

KURZSTUDIE ZU BIDIREKTIONALEM LADEN



Berlin, März 2025

Wirtschaftlichkeitsanalysen für
Anwendungen im Haushalt

Eine Studie im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft
und Klimaschutz (BMWK) i. R.
der Begleitforschung zum
Technologieprogramm „IKT für
Elektromobilität“

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	3
1. EINLEITUNG	5
2. ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN	8
3. WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN	19
4. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	30
5. FUSSNOTENVERZEICHNIS	39
IMPRESSUM	44

ZUSAMMENFASSUNG

Inhalt der Studie ist die Wirtschaftlichkeit von bidirektionalem Laden bei Nutzung der Fahrzeugbatterie als Heimspeicher in privaten Haushalten in Deutschland. Bidirektionales Laden ist ein breites Anwendungsgebiet mit hoher Relevanz für IKT-Technologie und betrifft als Zukunftstechnologie viele Projekte im Programm IKT für Elektromobilität. In den letzten Jahren wurden die Kommunikationstechnologien für bidirektionales Laden soweit entwickelt und auf diverse Anwendungsfälle spezialisiert, dass die technischen Voraussetzungen für bidirektionales Laden gegeben sind.¹ Entsprechend wurden in vielen Ländern Pilotversuche gestartet, um Konzepte zu testen bzw. zu validieren.² Mit der Norm ISO 15118-20 ist 2023 ein wichtiger Schritt zur Standardisierung erfolgt. Dennoch besteht in Bezug auf Standards weiterer Handlungsbedarf und es sind vor allem auch weitere Anwendungen mit Marktreife nötig.³ Viele der großen Automobilhersteller bieten mittlerweile Fahrzeuge mit der Fähigkeit für bidirektionales Laden, jedoch ist deren Anteil im Markt noch gering und wird statistisch nicht eigenständig erfasst.⁴ Dennoch bleibt die Wirtschaftlichkeit für viele Akteurinnen und Akteure unklar, zumal die regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen sich zwischen Ländern stark unterscheiden. Die vorliegende Studie zeigt daher den für Deutschland aktuellen Stand auf. Sie wurde mit dem Ziel erstellt, den Projekten eine Handreichung zur Wirtschaftlichkeit und ein Verständnis der wichtigsten Einflussparameter zu geben.

In der Studie wurden drei Anwendungsfälle betrachtet: Nutzung der Fahrzeugbatterie als Heimspeicher bei klassischem Tarif (Anwendungsfall *Vehicle-to-Home (V2H)*) und bei variablem Tarif (Anwendungsfall *Vehicle-to-Home-Plus (V2H+)*) sowie die Vermarktung der Fahrzeugbatterie am Strommarkt (Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage*). Die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle wurde mithilfe eines techno-

ökonomischen Modells analysiert, in dem zwei Fahrzeuge (A und B) betrachtet werden. Als Kennzahl für die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle wurden Kapitalwerte berechnet. Zum Vergleich der Investitionen in unterschiedliche Technologien wurde der Profitabilitätsindex herangezogen.

Aus den Ergebnissen dieser Analysen lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ANWENDUNGSFÄLLE

- **Anwendungsfall V2H:** Die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem PV-Strom ist beim Fahrzeug A nach 13 Jahren profitabel. Da die Profitabilität aus den Einsparungen im Vergleich zum Strombezug aus dem Netz resultiert, steigt sie mit steigenden Endkundenpreisen. Aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen ist der Anwendungsfall V2H bei Fahrzeug B nicht profitabel.
- **Anwendungsfall V2H+:** Zeitvariable Tarife können die Wirtschaftlichkeit von Vehicle-to-Home-Anwendungen erhöhen. Der Anwendungsfall ist für das Fahrzeug A nach sechs Jahren profitabel. Für Fahrzeug B wäre der Anwendungsfall nach acht Jahren profitabel, wenn die Herstellerauflagen zur Batterienutzung unberücksichtigt blieben.
- **Anwendungsfall Zeitliche Arbitrage:** Die Vermarktung der Fahrzeugbatterie über einen Aggregator am Spotmarkt ist nur profitabel, wenn die Variabilität der Spotmarktpreise hoch bleibt und die staatlich induzierten Preisbestandteile deutlich gesenkt würden.

Hierfür wäre die Einführung von Vergünstigungen für am Spotmarkt agierende nicht-stationäre Speicher notwendig. Im Extremfall, dass die Preisvariabilität auf dem Niveau von 2023 bleibt und keinerlei staatlich induzierte Preisbestandteile (SIP) zu zahlen sind, wäre der Anwendungsfall für das Fahrzeug A nach sechs Jahren und, aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen, für Fahrzeug B nach sieben Jahren profitabel, wenn die Herstellerauflagen zur Batterie-nutzung unberücksichtigt blieben.

PROFITABILITÄTSTREIBER

- **Höhe der Anfangsinvestitionen:** Die Höhe der Anfangsinvestitionen hat einen deutlichen Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle. Technologische Entwicklungen, die mit niedrigeren Preisen für bidirektionale Ladeinfrastruktur verbunden sind, würden die Profitabilität erhöhen. Der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* wäre bei unveränderten regulatorischen Rahmenbedingungen und einer stark verringerten Preisvariabilität am Spotmarkt aber weiterhin unprofitabel.
- **Variabilität der Großhandelspreise:** Die Höhe der nutzbaren Preisunterschiede beim variablen Endkundentarif sowie der nutzbaren Variabilität der Preise am Spotmarkt hat einen Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle *V2H+* und *Zeitliche Arbitrage*. Eine auch zukünftig hohe Preisvariabilität am Spotmarkt ist Voraussetzung für die Profitabilität des Anwendungsfalls *Zeitliche Arbitrage*. Dies impliziert, dass die Nutzung von Fahrzeugbatterien für den Arbitragehandel am Spotmarkt nur so lange profitabel ist, bis der Markt mit Speichern gesättigt ist.
- **Staatlich induzierte Preisbestandteile:** Steigende staatlich induzierte Preisbestandteile erhöhen die Endkundenpreise. Da diese als Basis für die Bewertung der Einsparungen dienen, erhöhen steigende Endkundenpreise die Profitabilität von Vehicle-to-Home-Anwendungen. Gleichzeitig reduzieren sie die Profitabilität von Vehicle-to-Grid-Anwendungen mit Rückspeisung ins Netz. Dies sollte bei einer Anpassung der SIP, wie bspw. einer möglichen Neugestaltung der Netzentgelte, berücksichtigt werden.
- **Regulatorische Rahmenbedingungen:** Der derzeitige regulatorische Rahmen für Speicher kann aufgrund starker Fragmentierung als Hemmnis für die Marktdiffusion von Speichern betrachtet werden und sollte daher vereinfacht und stärker vereinheitlicht werden. Hemmnisse wie der Umstand, dass Elektrofahrzeuge bei der Rückspeisung als Versorger gelten, sollten wie ursprünglich zum 1. Januar 2025 geplant abgebaut werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich der Ausweitung des Untersuchungsgegenstands. Insbesondere sollten weitere Haushalte mit einem anderen Verbrauchsverhalten und Flexibilitätpotenzial betrachtet werden. Zudem besteht Forschungs- und Handlungsbedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen und insbesondere der staatlich induzierten Preisbestandteile wie Steuern, Abgaben und Entgelte. Der Fokus sollte dabei der Abbau von Hemmnissen und Fehlanreizen sein, die nicht mit den energiepolitischen Zielen konform sind. Dieser Abbau ist gleichzeitig Voraussetzung für die Umsetzung neuer Geschäftsmodelle, die auf der Bereitstellung von Flexibilität basieren und das Stromsystem entlasten können.



EINLEITUNG





Bidirektionales Laden wird unter dem Begriff Vehicle-to-Everything (V2X) als Technologie für die netzdienliche Nutzung von Elektrofahrzeugen diskutiert. Bidirektionales Laden umfasst unter anderem die Rückspeisungen in den Haushalt (*Vehicle-to-Home (V2H)*), in gewerbliche Gebäude (*Vehicle-to-Building (V2B)*) und ins Stromnetz (*Vehicle-to-Grid (V2G)*).⁵ Im Sprachgebrauch werden jedoch mitunter V2G, bidirektionales Laden und V2X synonym verwendet. Seit 2022/2023 gibt es Fortschritte bei der Verfügbarkeit von V2X-fähigen Fahrzeugen, die auf eine Initiative der Automobilhersteller zurückzuführen sind. Gleichzeitig haben sich die ökonomischen Rahmenbedingungen verändert, vor allem durch die Inflation und Änderungen bei den Strompreisen. Dies hat Auswirkungen auf die Attraktivität von V2X-Anwendungen in Deutschland. Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität identifiziert vier Gruppen von Anwendungsfällen für V2X: (1) Optimierung lokaler Verbrauch/ Eigenverbrauchsoptimierung, (2) Netzdienliches Laden/ Netzdienstleistungen im Verteilnetz, (3) Vermarktung von Strom und (4) Systemdienstleistungen.⁶

Die für private Haushalte angeführten Anwendungsfälle von V2X werden bisher jedoch so gut wie nicht kommerziell umgesetzt. Die bestehende Literatur identifiziert wirtschaftliche Potenziale vor allem über Erlöse beim Handel an Energiemärkten oder als Vergütung für netzdienliches Verhalten. Die für die V2X-Fähigkeit notwendigen zusätzlichen Investitionen werden in den Betrachtungen jedoch zumeist vernachlässigt. Gleiches gilt für regulatorische Rahmenbedingungen, wie staatlich induzierte Preisbestandteile. SIP umfassen bspw. Steuern, Abgaben und Umlagen. Diese werden zumeist vereinfacht betrachtet und als Hemmnis für die Wirtschaftlichkeit identifiziert.

Betrachtungsgegenstand dieser Kurzstudie ist daher eine Analyse von V2X-Anwendungen, die auf die wirtschaftlichen Aspekte unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen fokussiert. Dabei werden drei Anwendungsfälle des bidirektionalen Ladens analysiert, die in die Gruppen (1) und (3) der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität einzuordnen sind:

- Vehicle-to-Home für Prosumer (kurz: *V2H*),
- Vehicle-to-Home für Prosumer unter Einbezug eines zeitvariablen Stromtarifs (kurz: *V2H+*),
- Spotmarkthandel über einen Aggregator zum Ausnutzen von zeitlicher Arbitrage am Day-Ahead-Markt (kurz: *Zeitliche Arbitrage*).

Das Ziel der Kurzstudie ist ein besseres Verständnis der Wirtschaftlichkeit von V2X für private Haushalte in Deutschland unter aktuellen, genauso wie unter veränderten Rahmenbedingungen. Dabei wird der Einfluss der veränderten ökonomischen und regulatorischen Faktoren auf die Wirtschaftlichkeit aufgezeigt. Folgende Leitfragen werden betrachtet:

- Wie sind die V2X-Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten?
- Welchen Einfluss haben aktuelle ökonomische und regulatorische Rahmenbedingungen auf die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle?
- Besteht politischer Handlungsbedarf, um Hemmnisse abzubauen oder etwaige Wirtschaftlichkeitslücken zu schließen?

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die zusätzlich notwendigen Investitionen für die V2X-Fähigkeit den im Rahmen der drei Anwendungsfälle möglichen Einsparungen und Nettoerlösen gegenübergestellt. Der Bericht gibt also Auskunft darüber, inwieweit sich die zusätzlichen Investitionen in V2X-fähige Infrastruktur für die drei Anwendungsfälle aus Sicht eines Haushalts finanziell lohnen. Diese Analyse aus Haushaltsperspektive bietet für Projektentwickler die Möglichkeit, die Anwendungsfälle und deren Unsicherheiten ökonomisch zu verstehen und bildet damit eine Grundlage für die Berücksichtigung von V2X im eigenen Geschäftsmodell.



ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN

2.0 ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN

In dieser Kurzstudie werden Anwendungen für V2X bei privaten Haushalten betrachtet, die über einen eigenen Ladepunkt und ein V2X-fähiges Elektrofahrzeug verfügen. In den Anwendungsfällen V2H und V2H+ verfügt der Haushalt zudem über eine PV-Anlage. In den Wirtschaftlichkeitsanalysen wird immer die Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Haushalts betrachtet. Analysen aus Sicht anderer Akteure, wie z. B. Aggregatoren, oder gesamtwirtschaftliche Analysen werden nicht durchgeführt. Im Folgenden werden die drei Anwendungsfälle für V2X im Haushalt beschrieben. Im Anschluss werden die wesentlichen Annahmen im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung zusammengefasst.

ANWENDUNGSFALL 1: VEHICLE-TO-HOME

Im ersten Anwendungsfall werden die wirtschaftlichen Vorteile analysiert, die einem Haushalt mit PV-Anlage durch die Nutzung der Fahrzeugbatterie seines Elektrofahrzeugs als Heimspeicher entstehen können. Finanzielle Einsparungen werden vor allem durch die bessere Nutzung der Eigenerzeugung aus der PV-Anlage, durch Zwischenspeicherung in der Fahrzeugbatterie generiert. Demgegenüber stehen höhere Investitionen in die bidirektionale Ladeinfrastruktur. In allen Anwendungsfällen werden nur die zusätzlichen Erlöse und Kosten durch den Einsatz der V2X-Technologie betrachtet. In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fließen somit folgende Komponenten ein.

