtarifs (ohne Mehrwertsteuer). Dafür berücksichtigen wir die beim Entladen zusätzlich entstehenden Verluste, die schnellere Batteriedegradation sowie die Einschränkung, dass die Batterie durch die Netzspeisung lediglich auf einen Ladezustand von 20% entladen werden darf.

Vergleich mit intelligentem Laden. Aus Abbildung 7 wird ersichtlich, dass gegenüber dem intelligenten Laden der Strom nicht nur bei günstigen Preisen gekauft, sondern auch bei hohen Preisen wieder verkauft werden kann. So entsprechen die Ladezeiträume im Sommer, vorzugsweise am Nachmittag und teils in der Nacht, jenen des intelligenten Ladens. Dabei werden jedoch höhere Ladeleistungen erreicht, da ein Teil des gespeicherten Stroms am Morgen und am Abend wieder ins Netz gespeist wird. Dieses Verhalten reduziert dabei nicht nur die Kosten für Verbraucher, sondern entlastet auch das Verteilnetz und das Stromsystem. Insgesamt werden so über das betrachtete Jahr 4461 kWh aus dem Netz in die Batterie geladen, wovon 2489 kWh wieder zurückgespeist werden.

Durchschnittliche Ladeleistung im Sommer

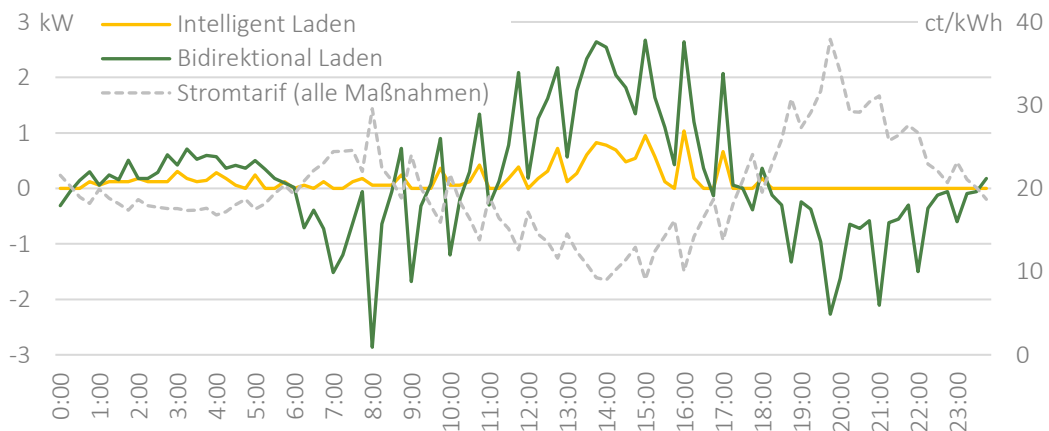


Abbildung 7: Vergleich der durchschnittlichen Ladeleistung (in kW) im Tagesverlauf im Sommer zwischen intelligentem und bidirektionalem Laden für einen Stromtarif (in ct/kWh) mit maximaler Zeitvariabilität. Die Ladezeiträume sind identisch mit jenen beim intelligenten Laden. Allerdings sind die Volumina höher, um die zusätzlich eingespeicherte Energie bei hohen Strompreisen wieder verkaufen zu können.

Einsparpotentiale. Bidirektionales Laden kann die Vorteile von hoher Preisvolatilität gegenüber lediglich intelligentem Laden noch stärker heben (Abbildung 8). Während die Weitergabe von Day-ahead Preisen noch keinen relevanten Mehrwert gegenüber intelligentem Laden bringt, liefert die Intraday-Optimierung den vierfachen Mehrwert. Die Einsparpotentiale durch zeitvariable Netzentgelte verdoppeln sich ebenfalls und ermöglichen bereits eine „negative Stromrechnung“. Unter diesen Voraussetzungen sind auch zeitvariable Steuern, Abgaben und Umlagen eine noch effektivere Maßnahme, deren Einsparungen sich ebenfalls verdreifachen.

