Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

Erneuerbar
mobil

Öko-Institut

Auswirkungen der Vollelektrifizierung eines Lkw-Depots

Fallstudie im Rahmen des Forschungsprojekts ELV-LIVE

Kontakt

Florian Hacker
Öko-Institut e.V., Berlin
E-Mail: f.hacker@oeko.de

Vorgeschlagene Zitierweise

Dolinga, T., Hacker, F. (2025): Auswirkungen der Vollelektrifizierung eines Lkw-Depots. Berlin, Öko-Institut e.V.

Diese Studie ist Teil des Forschungsprojekts ELV-Live.

Danksagung

Das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) fördert dieses Vorhaben im Rahmen des Förderprogramms Erneuerbar mobil. Das Öko-Institut bedankt sich beim beteiligten Logistikunternehmen für die Mitwirkung an dieser Fallstudie. Durch die Bereitstellung und Kommentierung der Daten zum Fuhrpark, dem Fahrzeugeinsatz und dem Depot sowie der regelmäßigen Bewertung und Kommentierung von Zwischenergebnissen konnte ein hoher Praxisbezug hergestellt werden.

Inhalt

4	**Kernbotschaften**
6	**Hintergrund**
10	**Vorstellung der Fallsudie**
13	**Methodik und Daten**
19	**Rahmenbedingungen für die Analyse von Ladestrategien**
26	**Herleitung und Analyse von Ladestrategien**
57	**Szenariovergleich**
62	**Fazit**
68	**Referenzen**

Öko-Institut

Kernbotschaften

Technische Potenziale:

- Vollelektrifizierung zweier benachbarter Depots mit über 250 Lkw ist mit Blick auf die notwendige Netzanschlussleistung unter günstigen Voraussetzungen und bei intelligente Flotten- und Lademanagement möglich.
- Die hohe geplante Netzanschlusskapazität (~7 MW bis 2029) am betrachteten Standort stellt dabei eine sehr günstige und aktuell noch stark standortspezifische Voraussetzung dar.

Ohne Lademanagement massive Lastspitzen:

- Gleichzeitiges Laden der Fahrzeuge nach Rückkehr ins Depot ohne Lademanagement erzeugt Lastspitzen von 22–27 MW.
- Dies liegt 3-4-fach über der zukünftig verfügbaren Netzleistung und ist daher nicht realistisch..

Mit umfassendem Lademanagement Lastspitzen um 85% reduziert:

- Standzeitbasiertes, zeitversetztes Laden senkt Spitzenlast auf insgesamt 4,3 MW (in zwei benachbarten Depots).
- Batteriespeicher (10 MWh) senkt die Spitzenlast auf 3,8 MW; ein teilweise öffentliches Laden des Fernverkehrs auf 3,2 MW.

Kernbotschaften

Optimierte Ladestrategie und Hochleistungslader erhöhen Umsetzbarkeit:

- Ohne Steuerung: 90–249 Ladepunkte, bis zu 18.500 m² Fläche erforderlich.
- Hochleistungsladesäulen mit 300–500 kW & optimierte Ladung: lediglich 9–14 Ladepunkte, aber personalintensives Umparken erforderlich.

Weitreichende Anpassung betrieblicher Prozesse erforderlich:

- Intelligentes Flotten- und Lademanagementsystem mit Priorisierung und Optimierung zwingend erforderlich.
- Umfangreiche organisatorische Anpassungen (u.a. Umparkvorgänge, Schichtplanung, Nutzung öffentlicher Ladepunkte), die deutlich über die aktuelle Praxis hinausgehen.
- Die technische, rechtliche und wirtschaftliche Umsetzbarkeit wurde nicht bzw. nicht im Detail geprüft und ist teilweise (z.B. Umparken von betriebsfremden Fahrzeugen) mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Fazit:

- Elektrifizierung einer größeren Flotte mit Blick auf den notwendigen Netzanschluss bei günstigen Rahmenbedingungen und einer umfas230senden Optimierung der Ladestrategie grundsätzlich technisch möglich.
- Vertiefende Analysen zur Praxistauglichkeit notwendig, da vereinfachende Annahmen getroffen wurden, die mit starken Veränderungen von Logistikprozessen verbunden sind. Kosten wurden bisher nicht untersucht.