- Zusatzinvestition für V2X-fähige Ladeinfrastruktur
- + Einsparungen durch Zwischenspeicherung des eigenerzeugten Stroms für eine spätere Nutzung im Haushalt
- Entgangene Einspeisevergütungen

Bidirektionale Wallboxen weisen heute noch einen deutlich höheren Preis als unidirektionale Wallboxen auf. Die resultierenden höheren Investitionen werden als Investitionsdifferenz zwischen V2X-fähigen und unidirektionalen Techniken berücksichtigt. Die Einsparungen durch die Zwischenspeicherung des PV-Stroms berechnen sich aus der aus dem Elektrofahrzeug ausgespeisten Menge bewertet mit dem Endkundenpreis abzüglich der entgangenen Einspeisevergütung.

Verluste bei der Ein- und Ausspeicherung werden berücksichtigt, möglicher Batterieverschleiß wird in diesem Anwendungsfall jedoch vernachlässigt. Aktuelle Studien legen nahe, dass die Auswirkungen auf die Batterie gering sind, wenn nur innerhalb eines bestimmten State-of-Charge (SoC)-Bereichs geladen wird. Unter Umständen kann sich V2X sogar positiv auf die Batteriealterung auswirken.⁷ Batterieverschleiß wird auch von Experten eher als soziales, statt als technisches Problem angesehen.⁸ Die vorliegende Studie folgt dieser Einschätzung und berücksichtigt die mögliche Angst der Konsumenten vor Batterieverschleiß als Teil der Kapitalwertberechnung durch höhere Risikoaufschläge auf die Diskontraten.

ANWENDUNGSFALL 2: VEHICLE-TO-HOME-PLUS

Im zweiten Anwendungsfall betrachten wir, inwieweit der Haushalt aus dem Anwendungsfall *V2H* zusätzlich von einem zeitvariablen Tarif profitieren kann. Die marktliche Komponente des zeitvariablen Tarifs reflektiert dabei die Preisvariabilität am Day-Ahead-Markt. Die im Strompreis enthaltenen Steuern, Abgaben und Umlagen unterliegen keinen zeitlichen Schwankungen. Unter Berücksichtigung des zeitvariablen Tarifs optimiert der Haushalt die Be- und Entladung der Fahrzeugbatterie. Die Fahrzeugbatterie kann dazu genutzt werden, Strom aus dem Netz zur Deckung des Haushaltstrombedarfs zwischenspeichern. Auch die Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem Strom aus der PV-Anlage wird mitberücksichtigt. Beschränkt wird die Möglichkeit, Strom zu Zeiten mit niedrigen Preisen zu beziehen, erstens dadurch, dass das Fahrzeug vor Ort an der Ladesäule stehen muss. Zweitens beschränken die verfügbare Batteriekapazität, z. B. in Zeiten mit hoher Eigenerzeugung, und die Ladeleistung des Fahrzeugs die Möglichkeit zur zeitlichen Entkopplung von Bezug und Verbrauch. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Anwendungsfalls *V2H+* werden folgende Komponenten betrachtet.

- Zusatzinvestition für V2X-fähige Ladeinfrastruktur
- + Einsparungen durch Zwischenspeicherung des eigenerzeugten Stroms für die spätere Nutzung im Haushalt
- Entgangene Einspeisevergütungen
- + Einsparungen durch Zwischenspeicherung von Strom aus dem Netz für die spätere Nutzung im Haushalt

Der eigenerzeugte Strom wird, wie im Anwendungsfall *V2H*, mit dem durchschnittlichen Endkundenpreis bewertet. Die Einsparungen durch zwischengespeicherten Strom aus dem Netz errechnen sich aus den zwischengespeicherten Mengen (inklusive Verluste) und der Differenz aus (a) Endkundenpreis ohne zeitvariablen Tarif und (b) durchschnittlich realisiertem Endkundenpreis mit zeitvariablem Tarif. Der Strombedarf des Haushalts sowie der Strombedarf für Mobilität werden getrennt voneinander betrachtet. Es wird unterstellt, dass der Haushalt eine perfekte Prognose für die Erzeugung der PV-Anlage am Folgetag hat, sodass der benötigte Netzbezug für den Haushaltsbedarf vorab in der Batterie zwischengespeichert werden kann. Dieser Ladevorgang wird auf die Nachtstunden zwischen 0 und 8 Uhr morgens begrenzt. Die Ladung für den Mobilitätsbedarf wird ebenfalls im Tagesverlauf optimiert, jedoch ohne die Begrenzung auf die Nachtstunden.

ANWENDUNGSFALL 3: ZEITLICHE ARBITRAGE

Beim Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* wird das wirtschaftliche Potenzial einer Vermarktung der Fahrzeugbatterie unter Ausnutzung der täglichen Preisschwankungen am Day-Ahead-Markt betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Haushalt über einen Aggregator am Spotmarkt agiert. Der Haushalt stellt einem Aggregator eine festgelegte, über den Betrachtungszeitraum gleichbleibende Batteriekapazität seines V2G-fähigen Fahrzeugs als Flexibilität zur Verfügung. Der Aggregator nutzt die Flexibilität der Fahrzeugbatterie, um durch Einspeicherung in Stunden mit niedrigen Strompreisen und NetZRückspeisung in Stunden mit hohen Strompreisen Gewinne zu realisieren. Für seine Dienstleistung erhält der Aggregator eine monatliche Pauschale. Der Mobilitätsbedarf wird ebenfalls zum variablen Tarif bezogen, jedoch getrennt berechnet, um den Arbitragegewinn ausweisen zu können. Es werden folgende Komponenten bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt:

- Zusatzinvestition für V2X-fähige Ladeinfrastruktur
- + Gewinn aus der Vermarktung der Fahrzeugbatterie am Day-Ahead-Markt
- Aggregator-Pauschale

Der Gewinn aus der Vermarktung der Fahrzeugbatterie wird als Produkt aus den zwischengespeicherten Mengen (inkl. Verlusten) und den Spotmarkt-Preisunterschieden abzüglich der zu zahlenden staatlich induzierten Preisbestandteilen berechnet.

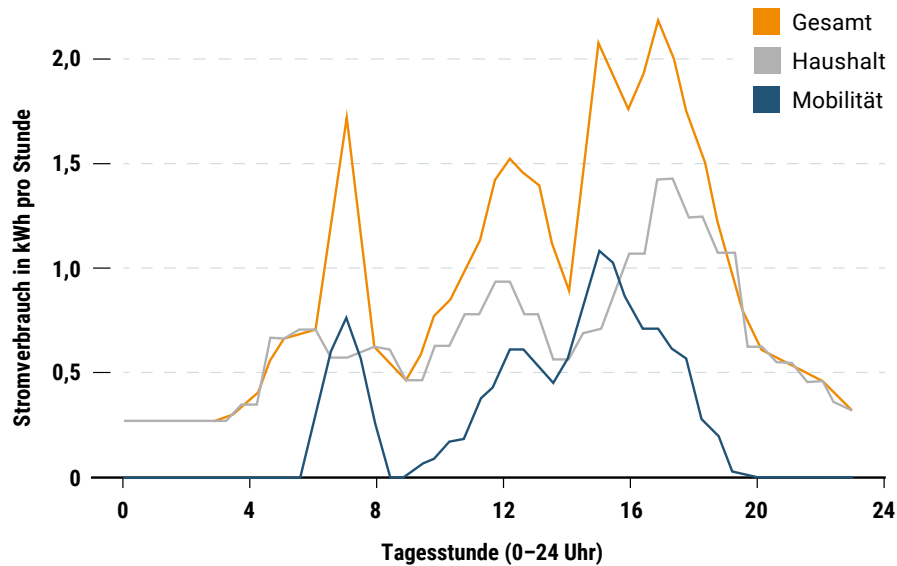
ANNAHMEN FÜR ANALYSE DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ANWENDUNGSFÄLLE

Zur **Bewertung der Wirtschaftlichkeit** werden die Zahlungsströme über einen Zeitraum von 15 Jahren betrachtet. Der Betrachtungszeitraum von 15 Jahren ist angelehnt an eine durchschnittliche Lebensdauer von PKW von 15 Jahren⁹ sowie die typische Lebensdauer von Wallboxen, die je nach Quelle und Typ mit 10 bis 20 Jahren¹⁰ angegeben wird. Leasingmodelle und wechselnde Halter über die Lebensdauer werden nicht berücksichtigt. Für jedes Jahr wird der monetäre Nutzen des V2X-Einsatzes anhand der jeweiligen ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen berechnet. Diese Zahlungsströme werden diskontiert, aufsummiert und den Differenzinvestitionen für die bidirektionale Ladeinfrastruktur gegenübergestellt. Als Kennzahl für die Wirtschaftlichkeit wird zum einen der **Kapitalwert** (Net Present Value) betrachtet. Der Einsatz ist wirtschaftlich, wenn der in Euro angegebene Kapitalwert positiv ist.¹¹ Da die Differenzinvestitionen für die bidirektionale Ladeinfrastruktur sich je nach Fahrzeug unterscheiden können, wird zum anderen der **Profitabilitätsindex** berechnet. Er berechnet sich als Verhältnis zwischen dem Barwert der zukünftigen Zahlungsströme und der Anfangsinvestition.

Für die **zukünftigen Erlöse und Kosten** wird mit dieser Rechnung implizit angenommen, dass die Preiserwartungen des privaten Haushalts deckungsgleich mit der Preisprognose der Modelle sind. Unsicherheit bezüglich der künftigen Entwicklung einzelner Parameter wird nicht mit einbezogen.

ABBILDUNG 1

GESAMTSTROMVERBRAUCH



Gesamtstromverbrauch, Stromverbrauch für Haushaltsanwendungen und Stromverbrauch für Mobilität im Tagesverlauf (geglättete Kurve dargestellt als Jahresmittel)¹²

STROMVERBRAUCH DES HAUSHALTS UND PV-EIGENERZEUGUNG

Der jährliche Stromverbrauch des Haushalts (ohne Mobilität) beträgt 5.790 kWh. Dies entspricht in etwa einem in einem Einfamilienhaus lebenden Vierpersonen-Haushalt in Deutschland. Zum Vergleich: Der durchschnittliche Bedarf eines Drei-und-Mehr-Personen-Haushalts in Deutschland betrug in 2021 5.411 kWh.¹³ Es wird ein stündliches, im Jahresverlauf gleichbleibendes **Lastprofil** für Haushaltsanwendungen verwendet.

Der jährliche Stromverbrauch für Mobilität beträgt 2.336 kWh. Das verwendete Fahrprofil ist für jeden Wochentag anders¹⁴, aber bleibt im Jahresverlauf gleich. Der Gesamtstromverbrauch des Haushalts beträgt damit 8.127 kWh im Jahr. Es wird unterstellt, dass der Haushalt das eigene Fahr- und Lastprofil sowie die Erzeugung für den Folgetag perfekt vorhersagen kann. [Abbildung 1](#) zeigt den durchschnittlichen täglichen Gesamtstromverbrauch und dessen Komponenten (Haushalt und Mobilität), dargestellt als geglättetes Jahresprofil.

Die in den Anwendungsfällen V2H und V2H+ unterstellte **PV-Anlage** hat eine Leistung von 7,5 kWp. Die Erzeugung von 7.447 kWh pro Jahr und das Erzeugungsprofil beruht auf Wetterdaten aus Stuttgart von 2021.¹⁵

ELEKTROFAHRZEUG UND DESSEN NUTZUNG

Es werden **zwei unterschiedliche Elektrofahrzeuge** modelliert. Das erste Fahrzeug ist angelehnt an den Nissan Leaf e+ (Fahrzeug A) mit einer Batteriekapazität von 62 kWh und einer Lade- bzw. Entladeleistung von 6,6 kW. Das zweite orientiert sich am VW ID.5 Pro (Fahrzeug B) mit einer größeren Batteriekapazität von 77 kWh und einer Lade- bzw. Entladeleistung von 11 kW. Für beide Fahrzeuge wird eine maximale Entladetiefe von 25 % der Batteriekapazität festgesetzt, sodass immer ein Puffer für spontane Fahrten vorhanden ist. Zudem wird die Bedingung gestellt, dass der Ladezustand der Batterie nicht unter die maximale Entladetiefe plus den Tagesbedarf an Mobilität fällt. Damit ist sichergestellt, dass der Haushalt jederzeit den täglichen Bedarf an Mobilität abrufen kann. Der Ladezustand zu Beginn des Jahres beträgt 50 %. Es wird ein Wirkungsgrad von 94,5 % angenommen.¹⁶ Ein zeitlicher Verlauf der Ladeleistung wird nicht im Detail modelliert.

Für die **Ladevorgänge** wird davon ausgegangen, dass die Ladung für den täglichen Mobilitätsbedarf innerhalb eines 24-Stunden-Rahmens verschiebbar ist (Anwendungsfälle *V2H+* und *Zeitliche Arbitrage*). Technische Einschränkungen für die Ladung werden durch die Verfügbarkeit des Fahrzeuges (Anschlusswahrscheinlichkeit im Parkzustand ist 100 %) sowie den Ladezustand der Batterie und die maximale Lade- und Entladeleistung des jeweiligen Fahrzeugs gesetzt.

Im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* beträgt die am Spotmarkt **vermarktete Batteriekapazität** 25 % der Batteriekapazität des Nissan Leaf e+; das entspricht 15,5 kWh. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Fahrzeugen zu ermöglichen, wird diese Menge auch für den VW ID.5 Pro angenommen. Die täglichen Lade- und Entlademenge sind gleich, sodass auf Tagesbasis eine Netto-Null entsteht. Das erlaubt die klare Abgrenzung der Arbitragegewinne. Somit ist der Unterschied im Arbitragehandel nur auf die bessere Nutzung der Preisunterschiede bei höherer Ladeleistung, nicht auf das geladene Volumen an sich zurückzuführen.