Anstelle einer Stromrechnung von 475 € beträgt diese bei voller Flexibilisierung -355 €. Damit ist es plausibel, dass sich durch bidirektionales Laden Geld verdienen lässt.

Degradationskosten. Das bidirektionale Laden sorgt aufgrund der erhöhten durchgespeicherten Energie für zusätzliche Zyklen, die die Batterie schneller altern lassen. Die resultierenden Degradationskosten werden jedoch auf der Stromrechnung nicht ausgewiesen, wurden in der Optimierung aber berücksichtigt. Diese summieren sich bei vollständiger Flexibilisierung auf rund 125 € und sollten den Einsparungen auf der Stromrechnung entgegengestellt werden.

Einsparpotentiale (Stromnetz Berlin)

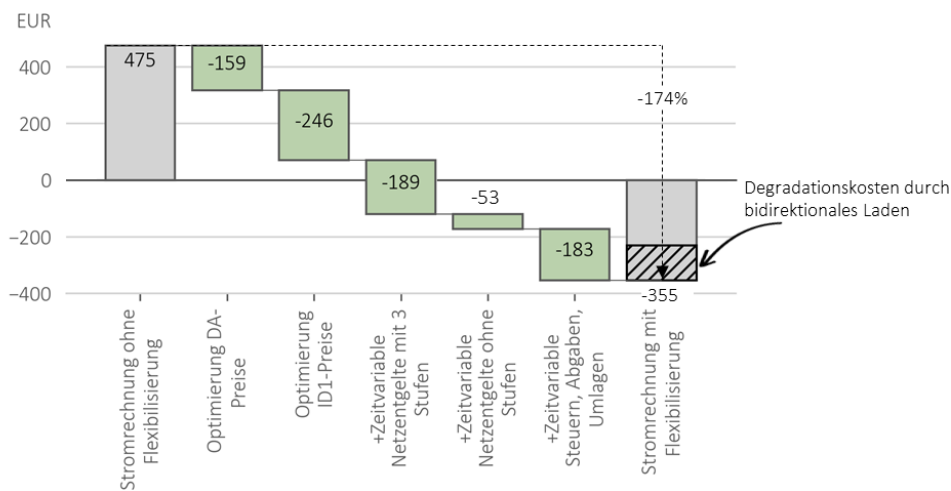


Abbildung 8: Einsparpotentiale für bidirektionales Laden bei zukünftig denkbaren Anpassungen des regulatorischen Rahmens. Die Stromrechnung kann so weit gesenkt werden, dass sie negativ ausfallen und Rückzahlungen möglich sind. Allerdings führt die zusätzliche Nutzung der Batterie zu einer beschleunigten Alterung, was kalkulatorische Degradationskosten zur Folge hat, die nicht auf der Stromrechnung ausgewiesen werden.

3.3 EINORDNUNG

In diesem Abschnitt ordnen wir die Ergebnisse der Studie zunächst qualitativ ein und nennen relevante Limitierungen in Form nicht betrachteter Kosten und Erlöse. Abschließend folgt ein Vergleich mit den Erkenntnissen weiterer bestehender Analysen.

3.3.1 Sonstige Kosten und Erlöse

Sonstige Kosten. Die in dieser Studie ausgewiesenen Einsparpotentiale lassen sich nicht unmittelbar vollständig für Haushalte realisieren, da bei der Optimierung des Ladeverhaltens zusätzliche Kosten entstehen. So verlangen Hersteller von Versorgern eine Gebühr für die Steuerung des Ladevorgangs. Die Versorger wiederum behalten einen Teil als Marge für die Optimierung ein. Weitere Kosten entstehen für die Hardware wie z. B. intelligente Messsysteme oder Zusatzkosten für bidirektionales Laden, die ohne optimierte Ladestrategie nicht zwingend benötigt werden.