1 Hintergrund

Bedeutung von Depots für die Elektrifizierung von E-Lkw

Stand der Forschung

Ziele der Fallstudie

Elektrifizierung des schweren Straßengüterverkehrs und Bedeutung von Depotladen

- Die nationalen und europäischen Klimaziele und die mit diesen verbundenen Regulierungen erfordern eine starke Minderung der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs. Der Anteil des Straßengüterverkehrs an den Gesamtemissionen beträgt etwa ein Drittel, wovon ein Großteil auf den schweren Straßengüterverkehr zurückgeht [1].

- Vor diesem Hintergrund erklärt sich, dass sich der Fokus auf die Dekarbonisierung von schweren Lkw richtet, die auf Grund hoher Energieverbräuche und hoher Fahrleistungen emissionsseitig besonders relevant sind. Batterieelektrische Lkw zeichnen sich seit einigen Jahren als priorisierte Antriebsalternative ab. Zwar ist deren Marktanteil an den Neuzulassungen aktuell noch gering, allerdings wird ein hoher Zuwachs in den kommenden Jahren erwartet [2,3].

- Neben der Sicherstellung des wirtschaftlichen Betriebs, stellt vor allem die Verfügbarkeit einer flächendeckenden Lkw-Ladeinfrastruktur eine zentrale Voraussetzung für den Markthochlauf dar. Zahlreiche Analysen weisen auf die hohe Bedeutung von öffentlicher Hochleistungsladeinfrastruktur, insbesondere für den Fernverkehr, hin. Es wird jedoch erwartet, dass Depotladeinfrastruktur mit Blick auf den Energieumsatz eine deutlich größere Rolle einnimmt. Eine Voraussetzung für diese Annahme ist, dass sich die notwendige Ladeinfrastruktur für Unternehmen technisch und ökonomisch umsetzen lässt [2].

- Die Attraktivität des Depotladens begründet sich u.a. mit der Tatsache, dass Standzeiten im Depot mit der Batterieladung kombiniert werden können und der Ladeinfrastrukturausbau auf die betrieblichen Erfordernisse optimiert werden kann sowie meist geringere Energiekosten [2,4].

Einordnung der Fallstudie in vorliegende Arbeiten zum Depotladen

Aktuelle Forschungsarbeiten zum Thema Depotladen beschäftigen sich bisher vorrangig mit batterieelektrischen Pkw-Flotten [5], aber zunehmend auch mit E-Lkw. Die vorliegenden Analysen basieren auf Realdaten, begleiteten die tatsächliche Implementierung oder beruhen auch auf hypothetischen Werten [6]. Dabei werden unterschiedliche Ladebedarfe und Ladezeitfenster betrachtet. Der inhaltliche Fokus liegt zum einen auf der Optimierung der Modellierung und Steuerung der entstehenden Lastkurven [7–9] und zum anderen auf der Minimierung von Leistungsspitzen und Stromkosten [8,10]. Dabei werden je nach Studie die Nebenverbräuche im Depot, die Nutzung eines Batteriespeichers, einer PV-Anlage [10], Vehicle-2-Grid Strategien [11] und flexible Strompreise analysiert [9] .

Die Studien zeigen deutlich, dass durch Smart-Charging-Ansätze sowohl die maximale Leistung als auch die Kosten substanziell gesenkt werden können [8,10]. Batteriespeicher ergeben in den vorliegenden Analysen, angesichts der hohen Kosten, nur in bestimmten Szenarien mit sehr kleinen Ladefenstern Sinn [10]. Vehicle-2-Grid- Strategien sind vielversprechend, aber je nach Land angesichts unterschiedlicher Rahmenbedingungen teilweise noch nicht umsetzbar oder erst in der Pilotphase [11,12].

Die vorliegende Fallstudie knüpft an bestehende Forschungsarbeiten und Überlegungen zu intelligenten Ladestrategien an und überträgt diese in einen praxisnahen Kontext. Durch den engen Austausch mit Vertretern des Fallstudienpartners wurden sowohl die Datengrundlage als auch die Entwicklung der Szenarien und die Interpretation der Ergebnisse maßgeblich durch praktische Erfahrungen und betriebliche Rahmenbedingungen beeinflusst.

Ziel der Fallstudie: Elektrifizierung eines Depots

Ziel der Fallstudie ist es, am konkreten Beispiel des Depots eines Fallstudienpartners die **Grenzen und Potenziale** einer (nahezu) **vollständigen Elektrifizierung** des Fuhrparks in den kommenden **10 bis 15 Jahren** zu analysieren. Dabei wird bewusst mit realen Daten und tatsächlichen Rahmenbedingungen gearbeitet, um einen möglichst realistischen Einzelfall abzubilden und daraus fundierte, allgemeine Schlussfolgerungen abzuleiten. Die Fallstudie richtet sich an Logistikunternehmen, Verwaltung, Politik und Wissenschaft. Sie soll aufzeigen, welche Entwicklungen in den nächsten Jahren bereits umsetzbar sind, welche Maßnahmen hierfür erforderlich erscheinen und wo darüber hinaus zusätzliche Potenziale liegen.