LADEINFRASTRUKTUR UND ENERGIEMANAGEMENTSYSTEM

Die zusätzlichen Investitionen für die Ladeinfrastruktur betragen insgesamt 3.010 € für den Nissan Leaf e+ mit einer Quasar Wallbox. Für den VW ID.5 Pro sind die Kosten bedingt durch die teurere Wallbox E3/DC Edison höher und liegen bei insgesamt 4.200 € (beide Wallboxen DC). Die zusätzlichen Investitionen werden im Vergleich zu einer nicht V2X-fähigen Wallbox berechnet, deren Investition mit 800 € angenommen wurde. Bei beiden Fahrzeugen ist die V2X-Funktion serienmäßig ohne Aufpreis inkludiert, und es wird keine zusätzliche Investition angenommen. Für die VW-ID-Reihe wird das bidirektionale Laden jedoch vom Hersteller begrenzt auf eine maximale Betriebsdauer von 4.000 h oder eine maximale Energiemenge von 10.000 kWh.¹⁷ Diese Grenzen werden in den Berechnungen zunächst vernachlässigt, aber in der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt.

ÖKONOMISCHE UND REGULATORISCHE ANNAHMEN

Für die Wirtschaftlichkeit der drei Anwendungsfälle ist die Entwicklung der Großhandels- und Endkundenpreise von Bedeutung. Unter Großhandelspreisen werden die Preise verstanden, die Lieferanten für die Beschaffung von Strom an Strombörsen bezahlen. Sie enthalten keine staatlich induzierten Preisbestandteile (SIP) wie Steuern, Abgaben, Umlagen oder Entgelte. Endkundenpreise sind die Preise, die Endkunden für den Bezug von Strom zahlen. Sie bestehen aus einer marktlichen Komponente für Beschaffung und Vertrieb sowie SIP. In dieser Studie werden die Endkundenpreise zur Bewertung der Einsparungen in den Anwendungsfällen *V2H* und *V2H+* herangezogen. Die Großhandelspreise bilden dabei zusammen mit einem Aufschlag für Vertrieb die marktliche Komponente der Endkundenpreise. Großhandelspreise werden in dieser Studie zudem genutzt, um die Spotmarkt-Erlöse im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* abzuschätzen.

Großhandelspreise

Als Großhandelspreise für das Basisjahr 2023 werden die Day-Ahead-Preise am EPEX-Spotmarkt in 15-minütiger Auflösung verwendet.¹⁸ Für 2030 und 2040 werden die auf Schattenpreisen basierenden Day-Ahead-Preise für die Zone Deutschland - Luxemburg aus den Ergebnissen des Langfristszenarios T45 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) von 2022 verwendet.¹⁹ Der marktliche Bestandteil der Endkundenpreise basiert in allen drei Anwendungsfällen in seiner **Höhe** auf den aus diesen Zeitreihen berech-

neten Jahres-Base-Großhandelspreisen für die Jahre 2023, 2030 und 2040. Die Preise für die Jahre zwischen den Stützjahren 2023, 2030 und 2040 werden linear interpoliert. Neben der absoluten Höhe der Großhandelspreise hat deren **zeitliche Variabilität** einen Einfluss auf die realisierbaren Einsparungen im Anwendungsfall *V2H+* sowie die Höhe der realisierbaren Erlöse im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage*. Im Anwendungsfall *V2H+* basiert die Struktur des variablen Tarifs auf der Struktur der Day-Ahead-Preise aus 2023. Damit ändert sich zwar die Höhe des marktlichen Anteils der Endkundenpreise über die Zeit, die Tarifstufen bleiben jedoch gleich. Zudem werden im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* die viertelstündlich bzw. stündlich aufgelösten Preiszeitreihen aus 2023, 2030 und 2040 als Day-Ahead-Spotmarkt-Preise genutzt.

Im Jahr 2023 waren die Preispannen am Day-Ahead-Markt in Deutschland sehr hoch. Zudem gab es viele Stunden mit negativen Preisen. Die zeitliche Variabilität der Spotmarktpreise basierend auf den oben genannten Preiszeitreihen für 2030 und 2040 ist dahingegen deutlich niedriger. Diese Preiszeitreihen wurden mit einem Kostenminimierungsmodell, unter Annahme eines perfekten Marktes berechnet und erlauben mathematisch bedingt keine negativen Preise.²⁰ Dadurch ist die Variabilität in den für die Zukunft berechneten Preiszeitreihen niedriger als im Basisjahr 2023. Dies ist vertretbar, da auch in der Realität aufgrund des Zubaus von Speichern zu erwarten ist, dass die Variabilität und damit das Arbitrage-Potenzial zukünftig stark sinkt ([siehe Kapitel 4](#)).²¹ Die auf dieser Basis berechneten Erlöse sind aufgrund der geringen Preisvariabilität dennoch am unteren Ende des

2.0 ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN

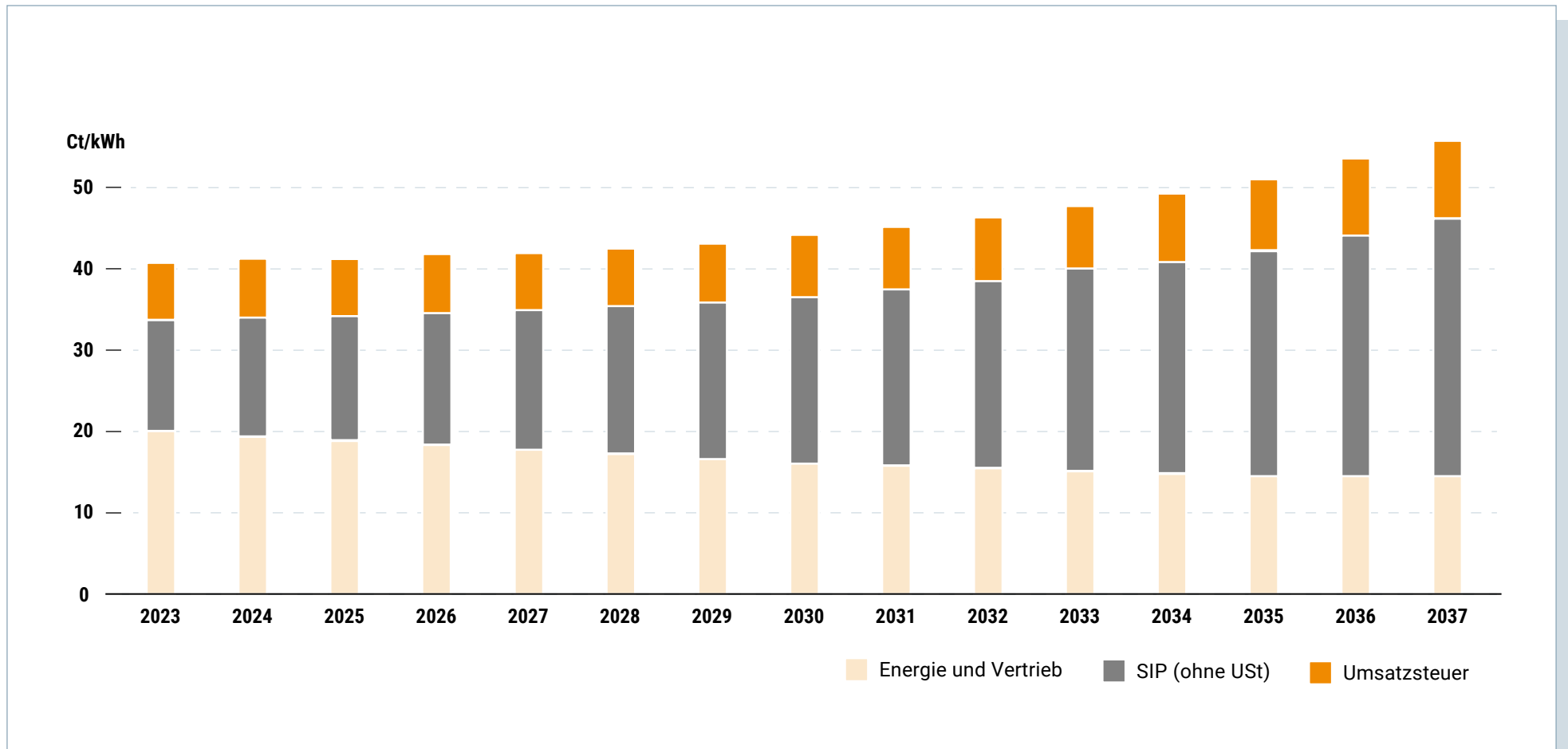
Erlöspotenzials zu sehen. Daher betrachten wir für den Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage*, bei dem die Variabilität der Preise besonderen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat, zwei Preisszenarien. Im *Preisszenario Geringe Variabilität* werden die Großhandelspreise, wie oben beschrieben, basierend auf den Langfristszenarien verwendet. Dieses Szenario dient zur Abschätzung einer unteren Grenze des Erlöspotenzials. Im *Preisszenario Hohe Variabilität* wird eine gleichbleibend hohe Preisvariabilität über 15 Jahre unterstellt, bei der sich das Erlöspotenzial nicht verändert. Dieses Szenario dient zur Abschätzung einer oberen Grenze des Erlöspotenzials.

Endkundenpreise

Neben den marktlich bestimmten Komponenten beinhalten Endkundenpreise zudem staatlich induzierte Preisbestandteile (SIP). Diese umfassen Netzentgelte, Umlagen (KWK-Umlage, Offshore-Netzumlage, §-19-StromNEV-Umlage und Wasserstoffumlage²²), die Konzessionsabgabe sowie Steuern (Stromsteuer und Umsatzsteuer). Daraus ergibt sich für das Jahr 2023 ein Endkundenpreis von 40,80 €ct/kWh. Zur Abschätzung zukünftiger Endkundenpreise werden die Steuersätze sowie die Höhe der Umlagen als konstant unterstellt. Die Entwicklung der Netzentgelte wird basierend auf den, laut Bundesrechnungshof, notwendigen Investitionen ins Stromnetz abgeschätzt.²³ Die resultierenden (Brutto-) Endkundenpreise sind in [Abbildung 2](#) dargestellt.

ABBILDUNG 2

(BRUTTO)-ENDKUNDENPREISE NACH ART DES PREISBESTANDTEILS



2.0 ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN

Die von den Haushalten zu zahlenden Endkundenpreise, die für die Bewertung der Anwendungsfälle ausschlaggebend sind, weichen unter Umständen jedoch von diesen **allgemeinen** Endkundenpreisen ab, da für einen Teil der Anwendungsfälle Vergünstigungen und Befreiungen von SIP zum Tragen kommen.

Analog zur Festlegung des Bundesfinanzministeriums zur Ermittlung der Einsparungen aus PV-Eigenverbrauch werden in den **Anwendungsfällen V2H und V2H+** die Netto-Endkundenpreise angesetzt. Sie steigen im Betrachtungszeitraum von 34,29 €ct/kWh im Jahr 2023 auf 46,69 €ct/kWh im Jahr 2037. Dem gegenüber stehen bei diesen Anwendungsfällen die entgangenen Erlöse aus der Einspeisevergütung in Höhe von 8,2 €ct/kWh.²⁴

Im **Anwendungsfall Zeitliche Arbitrage** sind neben den Erlösen aus dem Handeln am Spotmarkt die Kosten, die beim Bezug, der Zwischenspeicherung und der Rückspeisung des Stroms entstehen, ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit. Dazu kommen Batteriespeicherverluste sowie die Kosten für den Aggregator. Bei der Abrechnung durch den Aggregator wird angenommen, dass dieser die Erlöse nach Abzug einer monatlichen Gebühr von 8 €²⁵ an die Endkunden durchreicht. Somit werden auch negative Strompreise weitergegeben und mit verrechnet. Die Abrechnung erfolgt auf Jahresbasis.²⁶

Die Kosten für Strombezug, -speicherung und Rückspeisung hängen stark von den regulatorischen Rahmenbedingungen ab, die bestimmen, wer welche SIP in welcher Höhe für welche Aktion (Ein-/ Ausspeisung) zu zahlen hat. Unterschiedliche Arten von Batteriespeichern werden dabei derzeit sehr unterschiedlich mit Netzentgelten, der Stromsteuer und Umlagen belastet.²⁷

Für Großspeicheranlagen gilt nach § 118 Abs. 6 EnWG²⁸ eine teilweise oder vollständige Netzentgeltbefreiung. Rückspeisende Elektromobile sind jedoch nicht prinzipiell von den Netzentgelten befreit. Allerdings können sie als steuerbare Verbrauchseinrichtungen von einem reduzierten Netzentgelt nach § 14a Abs. 1 EnWG profitieren. Stationäre Batteriespeicher sind nach § 5 Abs. 4 StromStG²⁹ von der Stromsteuer befreit, wenn der zwischengespeicherte Strom ins Netz zurückgespeist wird. Diese Befreiung gilt jedoch nicht für Elektrofahrzeugbatterien, d. h. hier fällt die Stromsteuer an. Stromspeicheranlagen sind nach § 21 EnFG³⁰ zudem von der KWK-, Offshore- und §19StromNEV-Umlage befreit. Dies gilt nach § 21 Abs. 3 EnFG auch für bidirektional genutzte Ladepunkte. Nach Einschätzung von Juristen ist die Wasserstoffumlage jedoch weiterhin zu zahlen.³¹

Zudem ist gerade in Änderung befindlich, auf welche Aktion SIP zu zahlen sind. Stand Herbst 2024 müssen Betreiber von Elektrofahrzeugen, die am Spotmarkt Erlöse durch *zeitliche Arbitrage* erzielen wollen, zweifach SIP auf den gehandelten Strom zahlen: das erste

2.0 ANWENDUNGSFÄLLE UND ANNAHMEN

Mal, wenn der Strom aus dem Netz ausgespeist wird und das zweite Mal bei der Rückspeisung. Letzteres ist der Fall, da sie bei der Rückspeisung derzeit als Versorger gelten. Die Bundesregierung plant dies jedoch im Rahmen des Gesetzes zur Modernisierung und zum Bürokratieabbau im Strom- und Energiesteuerrecht, für das ein Gesetzentwurf vorliegt,³² zu ändern. Da eine entsprechende Gesetzesänderung geplant ist, wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass SIP nur noch beim Strombezug zu entrichten sind.