Sonstige Erlöse. Die Nutzung des Intraday-Handels als Realoption ist in dieser Studie nicht berücksichtigt. Durch das mehrfache Kaufen und Verkaufen von Strom im kontinuierlichen Intraday-Handel können signifikante zusätzliche Erlöse erzielt werden. Weitere Synergieeffekte mit lokaler Erzeugung bspw. durch PV-Anlagen oder durch andere flexible Verbraucher wie Batterie-Heimspeicher und Wärmepumpen wurden nicht betrachtet und bieten Optimierungsmöglichkeiten.

Zukünftige Entwicklung. Wir haben den Wert von intelligentem Laden durch das Ausnutzen vorhandener Flexibilität des Ladezeitraums auf Basis aktueller Strommarktdaten ermittelt. Die zukünftige Entwicklung des Stromsystems bilden wir daher nicht ab. Diese umfasst einerseits den fortschreitenden Ausbau neuer Erzeugungskapazitäten, aber auch die Flexibilisierung von Verbrauchern wie bspw. ansteigende Speichernutzung. Andererseits finden Änderungen durch regulatorische Anpassungen jenseits der variierten Stromtarife in dieser Studie wie bspw. die Umstellung der Day-ahead-Auktion von stündlichen auf viertelstündliche Produkte keine Berücksichtigung. Diese Änderungen können den Mehrwert von intelligentem und bidirektionalem Laden maßgeblich verschieben.

3.3.2 Vergleich

Weitere Analysen. Der Mehrwert von intelligentem und bidirektionalem Laden wurde bereits in zahlreichen anderen Studien untersucht und quantifiziert. In diesem Abschnitt setzen wir unsere Annahmen und Ergebnisse in Relation zu den Erkenntnissen ausgewählter Analysen, auf die eine abschließende Einordnung folgt.

Fraunhofer ISE & Fraunhofer ISI (2024). In ihrer Studie untersuchen die Autoren die Kostenvorteile von intelligentem und bidirektionalem Laden für verschiedene Haushalte mit und ohne PV-Anlage. Weiterhin werden in der Analyse Degradations- und Infrastrukturkosten ex post berücksichtigt. Für die Optimierung am deutschen Day-ahead-Markt ohne zusätzliche PV-

Anlage ermitteln die Autoren ein Einsparpotential – abhängig von der Haushaltsgröße – zwischen 138 € und 380 €. Im Vergleich dazu ergeben sich in unserer Studie im vergleichbaren Fall Einsparungen von 156 € im Standard-Profil und 304 € im Vielfahrer-Profil. Der Wiederverkauf am Markt durch bidirektionales Laden wird in der Studie nicht betrachtet. Jedoch kann durch gezieltes Entladen (Vehicle-to-Home) der Eigenverbrauch erhöht werden, woraus die Autoren ein Einsparpotential von bis zu 451 € ableiten.

E.ON (2024). Das E.ON-Projekt „Bi-clEVer“ untersucht die möglichen Kostenersparnisse durch bidirektionales Laden eines Elektroautos in einem Haushalt mit PV-Anlage und dynamischen Stromtarif. Die **Analyse** zeigt eine Kostenersparnis von 420 € durch optimierten Netzstrombezug und Maximierung des Solarstrom-Eigenverbrauchs (Vehicle-to-Home). Zusätzlich schätzen die Autoren den Mehrwert einer perspektivischen Rückspeisung ins Netz (Vehicle-to-Grid) auf weitere rund 500 €, wobei Degradationskosten unberücksichtigt bleiben. Diese Ergebnisse liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die in unserer Studie berechneten Einsparpotenziale für intelligentes Laden (400 €) und bidirektionales Laden (zusätzlich 430 €). Unsere Werte basieren jedoch ausschließlich auf marktorientiertem Handeln mit zeitvariablen Stromtarifen, ohne Eigenverbrauchsoptimierung einzubeziehen.

The Mobility House (2023). The Mobility House wirbt offensiv mit der Vision von kostenlosem Laden. In einem **Feldversuch** hat das Unternehmen die Batterien einer Fahrzeugflotte im regulären Fahrbetrieb an der europäischen Strombörse EPEX Spot mithilfe von intelligentem und bidirektionalem Laden optimiert. Die effektiven Einsparungen für Endkunden beziffert das Unternehmen unter Berücksichtigung von Batteriedegradation und Netzanschluss auf jährlich 650 € pro Fahrzeug. Dieser Wert liegt etwas oberhalb der von uns berechneten Einsparpotenziale, schließt jedoch auch das Nutzen der Realoption im kontinuierlichen Intraday-Handel mit ein, die wir in unserem Modell nicht betrachtet haben.