Aus diesem Grund wurden folgende Fragestellungen vertiefend untersucht:

- Wie hoch ist der Energie- und Leistungsbedarf des vollelektrifizierten Fuhrparks und welche Rolle spielen Nah- und Fernverkehr?
- Kann dieser Energie- und Leistungsbedarf durch die verfügbare Leistung am Depot gedeckt werden?
- Wie kann der notwendige Leistungsbedarf unter Berücksichtigung prozessualer Vorgaben intelligent über den Tag verteilt werden, um die notwendig verfügbare Spitzenleistung zu verringern?
- Welche weiteren Optimierungsmöglichkeiten gibt es, um den Leistungsbedarf zu verringern?
- Welche Herausforderungen und Potenziale bieten die unterschiedlichen Ladestrategien und Optimierungsmöglichkeiten bezüglich Platzbedarfs, Anzahl an Ladepunkten, Kosten und Logistik?

2 Vorstellung der Fallstudie

Vorstellung des Logistikunternehmens

Porträt des betrachteten Depots inklusive Fuhrpark

Vorstellung des Fallstudienpartner

Fallstudienpartner

Der in dieser Studie betrachtete Fallstudienpartner ist ein international tätiger Logistikdienstleister mit zahlreichen Standorten in Deutschland. Das Unternehmen ist in den Bereichen Warehouse-, Kontrakt- und Stückgutlogistik aktiv. Der Großteil der Transportleistungen wird durch Servicepartner und deren Fahrzeuge erbracht. Der Fallstudienpartner verfügt jedoch auch über einen eigenen, kleineren Fuhrpark, in dem bereits erste E-Lkw im Einsatz sind. Das Unternehmen verfolgt eine fundierte Nachhaltigkeitsstrategie mit einem Schwerpunkt auf den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge nach technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Betrachtetes Depot und verfügbare Informationen

Das in dieser Analyse betrachtete Depot ist eines von mehreren Standorten des Fallstudienpartners und befindet sich in einer norddeutschen Metropolregion. Tatsächlich handelt es sich um zwei räumlich benachbarte Depots, die gemeinsam untersucht wurden. Beide Standorte sind bereits teilweise elektrifiziert und verfügen über eine Ladeinfrastruktur mit vier Ladesäulen (insgesamt 720 kW). Ein Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie eine Erweiterung des Netzanschlusses sind in Planung.

Das Gelände der beiden Depots umfasst insgesamt rund 100.000 m² und beinhaltet großflächige Umschlaghallen mit einer kombinierten Grundfläche von etwa 25.000 m². Eine Halle ist eine Kühlhalle und hat somit einen erhöhten Energiebedarf.
Für die Studie stellte der Fallstudienpartner zusätzlich Informationen zu den Einsatzprofilen der Fahrzeuge, zu den Lastkurven der aktuellen Energieverbräuche am Standort sowie zur für das Jahr 2029 geplanten Netzanschlussleistung zur Verfügung.

Fuhrpark und Fahrzeugeinsatz im Überblick

Der Fuhrpark des Fallstudienpartners besteht aus 249 Fahrzeugen und ist durch drei Einsatzarten geprägt:

- Es gibt 9 große Einschicht-Fernverkehrsfahrzeuge (40 t), die einmal am Tag eine Fernverkehrstour fahren.
- Außerdem gibt es 95 große Doppelschichtfahrzeuge (40 t), die an einem Tag sowohl eine Fernverkehrs- als auch eine Nahverkehrstour fahren.
- Schließlich stehen im Fuhrpark 145 kleine Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge (bis 18 t), die einmal am Tag eine Nahverkehrstour fahren.

Die Fahrzeuge aus dem Fuhrpark fahren zwei Arten von Touren: Nah- und Fernverkehrstouren. Diese Touren ähneln sich untereinander und sind folgendermaßen charakterisiert:

- Die Fernverkehrstouren sind durchschnittlich 567 km lang (Stichtag) und werden über Nacht im Zeitraum zwischen 18 Uhr und 3 Uhr morgens bewältigt. Die genauen Uhrzeiten und Streckenlänge variieren von Tour zu Tour.
- Am untersuchten Stichtag sind die Nahverkehrstouren durchschnittlich 161 km lang und finden zwischen 6 Uhr morgens und 15 Uhr nachmittags statt. Die Touren unterscheiden sich leicht bezüglich der Uhrzeiten und Streckenlängen.
- Der gesamte Fuhrpark fährt täglich in Summe 98.000 km (Stichtag).