Unter Berücksichtigung dieser regulatorischen Rahmenbedingungen betragen die durchschnittlichen Netto-Endkundenpreise für den Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* für das Jahr 2023 27,31 €/ct/kWh. Sie steigen über den Betrachtungszeitraums von 15 Jahren auf 28,87 €/ct/kWh im Jahr 2037. Der marktliche Anteil an den Endkundenpreisen beträgt im Startjahr 19,93 €/ct/kWh und sinkt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf 14,40 €/ct/kWh.

ANNAHMEN ZUR DISKONTIERUNG

Für die Diskontierung wird im Hauptszenario ein Kalkulationszinssatz von 3 % angesetzt. Diese Kenngröße ist gängig in der verwandten Literatur, auch wenn der Kalkulationszinssatz für private Haushalte unter Ökonomen kontrovers diskutiert wird, da die Bestimmung der Opportunitätskosten komplex ist.³³ Der Kalkulationszinssatz setzt sich aus einem Basiszins und einer Risikoprämie zusammen. Als „risikofreier“ Basiszins setzen wir die durchschnittliche Preissteigerungsrate zwischen 2014 und 2023 in der Konsumgruppe „Kauf von Fahrzeugen“³⁴ an. Zudem gehen wir im Basisszenario von einem Risikoaufschlag von 0 % aus (siehe Tabelle 1). Um bestehenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden zwei weitere Zinsszenarien betrachtet, in denen ein Risikoaufschlag von 1 % bzw. 2 % unterstellt wird. Eine solche Steigerung der Risikoprämie wäre auch durch das allgemein gestiegene makroökonomische Risiko begründet, allerdings sind diese Änderungen in der Erwartung der Haushalte anhand der verfügbaren Daten nicht quantifizierbar. Die drei Szenarien zeigen daher vor allem eine grobe Abschätzung der Sensitivität der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Diskontierung.³⁵

SZENARIO	KALKULATIONSZINSSATZ	BASISZINS	RISIKOAUFSCHLAG
Basis	3 %	3 %	0 %
Risiko 1	4 %	3 %	1 %
Risiko 2	5 %	3 %	2 %

Tabelle 1: Kalkulationszinssatz für die Diskontierung der Kapitalwerte in der Wirtschaftlichkeitsberechnung

WIRTSCHAFTLICHKEITS- ANALYSEN

VEHICLE-TO-HOME FÜR PROSUMER

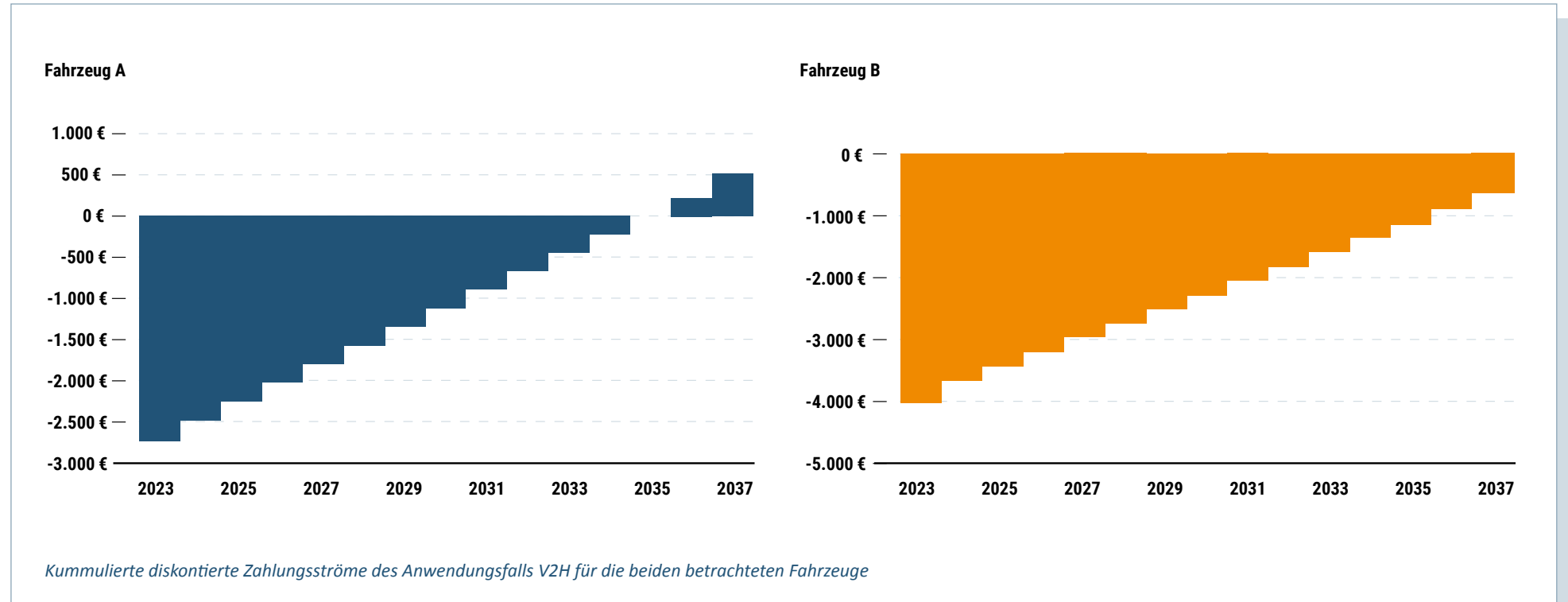
Die Wirtschaftlichkeit einer Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem PV-Strom ist abhängig von der Höhe der notwendigen Anfangsinvestition. Während die Summe der diskontierten Zahlungsströme für Fahrzeug A nach 13 Jahren positiv ist, bleibt sie für Fahrzeug B über den Betrachtungszeitraum negativ. Dies ist in [Abbildung 3](#) dargestellt, wobei die Balken jeweils den kumulierten Wert für das jeweilige Jahr darstellen und ab der Investition im Jahr 2023 über 15 Jahre aufsummiert werden. Die Kapitalwerte des Anwendungsfalls betragen 486 € für Fahrzeug A und – 661 € für Fahrzeug B. Der Profitabilitätsindex beträgt 1,60 für Fahrzeug A und 0,84 für Fahrzeug B. Die höheren Anfangsinvestitionen des Fahrzeugs B können damit nicht durch höhere Einsparungen, die durch die größere Batteriekapazität und höhere Ladeleistung möglich sind, kompensiert werden. Bei der Gesamtkostenbetrachtung sind die Verluste der Batterien und des Ladevorgangs pauschal berücksichtigt. Aktuell weisen insbesondere die Leistungselektronik und

Ladegeräte im Fahrzeug Standby-Verluste auf, die insbesondere bei kleiner Rückspeiseleistung für die Bewertung von Bedeutung sein können. Mittelfristig wird hier erwartet, dass bei einer weiteren Verbreitung von Vehicle-To-Home Konzepten, diese Verluste durch die Anpassungen an den Komponenten bzw. eine optimierte Aktivierung reduziert werden können.

FAZIT Die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem PV-Strom ist bei Fahrzeug A nach 13 Jahren profitabel. Da die Profitabilität aus den Einsparungen im Vergleich zum Strombezug aus dem Netz resultiert, steigt sie mit steigenden Endkundenpreisen. Aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen ist der Anwendungsfall V2H für Fahrzeug B nicht profitabel.

ABBILDUNG 3

ANWENDUNGSFALL VEHICLE-TO-HOME



VEHICLE-TO-HOME MIT VARIABLEM TARIF

Der Anwendungsfall *V2H+* ist für beide betrachteten Fahrzeuge profitabel. Die Fahrzeugbatterien können in diesem Anwendungsfall, genau wie im Anwendungsfall *V2H*, zur Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem PV-Strom genutzt werden. Da der Haushalt im Anwendungsfall *V2H+* den benötigten Strom aus dem Netz zu einem variablen Tarif bezieht, werden die Fahrzeugbatterien zusätzlich zur zeitlichen Verlagerung des Netzbezugs genutzt. Dadurch erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeugbatterienutzung für den Haushalt im Vergleich zum Anwendungsfall *V2H*. Die kumulierten, diskontierten Zahlungsströme sind im Anwendungsfall *V2H+* bereits nach einer Betriebszeit von sechs Jahren bei Fahrzeug A und acht Jahren bei Fahrzeug B positiv (siehe [Abbildung 4](#)). Die Kapitalwerte steigen deutlich auf 4.350 € bei Fahrzeug A bzw. 3.422 € bei Fahrzeug B. Grund für den Anstieg der Kapitalwerte sind die Einsparungen, die durch zeitliches Verschieben des Strombezugs aus dem Netz realisiert werden können. Diese sind abhängig von der Höhe der Tarifstufen, die über die Jahre unverändert bleiben.

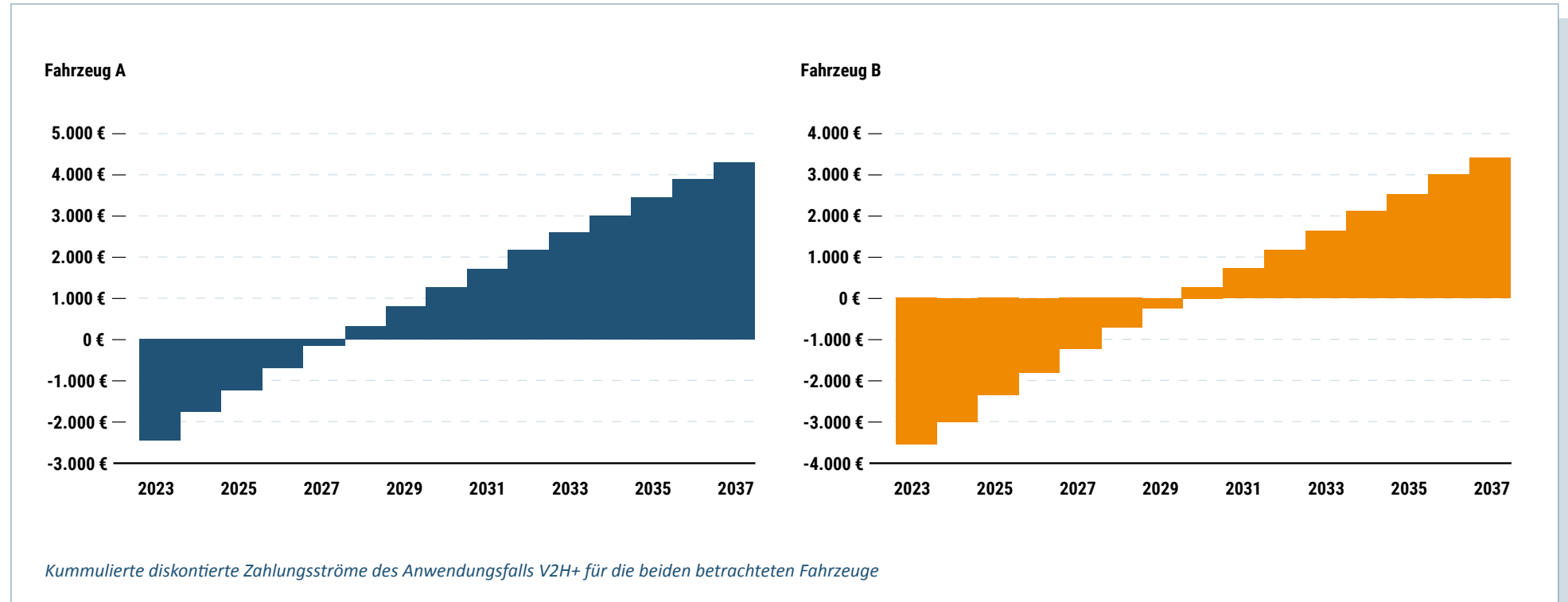
Der Profitabilitätsindex des **Fahrzeugs A** erhöht sich im Anwendungsfall *V2H+* auf 2,45, der des Fahrzeugs B auf 1,82. Der höhere Profitabilitätsindex des Fahrzeugs A signalisiert, dass bei Fahrzeug A pro investiertem Euro ein höherer Erlös erzielt werden kann als bei Fahrzeug B. Grund hierfür ist die höhere Anfangsinvestition des Fahrzeugs B.