Einordnung. Die von uns ermittelten Einsparpotenziale sind mit jenen der anderen Analysen vergleichbar. Allerdings lassen sich aus den unterschiedlichen Annahmen wertvolle zusätzliche Erkenntnisse gewinnen. Während sich in anderen Studien der Mehrwert von intelligentem Laden aus einem erhöhten Eigenverbrauch des eigenen PV-Stroms ergibt, zeigen wir, dass auch Haushalte ohne eigene PV-Anlage von intelligentem Laden profitieren können. Voraussetzung dafür sind Stromtarife mit hohen zeitvariablen Anteilen, die die Knappheitssignale von Stromerzeugung (und -verbrauch) sowie Netzengpässen weitergeben und gegenüber der Eigenverbrauchsmaximierung einen höheren Systemnutzen haben.

4 Robustheit der Ergebnisse

Um die Robustheit unserer Ergebnisse zu testen, untersuchen wir in diesem Abschnitt drei wesentliche Änderungen. Wir untersuchen wie sich die Optimierungsergebnisse ohne pauschale Flexibilitätsbeschränkungen, mit einem ländlichen (statt urbanem) Verteilnetz, sowie mit einem Vielfahrer mit größerem Auto verändern.

4.1 KEINE FLEXIBILITÄTSEINSCHRÄNKUNGEN

Flexible Batterienutzung. Um ein unrealistisch hohes Flexibilitätspotential zu verhindern, geben wir bei der Ladestrategie vor, dass die Batterie jeden Morgen gegen 6 Uhr zu mindestens 60% geladen sein muss und bei bidirektionalem Laden nicht unter 20% entladen werden darf (vgl. Abschnitt 2.1). Diese Regeln gelten bspw. auch in Zeiträumen, in denen das Elektroauto nicht genutzt wird, und schränken die flexible Nutzung zum Teil unnötig ein. Daher betrachten wir im Folgenden, welche zusätzlichen Einsparpotentiale sich bei einer vollständig flexiblen Batterienutzung ergäben, wobei weiterhin alle Fahrten unverändert realisiert werden können.

Einsparpotentiale bei voller Flexibilität (Stromnetz Berlin)

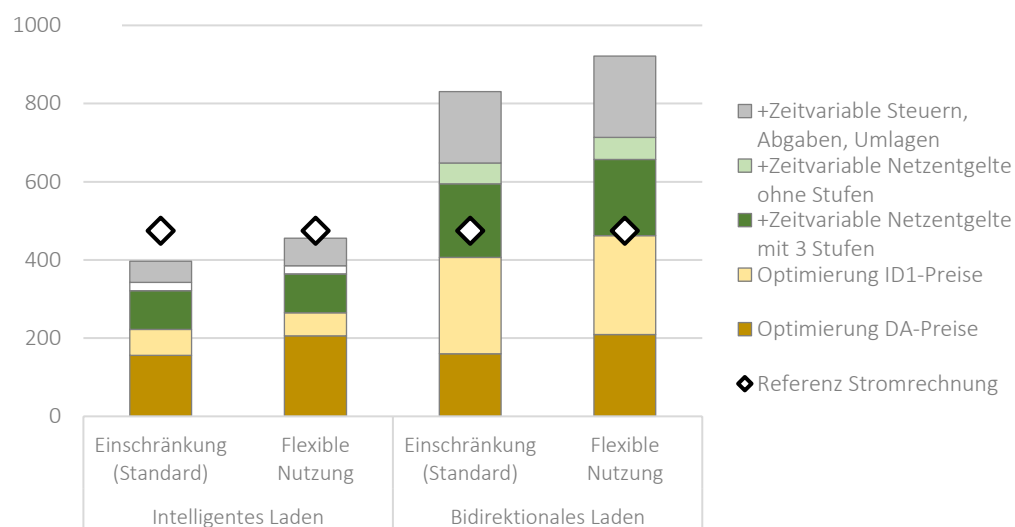


Abbildung 9: Vergleich der Einsparpotentiale mit eingeschränkter und mit vollständig flexibler Nutzung der Batterie für intelligentes und bidirektionales Laden basierend auf den Netzentgelten von Stromnetz Berlin.