3 Methodik und Daten

Methodisches Vorgehen dieser Fallstudie

Vorliegende Daten zu Depot, Fuhrpark und Fahrzeugeinsatz

Datenverarbeitung und Methodik für die Szenarienberechnung

Methodisches Vorgehen

1. Zunächst wurden die gegebenen **Daten zu einem typischen Tag mit allen**, momentan noch mit Diesel-Fahrzeugen gefahrenen **Touren** im Depot **aufbereitet** und im Austausch mit dem Fallstudienpartner die Gegebenheiten des Depots und des Fuhrparks ermittelt.
2. Anschließend wurde **für jedes Fahrzeug ein Aktivitätsmuster abgeleitet**, indem jedem Fahrzeug jeweils eine aufbereitete Tour zugeordnet wurde und Informationen zu dem hypothetischen Energiebedarf bei einer Elektrifizierung des Fahrzeugs und den Standzeiten im Depot ergänzt wurden.
3. Dann wurden die **Standzeiten aller Fahrzeuge im Depot** über den Tag hinweg betrachtet. Damit wird ersichtlich, zu welchen Zeitpunkten Fahrzeuge im Depot stehen und potenziell Energie laden können bzw. müssen.
4. Daraus wurden **unterschiedliche Ladestrategien** abgeleitet. Jede Ladestrategie wurde detailliert betrachtet, indem die notwendige Ladeleistung des gesamten Fuhrparks über den Tag hinweg berechnet und die maximale Ladeleistung abgeleitet wurden. Darüber hinaus wurde berechnet, **wie viele Ladepunkte** minimal notwendig sind, um diese Ladestrategie durchzuführen. Schließlich wurden potenzielle Hürden und Potenziale abgeleitet.
5. Im Austausch mit diversen Expert*innen des Fallstudienpartners wurden die Szenarien sowie weitere, vor allem **organisatorische und logistische, Hürden** besprochen und zusätzliche Ideen für Ladestrategien und Modellierungsanpassungen gesammelt. In einem iterativen Prozess wurden die überarbeiteten Ergebnisse wieder vorgestellt, besprochen und finalisiert.
6. Abschließend wurden die **Szenarien miteinander verglichen** und ein **Fazit** gezogen.

Datengrundlage und Datenbearbeitung

Der Fallstudienpartner stellte eine Tabelle mit einem exemplarischen Tag für das Depot zur Verfügung (vgl. Abbildung). Jede Reihe entspricht einer gefahrenen Tour mit weiteren Angaben zu:

- Touren ID
- Abfahrtszeit
- Fahrzeuggröße
- Zuordnung, ob Nah- oder Fernverkehr
- Einige Touren verfügen über Angabe zu gefahrener Distanz

Tour ID	Startzeit	Gefahrene Distanz	Fahrzeug größe	Einsatzprofil
Tour 1	6:15	280 km	klein	Nahverkehr
Tour 2	19:00	659 km	groß	Fernverkehr
…	…	…	…	…

Berechnungen und Annahmen auf Basis der gegebenen Daten wurden um folgende Angaben erweitert und verändert:

- Ankunftszeit im Depot: Zufällige, gleichverteilte Zuordnung in definierten Zeitintervallen, die vom Fallstudienpartner angegeben wurden (unabhängig von Abfahrtzeit und Distanz).
  - FV-Fahrzeuge kehren zwischen 2 und 4 Uhr, die NV-Fahrzeuge zwischen 13 und 16 Uhr ins Depot zurück.
- Touren ohne Distanzangabe wurden Durchschnittswerte bezogen auf ihr Einsatzprofil zugeordnet.
- Energieverbrauch wurde pro Tour auf Basis der gefahrenen Distanz, der Fahrzeuggröße und des Einsatzprofils (Nah- oder Fernverkehr) berechnet (Verbräuche: vgl. Abbildung)
  - Energieverbrauchsangaben beruhen auf Realwerten von ersten E-Lkw im Praxiseinsatz des Fallstudienpartners.
  - Batterienutzung wurde auf 550 kWh gedeckelt (Batteriekapazität von 600 kWh abzüglich Sicherheitspuffer von 50 kWh). Sobald gefahrene Strecke länger ist, wird von einem Zwischenladestopp ausgegangen.