Für **Fahrzeug B** ist jedoch zu beachten, dass alle Kapitalwerte über die komplette Laufzeit berechnet wurden. Würden jedoch die Herstellerangaben einer maximalen Betriebsdauer von 4.000 h oder eine maximale Energiemenge von 10.000 kWh berücksichtigt (siehe [Kapitel 2](#)), wäre die Möglichkeiten zur Nutzung der Funktion bidirektionales Laden bereits nach zwei Jahren erschöpft und der Anwendungsfall *V2H+* für Fahrzeug B nicht profitabel.

FAZIT Die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von PV-Strom und zur zeitlichen Verlagerung des Strombezugs bei zeitvariablem Tarif ist bei beiden Fahrzeugen profitabel. Der Anwendungsfall ist für Fahrzeug A nach sechs Jahren profitabel. Für Fahrzeug B ist der Anwendungsfall nach acht Jahren profitabel, vorausgesetzt, dass die Herstellerangaben, die die Möglichkeit zum bidirektionalen Laden einschränken, unberücksichtigt bleiben.

ABBILDUNG 4

ANWENDUNGSFALL VEHICLE-TO-HOME-PLUS



ZEITLICHE ARBITRAGE DURCH SPOTMARKTHANDEL

Beim Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* stellt der Haushalt einem Aggregator einen Teil seiner Fahrzeugbatterie zur Verfügung, der diese am Spotmarkt vermarktet. Anders als bei den Anwendungsfällen *V2H* und *V2H+* wird beim Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* der Strom aus der Batterie ins Stromnetz zurückgespeist anstatt ins Haushaltsnetz gespeist. Die Wirtschaftlichkeit dieses Anwendungsfalls wird maßgeblich durch zwei Faktoren bestimmt: die regulatorischen Rahmenbedingungen und die zeitliche Variabilität der Spotmarktpreise. Um dieser Sensitivität Rechnung zu tragen, betrachten wir die Auswirkungen von jeweils zwei Entwicklungen der regulatorischen Rahmenbedingungen und der Preisvariabilität.

[Abbildung 5](#) zeigt die kumulierten, diskontierten Zahlungsströme für den Fall, dass die Variabilität der Preise am Spotmarkt über den Betrachtungszeitraum stark zurück geht (Szenario **Geringe Preisvariabilität**). Unabhängig davon, welche Entwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen unterstellt wird, bleiben die kumulierten, diskontierten Zahlungsströme im negativen Bereich. Die regulatorischen Rahmenbedingungen haben jedoch einen Einfluss auf die Höhe des negativen Kapitalwerts. Müssen auf den gehandelten Strom SIP gezahlt werden (linke Seite in [Abbildung 5](#)), sind die kumulierten

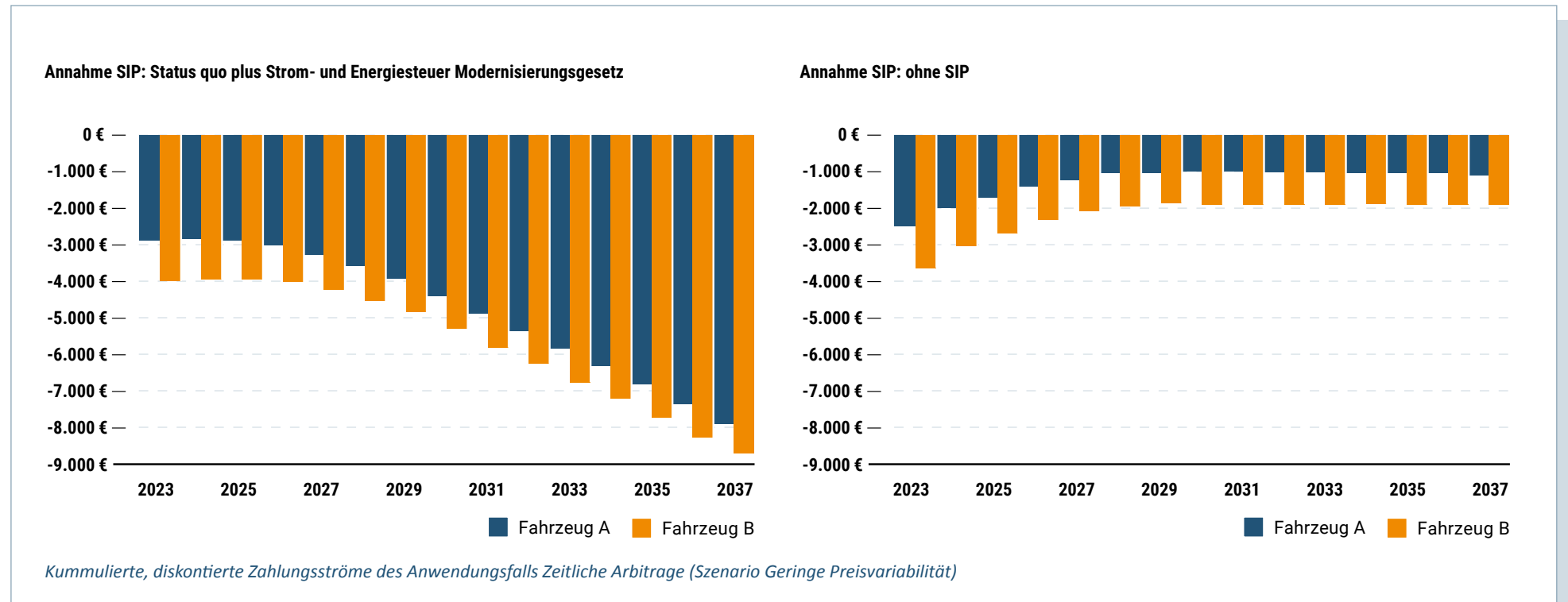
Zahlungsströme über die gesamten 15 Jahre deutlich negativ und sinken ab 2026 weiter ab. Gründe hierfür sind die geringen realisierbaren Erlöse am Spotmarkt sowie die, insbesondere durch die Netzentgelte, steigenden SIP. Der Kapitalwert des Fahrzeugs A beträgt in diesem Fall -7.868 €, der des Fahrzeugs B -8.686 €. Auch die Profitabilitätsindizes reflektieren die Unwirtschaftlichkeit des Anwendungsfalls unter diesen Rahmenbedingungen. Sie betragen $-1,61$ für Fahrzeug A und $-1,07$ für Fahrzeug B.

Auch für den Fall, dass keine SIP gezahlt werden müssen (rechte Seite in [Abbildung 5](#)), bleiben die Kapitalwerte des Anwendungsfalls, unabhängig vom Fahrzeug, bei geringer Variabilität der Preise am Spotmarkt negativ. Ab 2030 sind die am Spotmarkt realisierbaren Erlöse aus zeitlicher Arbitrage sogar geringer als die Gebühren, die an den Aggregator abzuführen sind. Die Kapitalwerte und Profitabilitätsindizes betragen in diesem Fall -1.047 € und $0,65$ für Fahrzeug A sowie -1.866 € und $0,56$ für Fahrzeug B.

Der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* ist damit bei über den Betrachtungszeitraum stark sinkender Variabilität der Preise am Spotmarkt nicht profitabel.

ABBILDUNG 5

ANWENDUNGSFALL ZEITLICHE ARBITRAGE (SZENARIO GERINGE PREISVARIABILITÄT)



3.0 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN

Wird hingegen von einer gleichbleibend hohen Variabilität der Preise am Spotmarkt ausgegangen (Szenario **Hohe Preisvariabilität**), hängt die Wirtschaftlichkeit des Anwendungsfalls davon ab, in welchem Umfang und in welcher Höhe SIP zu zahlen sind. Dies ist in [Abbildung 6](#), dargestellt. Müssen Steuern, Abgaben und Umlagen wie nach Umsetzung des Strom- und Energiesteuer Modernisierungsgesetz vorgesehen abgeführt werden (linke Seite in [Abbildung 6](#)), bleibt der Anwendungsfall unprofitabel. Die Profitabilitätsindices steigen auf $-0,05$ bei Fahrzeug A und auf $0,2$ bei Fahrzeug B. Die Kapitalwerte des Anwendungsfalls sind negativ und betragen für Fahrzeug A -3.152 € und für Fahrzeug B -3.356 €.

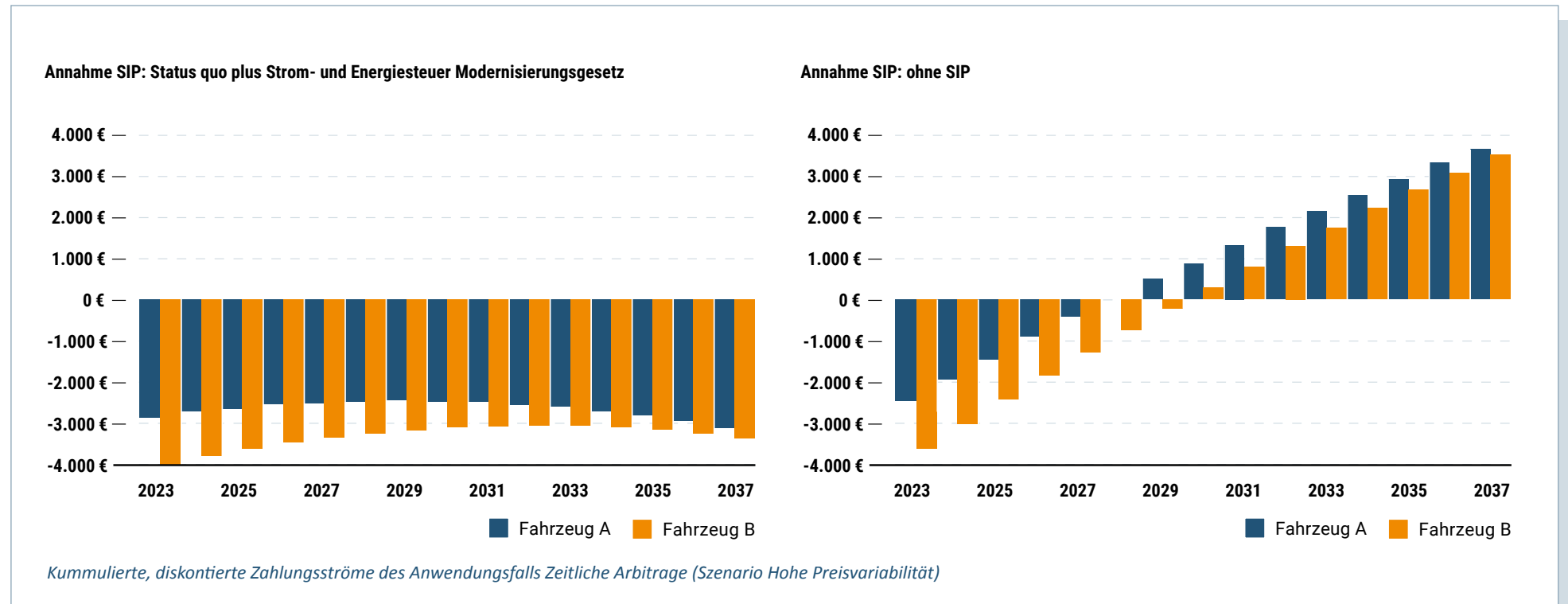
Profitabel wird der Anwendungsfall, wenn keine SIP gezahlt werden müssen (rechte Seite in [Abbildung 6](#)). Der Profitabilitätsindex des Fahrzeugs A erhöht sich in diesem Fall auf $2,22$, der des Fahrzeugs B auf $1,82$. Entsprechend sind auch die kumulierten, diskontierten Zahlungsströme nach sechs Jahren bei Fahrzeug A und nach sieben Jahren bei Fahrzeug B positiv. Die Kapitalwerte erhöhen sich auf

3.668 € bei Fahrzeug A und 3.645 € bei Fahrzeug B. Obwohl beide Fahrzeuge unter den angenommenen Rahmenbedingungen profitabel sind, ist Fahrzeug A aufgrund der niedrigeren Zusatzinvestitionen für diesen Anwendungsfall besser geeignet, was durch den deutlich höheren Profitabilitätsindex signalisiert wird.

Neben den externen Rahmenbedingungen wirken sich im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* auch die technischen Unterschiede der Fahrzeuge aus. So nähern sich die kumulierten, diskontierten Zahlungsströme der beiden Fahrzeuge in [Abbildung 6](#) über den Betrachtungszeitraum hinweg an. Aufgrund der um $3,6$ kW höheren Ladeleistung des Fahrzeugs B können höhere Erlöse durch das Ausnutzen von zeitlicher Arbitrage generiert werden. Die Ladeleistung ist damit einer der Treiber für die Wirtschaftlichkeit dieses Anwendungsfalls. Die Batteriegröße spielt hingegen in unseren Berechnungen nur eine geringe Rolle, auch weil nur innerhalb eines einzelnen Tages optimiert wird.

ABBILDUNG 6

ANWENDUNGSFALL ZEITLICHE ARBITRAGE (SZENARIO HOHE PREISVARIABILITÄT)



Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass die dargestellten Szenarien in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Anwendungsfalls, insbesondere was die Entwicklung der Spotmarktpreis-Variabilität betrifft, als Extremszenarien verstanden werden müssen. Die tatsächlich realisierbaren Gewinne sind daher im Korridor zwischen diesen Extremen zu erwarten.