Einsparpotentiale. Die durchaus starke angenommene Einschränkung der Flexibilitätsnutzung bedeutet erstaunlich geringe finanzielle Einbußen. Der Großteil der Ersparnisse lässt sich auch mit den angenommenen Leitplanken und Einschränkungen realisieren. Abbildung 9 zeigt, dass mit intelligentem Laden zusätzliche Einsparungen in Höhe von rund 60 € erzielt werden können (90 € mit bidirektionalem Laden). Diese ergeben sich maßgeblich durch optimierte Tageszeitpunkte, die bereits im Day-ahead-Preis abgebildet sind. Während im Winter vorzugsweise in der Nacht (vor 6 Uhr) geladen wird, bietet uneingeschränktes Laden besonders im

Sommer einen Vorteil, wodurch die niedrigen Preise in der Mittagszeit vollständig ausgenutzt werden können. Zeitvariable Steuern, Abgaben und Umlagen, die an Day-ahead-Preise gekoppelt sind, können das Optimierungspotenzial weiter erhöhen.

4.2 ANDERES VERTEILNETZ

LEW Verteilnetz. Für die bisherige Analyse wurden zur Bestimmung der Netzentgelte die Kosten und Tarife für das städtische Verteilnetz in Berlin verwendet, welches durchgängig einen höheren lokalen Verbrauch als lokale Erzeugung aufweist. Im Folgenden wiederholen wir die Optimierung für ein ganz anders strukturiertes Verteilnetz im ländlichen Raum, nämlich das LEW Verteilnetz. Dieses hat einen großen Anteil an ländlichem Raum und im Gegensatz zum Stromnetz Berlin durch eine hohe solare Stromerzeugung in 15% aller Viertelstunden einen Erzeugungsüberschuss. Diese Erzeugungsüberschüsse sind aufgrund der hohen Gleichzeitigkeit in der Spitze größer als jene der Verbraucher und damit entscheidend für den Netzausbaubedarf.

Netzentgelttarife. Dies spiegelt sich in den in Abbildung 10 illustrierten dreistufigen zeitvariablen Netzentgelten wider: Während Stromnetz Berlin durch das Hochpreisfenster in den Abendstunden Anreize zur Vermeidung von Verbrauch in diesen Stunden setzt, lohnt es sich im LEW Verteilnetz Strom im Niedrigpreisfenster in der Mittagszeit zu beziehen. Das mit einer Neon-Methodik erstellte stufenlose Netzentgelt berücksichtigt, dass im LEW Verteilnetz die kritischsten Momente durch Erzeugungsüberschüsse entstehen und entsprechend in einzelnen Viertelstunden auch negative Netzentgelte einen höheren Verbrauch anregen sollen. Flexibel ladbare Elektroautos können darauf reagieren und entsprechend der Ausgestaltung im jeweiligen Netzgebiet profitieren.