Fahrzeugtyp	Verbrauch
Kleiner Lkw, Nahverkehr	1 kWh/km
Großer Lkw, Nahverkehr	1,12 kWh/km
Großer Lkw, Fernverkehr	1,2 kWh/km

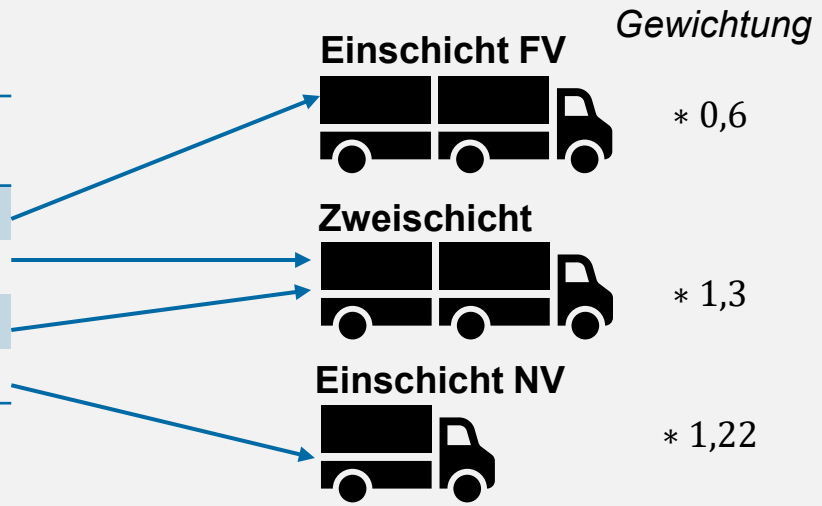
Öko-Institut

Zuordnung der Touren zu Fahrzeugen

Die gegebenen Tourendaten verfügen über keine Fahrzeugzuordnung. 40% der Fahrzeuge im Fuhrpark fahren zwei Touren am Tag (Doppelschicht: tagsüber Nahverkehr, nachts Fernverkehr) und haben damit deutlich geringere Standzeiten im Depot. Dies ist jedoch nur bei den großen Fahrzeugen der Fall, da die kleinen Fahrzeuge nur im Nahverkehr (Einschicht tagsüber) fahren. Um dies zu berücksichtigen, wurde auf die vorhandene Information der Fahrzeuggröße der gefahrenen Tour zurückgegriffen. Jede Nahverkehrstour, die von einem großen Lkw gefahren wurde, wurde zufällig einer Fernverkehrstour zugeordnet.

Die Anzahl der aus den Tourendaten abgeleiteten Fahrzeuge wurde mit der Fuhrparkzusammensetzung eines zufälligen Stichtages abgeglichen und so gewichtet, dass sie diesem entspricht.

Tour ID	Startzeit	Gefahrene Distanz	Fahrzeug-größe	Einsatz-profil
Tour 2	19:00	659 km	groß	FV
Tour 2	18:45	708 km	groß	FV
Tour 1	7:30	301 km	groß	NV
Tour 1	6:15	280 km	klein	NV



Öko-Institut

Methodik zur Berechnung des Leistungsbedarfs

Zunächst wurde auf Basis der angegebenen Abfahrtszeiten und zufällig zugeordneten Ankunftszeiten in 10-Minutenintervallen die Anzahl der Fahrzeuge im Depot berechnet. Dafür wurde von der Fuhrparkgröße (249 Fahrzeuge) die Anzahl der Fahrzeuge, die unterwegs sind, subtrahiert.

Für die ersten drei Szenarien (A, B, C) wurde der Leistungsbedarf des Fuhrparks exakt berechnet:

- Dafür wurde zunächst für jedes Fahrzeug auf Basis der notwendigen Energiemenge und der gegebenen Ladeleistung das notwendige Ladeintervall berechnet oder auf Basis der notwendigen Energiemenge und der Standzeit im Depot die notwendige Ladeleistung ermittelt.
- Danach wurde in 10-Minutenintervallen über den gesamten Tag hinweg der Leistungsbedarf für jedes Fahrzeug, abhängig von der Uhrzeit, aufaddiert.