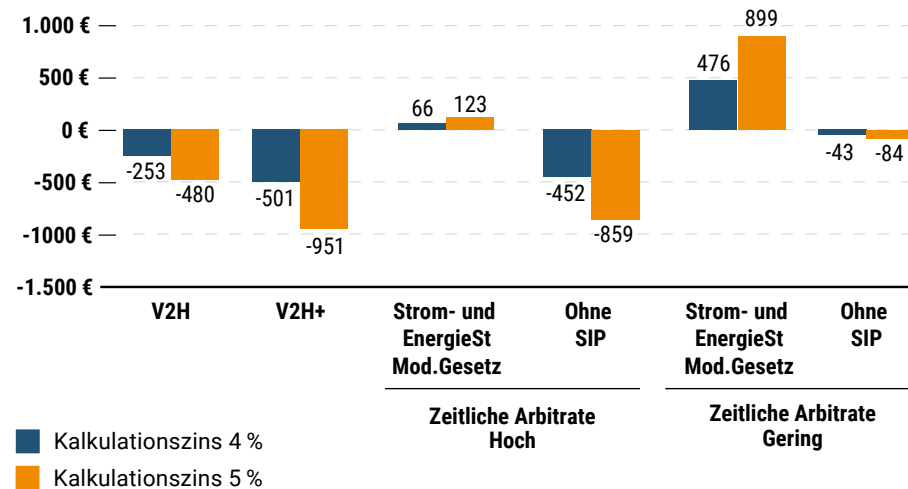
Weiterhin zu beachten ist, dass auch hier eine Berücksichtigung der Herstellerauflagen (maximale Betriebsdauer: 4.000 h; maximale Energiemenge: 10.000 kWh) sich negativ auf die Profitabilität des Anwendungsfalls bei Fahrzeug B auswirken würde. Würden die Herstellerauflagen berücksichtigt, dann wären die Einsparungen durch die Teilnahme am Spotmarkt zu gering, um die Investition zu rechtfertigen; die Kapitalwerte für den Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* wären dann durchgehend negativ. Derartige Beschränkungen führen ökonomisch betrachtet zusätzlich zu höheren Risikoaufschlägen, da der Haushalt die Erlöse in den späteren Jahren nicht mit Sicherheit einplanen kann. Die Auswirkungen höherer Risikoaufschläge in der Diskontierung werden im Folgenden betrachtet.

FAZIT Die Vermarktung der Fahrzeugbatterie über einen Aggregator am Spotmarkt wäre nur profitabel, wenn die Variabilität der Spotmarktpreise hoch bliebe und die staatlich induzierten Preisbestandteile deutlich gesenkt würden. Hierfür wäre die Einführung von Vergünstigungen für am Spotmarkt agierende nicht-stationäre Speicher notwendig. Im Extremfall, dass die Preisvariabilität auf dem Niveau von 2023 bleibt und keinerlei SIP zu zahlen sind, wäre der Anwendungsfall für Fahrzeug A nach sechs und, aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen, für Fahrzeug B nach sieben Jahren profitabel.

ABBILDUNG 7

VERÄNDERUNG DER KAPITALWERTE

Veränderung der Kapitalwerte von Fahrzeug A



Veränderung der Kapitalwerte von Fahrzeug A bei alternativen Kalkulationszinssätzen³⁶

ABZINSUNGS-SENSITIVITÄTEN

In [Abbildung 7](#) sind die Veränderungen der Kapitalwerte, die sich bei einer Erhöhung der Risikoaufschläge um 1 % bzw. 2 % ergeben, für Fahrzeug A dargestellt. Höhere Kalkulationszinsen in der Kapitalwertberechnung führen dazu, dass Nettoerlöse, die in der Zukunft realisiert werden, weniger stark gewichtet werden als Nettoerlöse, die zeitnah realisiert werden. In den Anwendungsfällen V2H und V2H+, in denen auch in Zukunft positive Nettoerlöse realisiert werden, sinken somit die Kapitalwerte auf 233 € bzw. 3.849 € bei einer Erhöhung des Kalkulationszinses um 1 % und auf 7 € bzw. 3.399 € bei einer Erhöhung des Kalkulationszinses um 2 %.

Da die zukünftigen jährlichen Nettoerlöse im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* teils negativ sind, erhöhen sich Kapitalwerte im Fall, dass SIP gezahlt werden müssen (d. h. spätere Verluste werden weniger stark gewichtet). Im Fall, dass keine SIP gezahlt werden müssen, sinken die Kapitalwerte bei einer Erhöhung des Kalkulationszinssatzes. Die Wahl des Fahrzeugs hat keine Auswirkungen auf die prinzipielle Kosten- und Erlösstruktur der Anwendungsfälle. Daher verändern sich die Kapitalwerte bei Fahrzeug B analog.

DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

4.0 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der **Wirtschaftlichkeitsanalysen** haben gezeigt, dass die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von eigenem PV-Strom (Anwendungsfall *V2H*) bei Fahrzeug A profitabel und bei Fahrzeug B nicht profitabel ist. Die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Zwischenspeicherung von PV-Strom und Strom aus dem Netz in Kombination mit einem zeitvariablen Tarif ist bei beiden Fahrzeugen profitabel. Zudem zeigen die Berechnungen, dass die Vermarktung der Fahrzeugbatteriekapazität am Spotmarkt nur unter bestimmten Rahmenbedingungen profitabel ist. Zum einen muss die Variabilität der Spotmarktpreise hoch bleiben. Zum anderen müssten die regulatorischen Rahmenbedingungen so angepasst werden, dass staatlich induzierte Preisbestandteile die Wirtschaftlichkeit nicht blockieren. Hierfür wäre die Einführung deutlicher Vergünstigungen für am Spotmarkt agierende, nicht-stationäre Speicher notwendig.

Die Aussagen bzgl. der Profitabilität der Anwendungsfälle für Fahrzeug B gelten nur, wenn die Herstellerbeschränkungen auf eine maximale Betriebsdauer von 4.000 h oder eine maximale Energiemenge von 10.000 kWh unberücksichtigt bleiben. Würden diese berücksichtigt, wäre kein Anwendungsfall für Fahrzeug B profitabel. Im Vergleich der Fahrzeuge hat sich zudem gezeigt, dass das Fahrzeug A aufgrund der niedrigeren Anfangsinvestitionen in bidirektionale Ladeinfrastruktur insgesamt eine höhere Profitabilität in den Anwendungsfällen aufweist.

Es können einige **zentrale Treiber für die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle** identifiziert werden. In den Anwendungsfällen *V2H* und *V2H+* wird sie zum einen maßgeblich durch die Höhe der Anfangsinvestitionen beeinflusst. Zum anderen ist die Höhe der Einsparungen, die durch die Zwischenspeicherung von eigenerzeugtem Strom in der Fahrzeugbatterie erzielt werden können, ein wesentlicher Treiber. Diese Einsparungen sind von den zwischengespeicherten Strommengen und deren spezifischem monetären Wert abhängig. Je höher die Netto-Endkundenstrompreise, bestehend aus marktlichem Anteil und SIP, desto größer sind die Einsparungen. Im Anwendungsfall *V2H+* hat zudem die Spreizung des variablen Tarifs, welche sich aus der Variabilität der Day-Ahead-Marktpreise von 2023 ergibt, einen Einfluss.

Im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* ist die zukünftige Variabilität der Spotmarktpreise neben den Anfangsinvestitionen der zweite wichtige Treiber für die Wirtschaftlichkeit. Je geringer die zukünftige Variabilität, desto geringer sind die erzielbaren Erlöse und damit die Profitabilität des Anwendungsfalles. Der dritte Haupttreiber im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* sind die Annahmen zu SIP, vor allem ob und im welchem Umfang SIP zu entrichten sind.

Im Folgenden wird der Einfluss der zentralen Treiber für die Wirtschaftlichkeit diskutiert und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen gezogen.

HÖHE DER ANFANGSINVESTITIONEN

Die Höhe der Anfangsinvestitionen in bidirektionale Ladeinfrastruktur haben einen entscheidenden Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle. Für diese Studie wurden die Preisangaben der Händler für aktuell am Markt verfügbare Wallboxen, die mit den betrachteten Fahrzeugen kompatibel sind, verwendet. Aufgrund des technologischen Fortschritts ist aber davon auszugehen, dass sich die preislichen Unterschiede zwischen klassischen unidirektionalen und bidirektionalen Ladestationen und Energiemanagementsystemen verringern werden. Insbesondere könnte perspektivisch V2X-fähige Ladeinfrastruktur auf Basis von AC-Technologie zu deutlich niedrigeren Zusatzinvestitionen führen.³⁷ Eine Übersicht über verfügbare Ladeinfrastruktur bietet die Studie Kühnbach et al. (2024).³⁸ Darin werden auch die möglichen technologischen Entwicklungen sowie die erwarteten Preisentwicklungen der Technologie dargestellt.

Für die betrachteten Anwendungsfälle würde sich durch eine Reduktion der notwendigen Anfangsinvestitionen in Ladeinfrastruktur die Profitabilität erhöhen. Allerdings würde selbst eine drastische Reduzierung nicht dazu führen, dass alle Anwendungsfälle profitabel wären. Im Extremfall, dass für notwendige bidirektionale Ladeinfrastruktur keine Zusatzinvestitionen notwendig wären, würde sich die Profitabilität der bisher unprofitablen Anwendungsfälle wie folgt entwickeln:

- **Fahrzeug A:** Der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* bleibt unprofitabel, wenn SIP auf den Strombezug zu zahlen sind. Dies ist unabhängig von der Entwicklung der Preisvariabilität. Sind jedoch keine SIP zu zahlen, wäre der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* nun profitabel.
- **Fahrzeug B:** Der Anwendungsfall *V2H* wäre profitabel. Der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* wäre nur noch unprofitabel, wenn SIP auf den Strombezug zu zahlen wären und die zukünftige Preisvariabilität niedrig wäre. (Die Aussagen zu Fahrzeug B gelten nur, wenn die Herstellerbeschränkungen zur Nutzung der bidirektionalen Funktionalität unberücksichtigt bleiben.)

Eine weitere Folge der unsicheren zukünftigen Preis- und Leistungsentwicklung bei Batterien ist die Unsicherheit über den Wiederverkaufswert. Aktuell gibt es in Deutschland kaum einen Markt für gebrauchte E-Autos, da die Unsicherheit zu hoher Diskrepanz zwischen Angebot und Zahlungsbereitschaft führen.³⁹ Dies betrifft auch indirekt auch Leasingmodelle, die nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn das Fahrzeug im Anschluss weiterverkauft werden kann. Unsere Studie nimmt jedoch vereinfachend an, dass das Fahrzeug den Halter nicht wechselt und betrachtet diese Marktunsicherheiten nicht.

FAZIT Die Höhe der Anfangsinvestitionen hat einen deutlichen Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle. Technologische Entwicklungen, die mit niedrigeren Preisen für bidirektionale Ladeinfrastruktur verbunden sind, würden die Profitabilität erhöhen. Der Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* wäre bei unveränderten regulatorischen Rahmenbedingungen und einer stark verringerten Preisvariabilität am Spotmarkt aber weiterhin unprofitabel.

VARIABILITÄT DER GROSSHANDELSPREISE

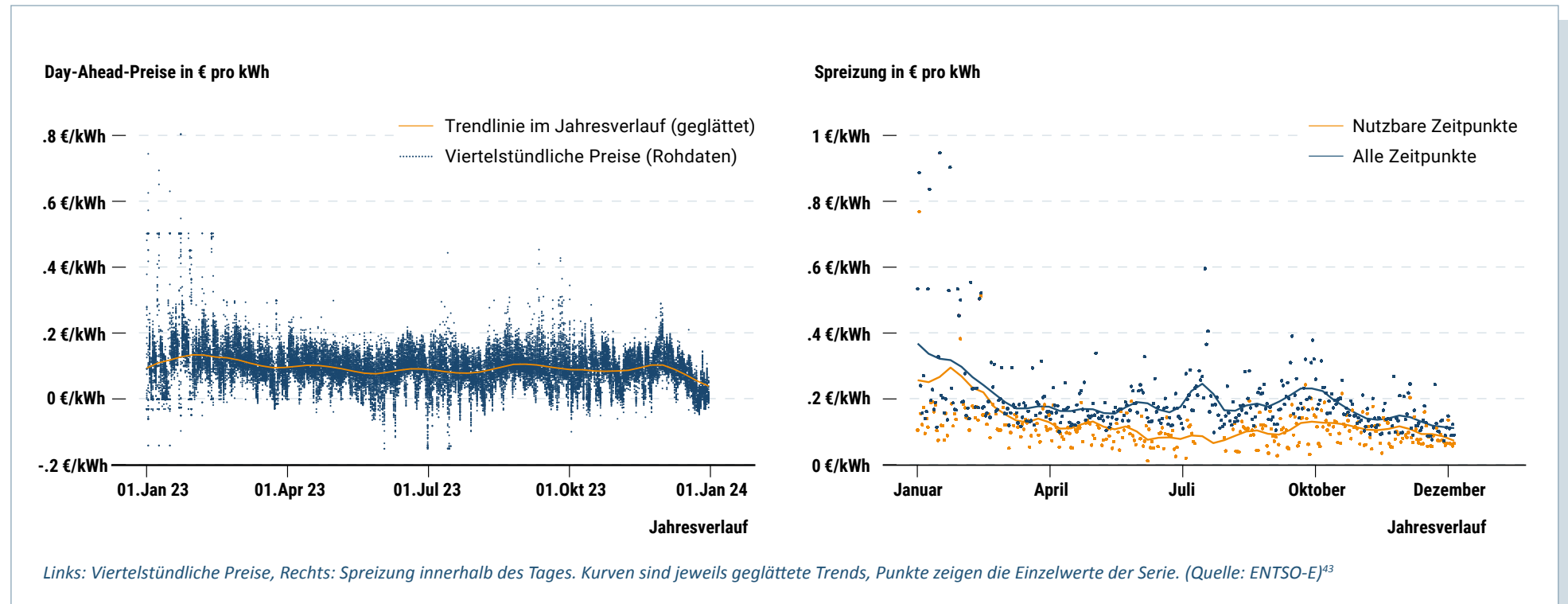
Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle ist die mit Unsicherheiten behaftete Entwicklung der Strompreise. Dies betrifft einerseits den Preistrend, also die Höhe der durchschnittlichen Großhandelspreise, andererseits die Entwicklung der Preisvariabilität.