Zeitvariable Netzentgelte nach §14a EnWG (3 Stufen) & stufenlos

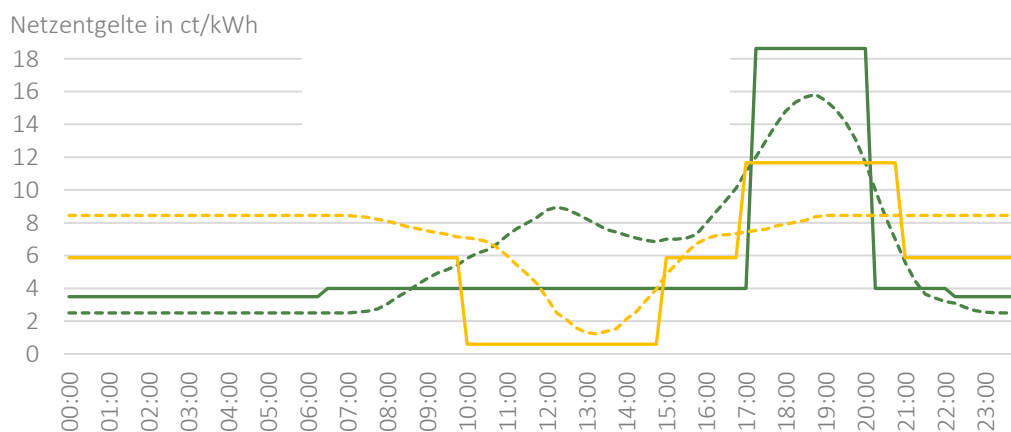


Abbildung 10: Vergleich der Netzentgelte für Stromnetz Berlin und LEW Verteilnetz. Die Netzentgelte mit drei Stufen gelten jeden Tag identisch. Die stufenlosen Netzentgelte sind lediglich als Durchschnittswerte über ein Jahr abgebildet. Für LEW Verteilnetz können einzelne Viertelstundenwerte bei sehr hohen Erzeugungsüberschüssen auch negative Werte annehmen.

Einsparpotentiale. Die Optimierung bei der Weitergabe von Börsenpreisen bei konstanten Netzentgelten offenbart keine bzw. bei bidirektionalem Laden vernachlässigbare Unterschiede zwischen den beiden Netzgebieten (Abbildung 11). Das Verhindern vom Laden in den Abendstunden im Stromnetz Berlin ermöglicht mit dreistufigem Netzentgelt zunächst eine relativ größere Kostenreduktion als im LEW Verteilnetz. Gezielte Netzentlastung bei starker Überspeisung mit zeitvariablen Netzentgelten ohne Stufen u.a. durch das Ausnutzen negativer Netzentgelte ermöglicht jedoch im LEW Verteilnetz eine erhebliche Reduktion der Stromrechnung. Die Einsparpotentiale und damit der Mehrwert von flexiblem Laden liegen in beiden Verteilnetzgebieten jedoch trotz unterschiedlicher Preissignale sehr nah beieinander.

Einsparpotentiale in verschiedenen Verteilnetzen

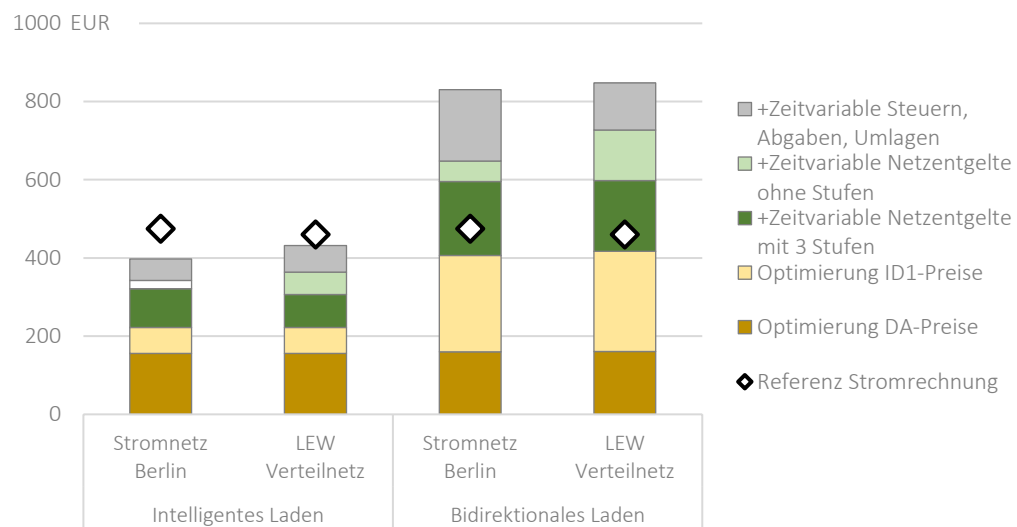


Abbildung 11: Vergleich der Einsparpotentiale in den Netzgebieten von Stromnetz Berlin und LEW Verteilnetz für intelligentes und bidirektionales Laden. Aufgrund regional unterschiedlicher Netzentgelte fällt die Referenz-Stromrechnung im LEW Verteilnetz mit 460 € um 15 € leicht geringer aus als im Stromnetz Berlin.