Für die restlichen Szenarien (D ff.) wurde der Leistungsbedarf des Fuhrparks überschlagen:

- Zunächst wurde der Leistungsbedarf innerhalb der intensiv genutzten Ladefenster optimiert. Hierbei wurde ein Mixed-Integer-Linear-Programming-Algorithmus (Python: PULP) genutzt und die maximale Ladeleistung pro Ladesäule variiert. Bei einer Leistung von 500 kW konnte das Ladefenster so optimiert werden, dass über den gesamten Zeitraum die gleiche Gesamtladeleistung abgerufen wird. Aufgrund dieser Tatsache wurde im Folgenden davon ausgegangen, dass mit Überschlags- und Mittelwertberechnungen realistische Aussagen getroffen werden können.
- Für die Modellierung von unterschiedlichen Lastverschiebungen von einem zu einem anderen Zeitraum wurden Mittelwertrechnungen verwendet, indem die notwendige Energiemenge aufsummiert wurde und durch das gesamte Zeitintervall dividiert wurde.
- Es wurden immer Plausibilitätschecks durchgeführt, die durch Überschlagsrechnungen die Größenordnungen der Ergebnisse überprüften.
- Die berechneten Leistungsbedarfe wurden visualisiert und teilweise unterschiedliche Leistungsnachfrager aufaddiert und visuell unterschieden.

Der Leistungsbedarf in der Analyse bezieht sich auf den absoluten Leistungsbedarf und berücksichtigt keine Leistungsschwankungen während des Ladevorgangs.

Methodik zur Berechnung der notwendigen Anzahl an Ladesäulen

Um die Anzahl der notwendigen Ladesäulen zu berechnen, wurde wie folgt vorgegangen:

- In den Szenarien A bis D wurde die am Tag maximal notwendige Ladeleistung durch die Leistung der eingesetzten Ladesäulen (300 kW bzw. 150 kW und 500 kW) dividiert. Daraus ergibt sich die maximale Anzahl der gleichzeitig genutzten Ladesäulen.
- Die Mitberücksichtigung der Zusatzzeit in Szenario D wurde berechnet, in dem für jedes Fahrzeug auf Basis einer durchschnittlich zu ladenden Energiemenge und einer Ladeleistung die notwendige Ladezeit berechnet wurde. Diese Ladezeit wurde um die „Leerlaufzeit“ (während der keine Batterieladung stattfindet) erweitert. Daraufhin wurde berechnet, wie viele Ladesäulen gebraucht werden, um in dem gegebenen Zeitintervall die gegebene Anzahl an Fahrzeugen zu laden.

Es wurden noch weitere Berechnungen mit geringem Umfang vollzogen, die selbsterklärend sind und auf Überschlagsannahmen beruhen (z.B. Energieminderung durch Laden außerhalb des Depots und Platzbedarf für Ladeinfrastruktur).

4 Rahmenbedingungen für die Analyse von Ladestrategien

Verfügbare Ladeleistung im Jahr 2030 für das betrachtete Depot

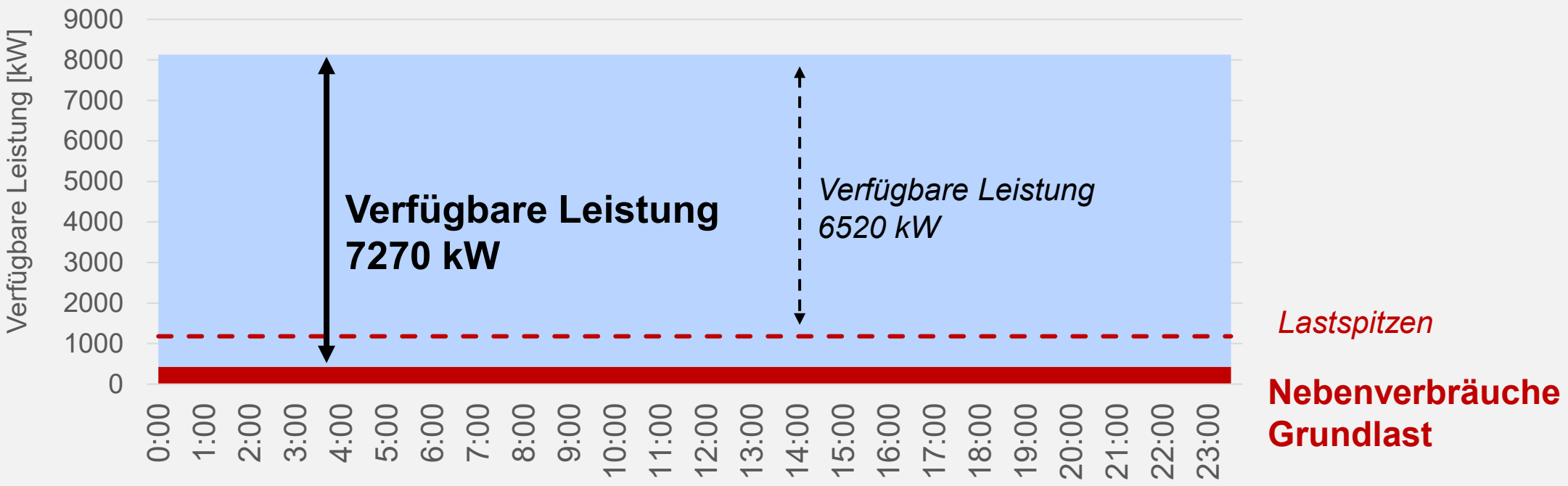
Verteilung der Standzeiten der Fahrzeuge im Depot