Für die Erlöse in den Anwendungsfällen *V2H+* und *Zeitliche Arbitrage* durch Spotmarkthandel sind die untertägigen Preisschwankungen am Day-Ahead-Markt zentrale Treiber. Entscheidend ist die Preis-

spreizung, d. h. die Spanne zwischen dem jeweils niedrigsten und dem höchsten Preis im Tagesverlauf⁴⁰ (intra-day price spread). Die Haushalte profitieren in den Anwendungsfällen *V2H+* und *Zeitliche Arbitrage* von der Preisvariabilität am Spotmarkt bzw. in den marktlichen Bestandteilen der Endkundenpreise, indem sie in Stunden mit niedrigen Großhandelspreisen Strom beziehen und den Strombezug in Stunden mit hohen Preisen reduzieren. Im Jahr 2023 waren diese Preispannen in Deutschland sehr hoch. [Abbildung 8](#) zeigt im linken Teil die viertelstündlichen Preise am Day-Ahead Markt im Verlauf des Jahres 2023; die rote Linie zeigt den rollierenden Tagesmittelwert. Auffallend sind die vielen Stunden mit negativen Preisen. Zu diesen ist im Anwendungsfall *V2H+* laut unseren Annahmen auch der marktliche Anteil der Endkundenpreise negativ. Im Anwendungsfall *V2H+* können 3,96 % des Strombedarfs zu Zeiten mit negativen marktlichen Anteilen am Endkundenpreis bezogen werden.⁴¹ Trotz des niedrigen Anteils an der Gesamtmenge erhöhen diese Stunden die Profitabilität im Vergleich zum Anwendungsfall *V2H* erheblich. Im Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* werden 4,19 % des zeitlich variablen Bedarfs während negativer Strompreise bezogen.⁴²

ABBILDUNG 8

DAY-AHEAD-PREISE IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2023



4.0 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Abbildung 8 zeigt im rechten Teil die Preisspreizung und den Einfluss der Fahrzeugnutzung. Die geglättete blaue Kurve zeigt im Jahresverlauf die tägliche Preisspreizung unter Einbezug aller Viertelstunden; die Punkte dazu sind die einzelnen Tageswerte. Relevant für die Höhe der Einsparungen bzw. Erlöse ist jedoch nicht die Spreizung aller Viertelstunden, sondern die nutzbare Spreizung. Diese ist in roter Farbe für den Anwendungsfall *V2H+* dargestellt. Hier werden nur die Zeitpunkte berücksichtigt, in denen das Fahrzeug verfügbar ist und der SoC innerhalb des vorgegebenen Bereichs liegt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die tatsächlich nutzbare Spreizung deutlich niedriger ausfällt als die maximale Spreizung. Das ist vor allem im Sommer der Fall, wenn das Fahrzeug in den Sonnenstunden zur Tagesmitte nicht verfügbar ist. Im Jahresdurchschnitt beträgt die maximale Spreizung 0,19 €/kWh. Die nutzbare durchschnittliche Spreizung beim dem angenommenen Fahrprofil dagegen 0,13 €/kWh. Damit verbleibt beim Anwendungsfall *V2H+* ein erheblicher Preisunterschied, was einen positiven Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle hat. Da beim Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* keine Eigenerzeugung möglich ist, ist die Anzahl der nutzbaren Zeitpunkte hier größer, die Preisunterschiede sind jedoch nur geringfügig höher.

Die zukünftige Preisvariabilität wird von der Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und vor allem durch den Zubau und die Marktintegration von Speichern beeinflusst. Stockt der Zubau von Speichern bzw. gelingt es nicht, diese in die Strommärkte zu integrieren, ist auch zukünftig von einer hohen Preisvariabilität auszugehen.

Die Speicher, die die Preisvariabilität über variable Tarife oder durch den Handel am Spotmarkt nutzen können, würden davon profitieren. Entwickelt sich der Zubau von Speichern und deren Marktintegration jedoch wie z. B. in den Langfristszenarien des BMWK errechnet, hat dies einen preisglättenden Effekt und die Anwendungsfälle sind nicht mehr profitabel.⁴⁴ Um dieser Bandbreite der Entwicklungen Rechnung zu tragen, wurden für den Anwendungsfall *Zeitliche Arbitrage* durch Spotmarkthandel zwei Preisszenarios betrachtet. Für den Anwendungsfall *V2H+* wurde jedoch von einer gleichbleibenden untertägigen Preisvariabilität ausgegangen. Die Ergebnisse für diesen Anwendungsfall sind daher als obere Grenze der Erlöspotenziale zu betrachten.

FAZIT Die Höhe der nutzbaren Preisunterschiede beim variablen Endkundertarif sowie der nutzbaren Variabilität der Preise am Spotmarkt hat einen Einfluss auf die Profitabilität der Anwendungsfälle *V2H+* und *Zeitliche Arbitrage*. Eine auch zukünftig hohe Preisvariabilität am Spotmarkt ist Voraussetzung für die Profitabilität des Anwendungsfalls *Zeitliche Arbitrage*. Dies impliziert, dass die Nutzung von Fahrzeugbatterien für den Arbitragehandel am Spotmarkt nur so lange profitabel ist, bis der Markt mit Speichern gesättigt ist.

ENTWICKLUNG DER STAATLICH INDUZIERTEN PREISBESTANDTEILE

Neben der Entwicklung der Großhandelspreise hat die zukünftige Entwicklung der Höhe der SIP einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Anwendungsfälle. Während hohe SIP Vehicle-to-Home-Anwendungen profitabler machen, behindern sie die Wirtschaftlichkeit von Anwendungen, die Strom nur zur Bereitstellung von Flexibilität beziehen, zwischenspeichern und wieder ins Netz zurückspeisen.

Die Entwicklung der Netzentgelte ist dabei von besonderer Relevanz. Obwohl sie bereits heute zirka ein Viertel des Endkundenpreises ausmachen, ist auch zukünftig von einem Anstieg der Netzentgelte auszugehen. Basierend auf Schätzungen des Bundesrechnungshofs⁴⁵ zur Entwicklung des Netz-Investitionsbedarfs wurde in dieser Kurzstudie angenommen, dass sich die Netzentgelte bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2037 fast verdreifachen. Bei dieser Abschätzung wurde von einer unveränderten Netzentgeltsystematik ausgegangen. Das bedeutet, die einzelnen Verbrauchergruppen würden zukünftig nach der gleichen Logik wie heute belastet. Diese Annahme ist einerseits aufgrund fehlender anderweitiger Daten vertretbar. Andererseits sind zukünftig Veränderungen in der Netznutzung durch Verbraucher im Rahmen der Energiewende dennoch wahrscheinlich. Z. B. hat die Verbreitung von elektrischen Anwendungen wie Wärmepumpen sowie die zunehmende Installation von PV-Anlagen Einfluss auf den Strombedarf und damit die Netznutzung. Es ist davon auszugehen, dass auch die Netzentgeltsystematik an diese Entwicklungen angepasst werden wird, um weiterhin eine möglichst faire und gerechte

Kostentragung zu gewährleisten und ggf. Anreize für systemdienliches Verbrauchsverhalten zu setzen. Zu beachten ist zudem, dass die bisherigen Regelungen aufgrund des Urteils des Gerichtshofs der Europäischen Union (EuGH) vom 02.09.2021, welches die ausschließliche Kompetenz für die Regelung von Netzanschluss und Netzzugang der Bundesnetzagentur überträgt, zum 31.12.2028 auslaufen.⁴⁶ Wie sich eine Anpassung der Netzentgeltsystematik konkret auf die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle auswirken würde, ist nicht abschätzbar.

FAZIT Steigende staatlich induzierte Preisbestandteile erhöhen die Endkundenpreise. Da diese als Basis für die Bewertung der Einsparungen dienen, erhöhen steigende Endkundenpreise die Profitabilität von Vehicle-to-Home-Anwendungen. Gleichzeitig reduzieren sie die Profitabilität von Vehicle-to-Grid-Anwendungen mit Rückspeisung ins Netz. Dies sollte bei einer Anpassung der SIP, wie bspw. einer möglichen Neugestaltung der Netzentgeltsystematik, berücksichtigt werden.

REGULATORISCHER RAHMEN FÜR VEHICLE TO GRID

Der regulatorische Rahmen für Speicher ist sehr fragmentiert und umfasst eine Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen (siehe Kapitel 2). Unterschiedliche Rahmenbedingungen für Speicher gelten z. B. in Abhängigkeit von der Größe, der Art des Speichermediums oder in Abhängigkeit davon, ob es sich um stationäre oder nicht-stationäre, d. h. mobile Speicher handelt. Z. B. sind Speicher je nach Art und Größe ganz oder teilweise von SIP befreit. Zudem sind mit Gesetzgeber und Bundesnetzagentur unterschiedliche Organe für die Ausgestaltung

der SIP zuständig. Diese Fragmentierung des regulatorischen Rahmens führt zu einer gewissen Undurchsichtigkeit, die hemmend auf die Marktdurchdringung von Speichern wirken kann.

Vor allem für nicht-stationäre Speicher wie Elektrofahrzeuge gelten Rahmenbedingungen, die hemmend auf V2X-Anwendungsfälle wirken. Ein Beispiel ist, dass Elektrofahrzeuge derzeit bei der Rückspeisung ins Netz als Versorger gelten. Dadurch müssen sie auf den rückgespeisten Strom, für den sie beim Bezug bereits SIP gezahlt haben, ein weiteres Mal SIP zahlen. Dieser Umstand soll im Rahmen des Gesetzes zur Modernisierung und zum Bürokratieabbau im Strom- und Energiesteuerrecht, dessen Inkrafttreten für den 1. Januar 2025 geplant war, aber aktuell noch nicht erfolgt ist⁴⁷, geändert werden. Dies kann im Sinne eines Abbaus von Hemmnissen als Entwicklung in die richtige Richtung gesehen werden. Auch neue Vorgaben auf EU-Ebene sollen mittelfristig zu diesem Abbau beitragen. Insbesondere ist eine Reform der EU-Richtlinie über Messgeräte in Arbeit und wird im ersten Quartal 2025 in der Kommission vorgelegt (Kenntnisstand: 15.01.2025).⁴⁸

FAZIT Der derzeitige regulatorische Rahmen für Speicher kann aufgrund seiner Kleinteiligkeit als Hemmnis für die Marktdiffusion von Speichern betrachtet werden und sollte daher vereinfacht und stärker vereinheitlicht werden. Hemmnisse wie der Umstand, dass Elektrofahrzeuge bei der Rückspeisung als Versorger gelten, sollten wie geplant abgebaut werden.

WEITERER FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARF

Die oben dargestellten Schlussfolgerungen, die im Rahmen der Analyse der drei Anwendungsfälle getroffen wurden, geben erste Hinweise auf weiteren Forschungsbedarf und politischen Handlungsbedarf. Da sie drei spezifische Anwendungsfälle für einen einzelnen modellierten Haushalt betreffen, zeigen sie jedoch nur einen Teil des Bildes. Ein Beispiel sind die Annahmen zum Verbrauchsverhalten. Während der Haushaltsbedarf als nicht flexibel angenommen wird, kann das Laden der Fahrzeugbatterie flexibel im Tagesverlauf verschoben werden. Zudem wird keine Saisonalität der Bedarfe unterstellt. Weitere Forschungsarbeit ist nötig, um besser zu verstehen, wie sich ein heterogeneres Verbrauchsverhalten von Haushalten mit unterschiedlichen Verschiebungsmöglichkeiten auf die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsfälle für V2X auswirkt. Hierfür wäre jedoch eine umfangreichere Datenlage notwendig, die bspw. durch eine Erhebung von Smart-Meter-Daten generiert werden könnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen könnten neben Wirtschaftlichkeitsaspekten zudem Aufschluss über Möglichkeiten der netzdienlichen Nutzung kleinteiliger Flexibilitäten geben. Auch ermöglicht die Betrachtung unterschiedlicher Haushaltstypen die Analyse von Verteilungswirkungen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem hinsichtlich der Ausgestaltung des Systems an staatlich induzierten Preisbestandteilen und dessen Anpassung an die energie- und klimapolitischen Ziele. Ein Fokus sollte dabei auf der Identifikation und dem Abbau von Hemmnissen

4.0 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

liegen. Des Weiteren ist zu prüfen, wie ausreichend Speicher zur Gewährleistung der – laut Langfristszenarien – notwendigen Flexibilität zugebaut werden können. Dabei sollte betrachtet werden, welche Speichertechnologien prioritär zugebaut werden sollten und wie die entsprechenden Anreize für deren Zubau ausgestaltet werden sollten.