4.3 ANDERES FAHRPROFIL

Vielfahrerprofil. Der Mehrwert von intelligentem Laden wird durch die Flexibilität der Ladezeiträume geprägt. Der bisher betrachtete Standard-Fall mit einer Fahrleistung leicht unter dem deutschen Durchschnitt weist einen deutlich größeren Spielraum bei der Batterienutzung auf als das im Folgenden untersuchte Vielfahrer-Profil. Das Vielfahrer-Profil basiert auf dem Profil eines Tesla Model 3 mit einer um den Faktor 5 höheren Fahrleistung und damit geringeren Ladeverfügbarkeit (Tabelle 3). Dafür bietet der benötigte höhere Stromverbrauch ein absolut größeres Einsparpotential, welches mit leicht größerer Batteriekapazität und Ladeleistung erschlossen werden kann. Die Anteile der Ladevorgänge, die nicht an der heimischen Wallbox stattfinden – also z.B. an öffentlichen Ladestationen – sind für beide Profile vergleichbar.

Tabelle 3. Übersicht der technischen Daten des Elektroautos für die Fahrprofile Standard-Fall und Vielfahrer.

	Standard-Fall	
Speichergröße	45 kWh	57 kWh
Maximale Ladeleistung	11 kW	15.5 kW
Jahresstromverbrauch EV	2180 kWh	8349 kWh
Jährliche Fahrleistung	10442 km	53960 km
Ladeverfügbarkeit	75%	62%
Ladeanteil außerhalb des Haushalts	28%	29%
Ladeverluste der Batterie	je 5% für Laden & Entladen	
Batteriedegradationskosten	5 ct/kWh	

Einsparpotentiale. Die Einsparpotentiale sind in Abbildung 12 abgebildet und sind für das Vielfahrer-Profil absolut höher als im Standardfall (830 € bei intelligentem Laden und 1255 € bei bidirektionalem Laden). Dies ist allerdings auch durch die rund dreimal höhere Referenz-Stromrechnung (1473 €) bedingt. Die relativen Einsparungen fallen deutlich geringer aus. Bei intelligentem Laden kann die Stromrechnung bei allen Maßnahmen nur etwas mehr als halbiert (57%) werden. Bei bidirektionalem Laden ist beim Vielfahrerprofil bestenfalls kostenloses Laden denkbar (85% Einsparung). Die Beiträge der einzelnen Maßnahmen sind bei beiden Fahrprofilen ähnlich. Bereits Day-ahead-Preise und zeitvariable Netzentgelte zu berücksichtigen, ermöglicht große Einsparungen.

Einsparpotentiale nach Fahrprofil (Stromnetz Berlin)