Potenziale und Hürden für Ladestrategien

Abgeleitete Optimierungsoptionen

Netzanschlussleistung im Depot des Fallstudienpartners (2029)

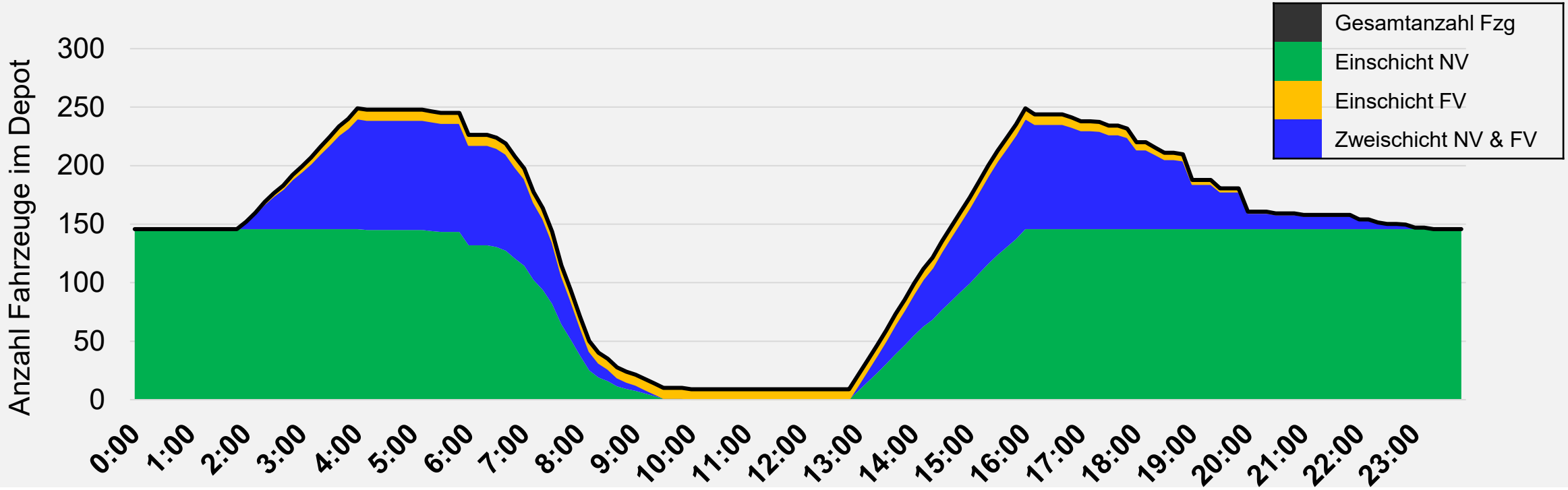
Die Angaben zur Netzanschlussleistung und den „Nebenverbrauchern“ jenseits der Ladeinfrastruktur stammen vom Fallstudienpartner und bilden den konkret geplanten Netzausbau am Standort ab, der deutlich über die aktuelle Netzanschlusskapazität hinausgeht. Um die verfügbare Leistung, die zum Laden des elektrifizierten Fuhrparks dann vorhanden wäre, zu berechnen, wurde die Differenz zwischen der geplanten Netzanschlussleistung 2029 und der Nebenverbräuche ermittelt. Es ergibt sich eine verfügbare Leistung von 7270 kW, die zeitweise auf minimal 6520 kW reduziert wird.