Ein weiterer Fokus sollte sein, welche Speichertechnologien für welche Art der Anwendung im optimalen Fall eingesetzt werden sollten. Dabei sollten neben Vehicle-to-Home-Anwendungen und dem Handel am Spotmarkt auch weitere Anwendungsfälle betrachtet werden. Diese sollten insbesondere netzbezogene Anwendungsfälle umfassen, wie netzdienliches Laden bzw. Netzdienstleistungen im Verteilnetz sowie die Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Regelenergie.

Insofern es als sinnvoll erachtet wird, die Flexibilität von Fahrzeugbatterien zur Glättung der Preise am Spotmarkt zu nutzen, sollte über eine weitere Senkung der in diesem Rahmen zu zahlenden SIP nachgedacht werden, da dies einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Anwendungsfalls hätte. Zudem sollte untersucht werden,

wie Marktregeln und Regularien ausgestaltet sein sollten und welche Geschäftsmodelle es ermöglichen, dass der Betrieb von Speichern auch zukünftig, bspw. bei geringer Preisvariabilität am Spotmarkt profitabel bleibt, z. B. durch Aggregation über die Zeit und in Flotten.

FAZIT Forschungsbedarf besteht hinsichtlich einer Erweiterung des Untersuchungsgegenstands. Insbesondere sollten weitere Haushalte mit einem anderen Verbrauchsverhalten und Flexibilitätspotenzial betrachtet werden. Zudem besteht Forschungs- und Handlungsbedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen und insbesondere der staatlich induzierten Preisbestandteile wie Steuern, Abgaben und Entgelten. Der Fokus sollte dabei der Abbau von Hemmnissen und Fehlanreizen sein, die nicht mit den energiepolitischen Zielen konform sind. Dieser Abbau ist gleichzeitig Voraussetzung für die Umsetzung neuer Geschäftsmodelle, die auf der Bereitstellung von Flexibilität basieren und das Stromsystem entlasten können.



**FUSSNOTEN-
VERZEICHNIS**

FUSSNOTENVERZEICHNIS

- ¹ Hannan, M. A., et al. (2022). Vehicle to grid connected technologies and charging strategies: Operation, control, issues and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130587. ↗
- ² Siehe Übersicht des Vehicle to Grid Hubs: ↗
- ³ Themenseite des ADAC: Stand 28.11.2024. ↗
- ⁴ Übersicht der Fahrzeuge von Mobility House: ↗; Aktuelle Zahlen des Kraftfahrtbundesamts, Tabelle fz28_2024_10.
- ⁵ IRENA (2019). *Innovation Outlook EV Charging*. Verfügbar unter: ↗
- ⁶ Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2020). *FACTSHEET „VEHICLE TO GRID“ –KUNDENNUTZEN UND NETZINTEGRATION*. Verfügbar unter: ↗
- ⁷ Gong, J., Wasilewski, D., Figgen er, J., Bahn, S., Rücker, F., Ring Beck, F., & Sauer, D. U. (2024). Quantifying the impact of V2X operation on electric vehicle battery degradation: An experimental evaluation. *ETransportation*, 20, 100316.
- ⁸ Gschwendtner, C., Sinsel, S. R., & Stephan, A. (2021). Vehicle-to-X (V2X) implementation: An overview of predominate trial configurations and technical, social and regulatory challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 110977.
- ⁹ European Commission: Directorate-General for Climate Action, Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T. et al., *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fueled vehicles through LCA – Final report*, Publications Office of the European Union, 2020, ↗
- ¹⁰ Angaben von Fachbetrieben Danlec, Elektro Schmidt, und AceFlex: ↗, Wallbox installationen ↗, Wallbox Nutzungsdauer ↗
- ¹¹ Das techno-ökonomische Modell betrachtet die Wirtschaftlichkeit unter den Annahmen perfekter Vorhersage und bewertet nach fixen Größen der Kapitalwertmethode. Das spiegelt nur bedingt die tatsächliche Entscheidung privater Haushalte. So zeigen empirische Studien zu Autokauf und Benzinpreisen, dass private Haushalte vorrangig die aktuellen Preise zur Prognose verwenden bei der Investitionsentscheidung. Vgl. hierzu bspw. Anderson, S. T., Kellogg, R., & Sallee, J. M. (2013). What do consumers believe about future gasoline prices? *Journal of Environmental Economics and Management*, 66(3), 383-403.
- ¹² Der Algorithmus für die Glättung ist in allen drei Kurven gleich (lokales Polynom mit Epanechnikov Kernel); die Unterschiede in der Darstellung ergeben sich aus der Variabilität in den Eingangsdaten.
- ¹³ Statistisches Bundesamt (2022). *Auswertung*. Verfügbar unter: ↗

5.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- ¹⁴ Fahrprofil aus ALADIN Projekt (Alternative Automobiles Diffusion und Infrastructure). Projekt-Website (englisch): <https://aladin-model.eu/aladin-en/index.php>. Deutsche Informationen finden sich auf der Website des Ariadne-Projekts: ↗
- ¹⁵ Fischer, H. (2023). Opportunities and Challenges for Connected Energy Services in the Building Sector: A Techno-Economic and Scenario Analysis.
- ¹⁶ Signer, T., Baumgartner, N., Ruppert, M., Sandmeier, T., & Fichtner, W. (2024). Modeling V2G spot market trading: The impact of charging tariffs on economic viability. *Energy Policy*, 189, 114109.
- ¹⁷ Informationen dazu auf der Website Bidirektionale Wallboxen. Verfügbar unter: ↗
- ¹⁸ Daten von ENTSO-E, verfügbar unter ↗
- ¹⁹ Die Langfristszenarien werden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz erstellt und bilden die zukünftige Entwicklung des Energiesystems ab. Eine Beschreibung der Szenario Annahmen sowie die Schattenpreise sind. Verfügbar unter: ↗
- ²⁰ Vgl. Ausführung in Bernath, C. (2023). Auswirkungen der Sektorkopplung von Strom und Wärme durch Wärmenetze auf das europäische Stromerzeugungssystem: Eine modellbasierte Szenarioanalyse. Dissertation: Karlsruher Institut für Technologie. ↗
- ²¹ Frontier Economics (2023). Großbatteriespeicher im Deutschen Stromsystem. Siehe Abbildung S. 7. Verfügbar unter ↗
- ²² Die Wasserstoffumlage beträgt derzeit 0 €/Ct/kWh.
- ²³ Bundesrechnungshof (2024): Bericht nach § 99 BHO zur Umsetzung der Energiewende im Hinblick auf die Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit der Stromversorgung. Verfügbar unter: ↗
- ²⁴ Annahme Inbetriebnahme im Jahr 2023.
- ²⁵ Die Pauschale ist angelehnt an den Grundpreis von existierenden Flexibilitätsangeboten, die bspw. von OctopusEnergy oder Tibber angeboten werden.
- ²⁶ Hier gibt es in der Praxis unterschiedliche Geschäftsmodelle, welche u. A. auch das Durchreichen negativer Preise berücksichtigen, vgl. bspw. Stahl (2023). Geld fürs E-Auto-Laden: So profitieren Sie von negativen Strompreisen. Efahrer.com. Verfügbar unter: ↗

5.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- ²⁷ Kirch (2023). BMWK veröffentlicht Entwurf der Stromspeicher-Strategie. LEGAL UPDATE ENERGIEWIRTSCHAFTSRECHT, Köln, 22.12.2023. Verfügbar unter: [↗](#)
- ²⁸ Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 26 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236) geändert worden ist
- ²⁹ Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378; 2000 I S. 147), das zuletzt durch Artikel 13 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 412) geändert worden ist
- ³⁰ Energiefinanzierungsgesetz vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237, 1272), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 8. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 151) geändert worden ist
- ³¹ Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH Hrsg. (2023). unIT-e² Praxisbericht, verfügbar unter: [↗](#)
- ³² Deutscher Bundestag, 20. Wahlperiode, Drucksache 20/12351, 24.07.2024, verfügbar unter: [↗](#)
- ³³ Die Prognose der zukünftigen Inflation ist wie die der Strompreise mit Unsicherheit behaftet. Tatsächlich korrelieren beide Größen: starke Anstiege im Strompreis bedingen höhere Inflation (unter sonst gleichen Bedingungen). Wichtig für heutige Investitionsentscheidungen sind allerdings maßgeblich die Erwartungen an die zukünftige Preisentwicklung. Im Fall von V2G ist diese Erwartungsbildung aus Sicht der Haushalte nicht eindeutig. Einerseits sind fallende Kosten für Speicher, Fahrzeuge und Infrastruktur zu erwarten. Andererseits sind eher steigende Preise für Wartung und Betrieb in Zukunft zu erwarten, nicht nur durch allgemeine Inflation, sondern vor allem verschärft durch Fachkräftemangel. Diese Erwartungsbildung liegt außerhalb des Rahmens der Kurzstudie.
- ³⁴ Statistisches Bundesamt (2024): Verbraucherpreisindex: Deutschland, Jahre, Klassifikation der Verwendungszwecke des Individualkonsums (COICOP 2-5-Steller Hierarchie), verfügbar unter: [↗](#)
- ³⁵ Das techno-ökonomische Modell betrachtet die Wirtschaftlichkeit unter den Annahmen perfekter Vorhersage und bewertet nach fixen Größen der Kapitalwertmethode. Das spiegelt nur bedingt die tatsächliche Entscheidung privater Haushalte. So zeigen empirische Studien zu Autokauf und Benzinpreisen, dass private Haushalte vorrangig die aktuellen Preise zur Prognose verwenden bei der Investitionsentscheidung, vgl. Anderson, S. T., Kellogg, R., & Sallee, J. M. (2013). What do consumers believe about future gasoline prices? *Journal of Environmental Economics and Management*, 66(3), 383-403.
- ³⁶ Positive Werte entstehen, wenn der Kapitalwert im Ausgangsfall (Kalkulationszins 3 Prozent) negativ ist.

5.0 FUSSNOTENVERZEICHNIS

- ³⁷ Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur der NOW GmbH (2024). Bidirektionales Laden diskriminierungsfrei ermöglichen. Verfügbar unter: [↗](#)
- ³⁸ Kühnbach, M.; Klobasa, M.; Stephan, A.; Lux, B.; Frank, F.; Surmann, A.; Kähler, J.; Biener, W.; Kamaci, Z.; John, R. (2024): Potential of a full EV-power-system-integration in Europe and how to realise it. Study on behalf of Transport & Environment (T&E) Europe. Freiburg, Karlsruhe (Germany): Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI.
- ³⁹ Artikel zur aktuellen Marktsituation von Tagesschau.de (Januar 2024): [↗](#). Diese Art von Marktzusammenbruchs bei Gebrauchsgütern mit hoher Unsicherheit ist in der ökonomischen Literatur als „Markt für Zitronen“ auch aus anderen Kontexten bekannt.
- ⁴⁰ Die Spreizung bezeichnet hier die absolute Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten viertelstündlichen Preis innerhalb eines Tages (24h).
- ⁴¹ Zahlen für Fahrzeug A, beim Fahrzeug B sind es 4,01 %, da mit höherer Ladeleistung weniger Stunden für die Deckung des Bedarfs benötigt werden.
- ⁴² Zahlen für Fahrzeug A, beim Fahrzeug B sind es 4,40 % bei zeitlicher Arbitrage
- ⁴³ ENTSO-E (2023). Day-Ahead Prices [Table 12.1 D für Deutschland im Zeitraum 01-01-2023 bis 31-12-2023]. [↗](#)
- ⁴⁴ Anschaulich ist der glättende Effekt von Batteriespeichern im Tagesverlauf in einer aktuellen Studie von Frontier Economics dargestellt (Abbildung 3, Seite 7): [↗](#)
- ⁴⁵ Bundesrechnungshof (2024) Bericht nach § 99 BHO zur Umsetzung der Energiewende im Hinblick auf die Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit der Stromversorgung. Verfügbar unter: [↗](#)
- ⁴⁶ URTEIL DES GERICHTSHOFS (Vierte Kammer) vom 2. September 2021 n der Rechtssache C718/18. Verfügbar unter: [↗](#)
- ⁴⁷ Aktueller Stand abrufbar unter: [↗](#)
- ⁴⁸ Laufendes Verfahren der Richtlinie über Messgeräte: [↗](#)

IMPRESSUM

KURZSTUDIE ZU BIDIREKTIONALEM LADEN: WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN FÜR ANWENDUNGEN IM HAUSHALT

PROJEKTLEITUNG

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Annegret Stephan, annegret.stephan@isi.fraunhofer.de

VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT DES TEXTES

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Anke Bekk, anke.bekk@isi.fraunhofer.de;
Anne Kesselring, anne.kesselring@isi.fraunhofer.de;
Marian Klobasa, marian.klobasa@isi.fraunhofer.de.

GESTALTUNG

Zum goldenen Hirschen Berlin GmbH
Schlesische Str. 26, 10997 Berlin

VERFASST IM AUFTRAG VON

Technologieprogramm „IKT für Elektromobilität“, gefördert vom
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 11019 Berlin

ZITIEREMPFEHLUNG

Bekk, A.; Kesselring, A.; Klobasa, M. (2024): Kurzstudie zu bidirektionalem Laden: Wirtschaftlichkeitsanalysen für Anwendungen im Haushalt. Studie im Rahmen des Technologieprogramms „IKT für Elektromobilität“. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI

BILDNACHWEISE

Deckblatt: The Stock Photo Girl/Adobe Stock
Seite 5: Arsenii/Adobe Stock

VERÖFFENTLICHT

März 2025

HINWEISE

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.