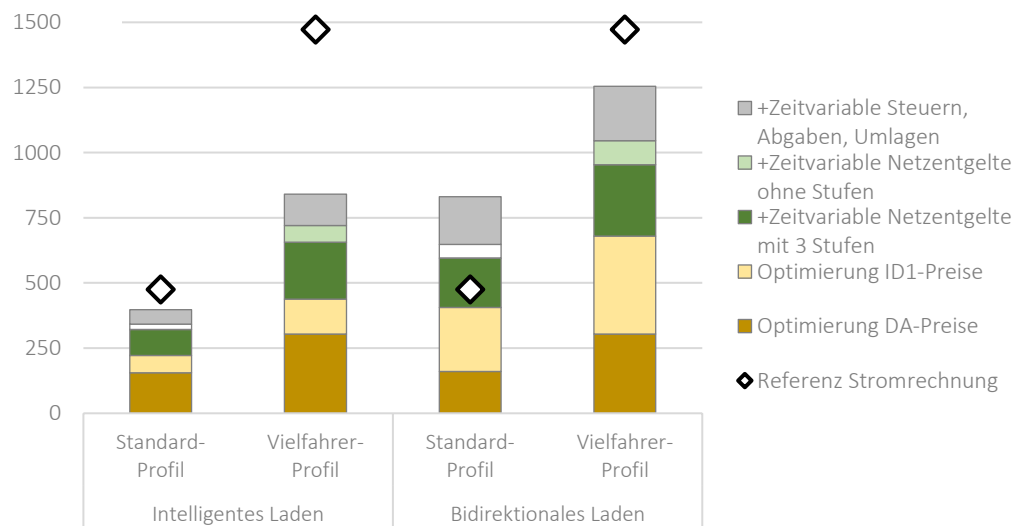


Abbildung 12: Vergleich der Einsparpotentiale des Standard- und des Vielfahrer-Profiles für intelligentes und bidirektionales Laden basierend auf den Netzentgelten von Stromnetz Berlin.

5 Fazit

Intelligentes Laden. Das intelligente Laden von Elektroautos bietet bedeutende Einsparpotentiale für Haushalte. Bereits ein auf Großhandelspreisen beruhender dynamischer Stromtarif kann die Stromrechnung durchschnittlicher Autonutzer, die flexibel auf die Preise reagieren, um die Hälfte reduzieren (-47% in dieser Studie). Stromtarife mit noch weiteren zeitvariablen Preiskomponenten ermöglichen das Senken der Stromrechnung auf nahezu null (-84%).

Bidirektionales Laden. Mit bidirektionalem Laden könnten sich zukünftig negative Stromrechnungen realisieren lassen. Neben der hohen Einsparungspotentiale für Verbraucher bedeutet dieses auch einen erheblichen Mehrwert für das Stromsystem: Das Elektroauto wird am Nachmittag zu niedrigen Preisen geladen und abends ein Teil davon wieder ins Netz gespeist. Bidirektionales Laden ermöglicht der Elektromobilität das Stromsystem zu entlasten, statt es stärker zu belasten.

Empfehlungen. Die hohen Einsparpotentiale rechtfertigen für Verbraucher und Versorger sich mit intelligentem Lademanagement für ihre Elektrofahrzeuge zu beschäftigen, um ihre Stromrechnungen signifikant zu senken. Dafür bedarf es lediglich eines dynamischen Stromtarifs auf Basis von Großhandelspreisen. Da intelligentes Laden gleichzeitig auch das Stromsystem entlasten kann, sollten Entscheidungsträger die Chance ergreifen, dynamische Stromtarife flächendeckend durchzusetzen. Die Einführung weiterer Reformen wie zeitvariabler Netzentgelte, die sich in Echtzeit an die aktuelle Netzsituation anpassen, oder zeitvariabler Steuern, Abgaben und Umlagen kann darüber hinaus das Strompreisniveau senken, unnötigen Netzausbau verhindern und Elektromobilität für Haushalte ohne eigene PV-Anlage attraktiv machen.

6 Literaturübersicht

Gaete-Morales et al. (2021). An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy. *Sci Data* 8, 152. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00932-9>.

Ecke et al. (2023). Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2022/2023: Alltagsmobilität und Fahrleistung. <https://doi.org/10.5445/IR/1000164704>.

Salaria et al. (2025). Vehicle-to-grid impact on battery degradation and estimation of V2G economic compensation. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124546>.

Neon (2024). Mehrwert dezentraler Flexibilität. Oder: Was kostet die verschleppte Flexibilisierung von Wärmepumpen, Elektroautos und Heimspeichern? <https://neon.energy/mehrwert-flex/>.

BDEW (2024). BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2024 – Haushalte und Industrie. https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_12-2024_Q796OxD.pdf.

Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI (2024). Potential of a full EV-power-system-integration in Europe & how to realise it. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2024_10_Study_V2G_EU-Potential_Final.pdf