Öko-Institut

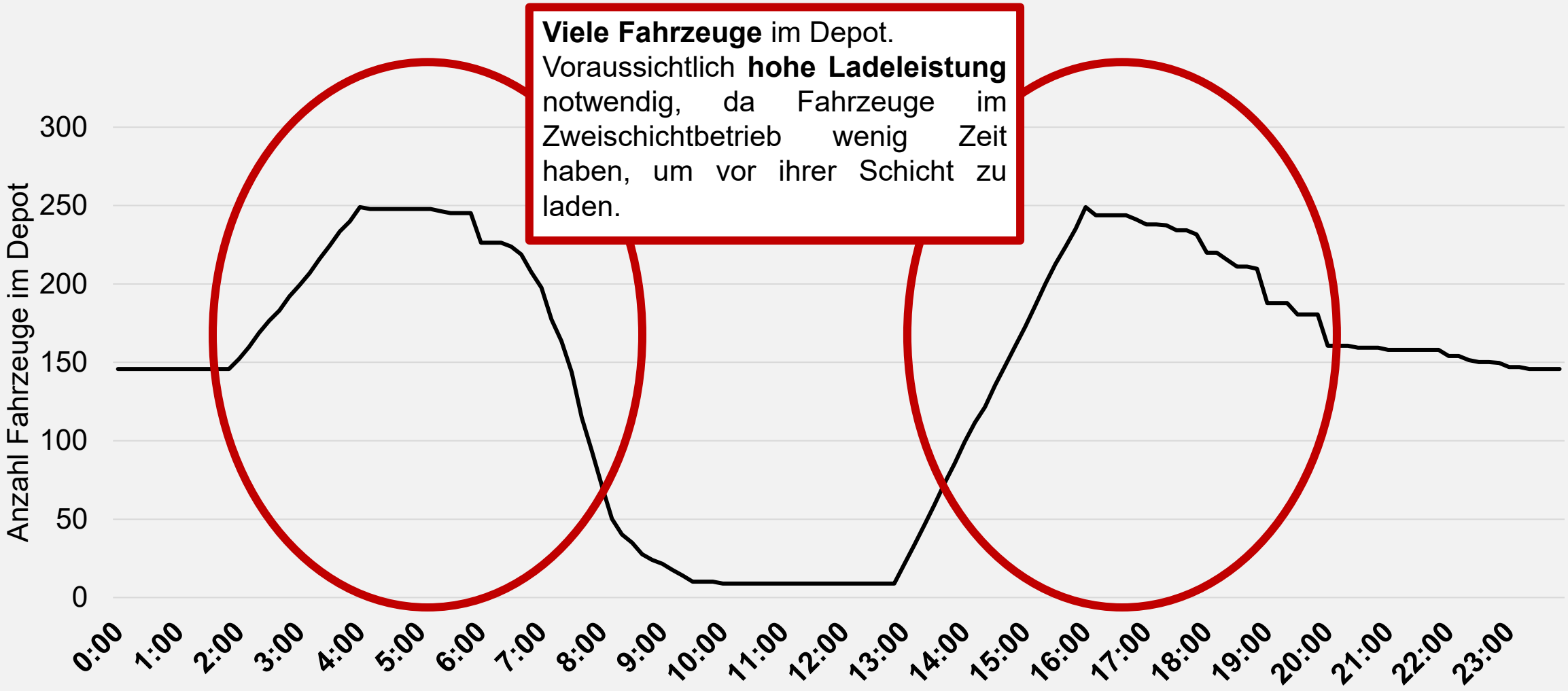
Anzahl der stehenden Fahrzeuge im Depot

Die Abbildung zeigt den Tagesgang der stehenden Fahrzeuge im Depot. Nachts sind die Fernverkehrsfahrzeuge unterwegs und nur die knapp 150 kleinen Einschicht-Fahrzeuge stehen im Depot. Im Laufe der frühen Morgenstunden kehren die Fernverkehrsfahrzeuge nach und nach zurück. Zwischen 3:30 und 6:00 Uhr ist der gesamte Fuhrpark im Depot. Im Laufe des Morgens fahren alle Ein- und Zweischicht-Nahverkehrsfahrzeuge ihre Tour, so dass mittags nur die 9 Einschicht-Fernverkehrsfahrzeuge im Depot stehen. Im Laufe des Nachmittags kehren alle Nahverkehrsfahrzeuge zurück, so dass kurzzeitig wieder alle Fahrzeuge des Fuhrparks im Depot stehen. Im Laufe des Abends fahren nach und nach die Fernverkehrsfahrzeuge los und lassen die Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge zurück.



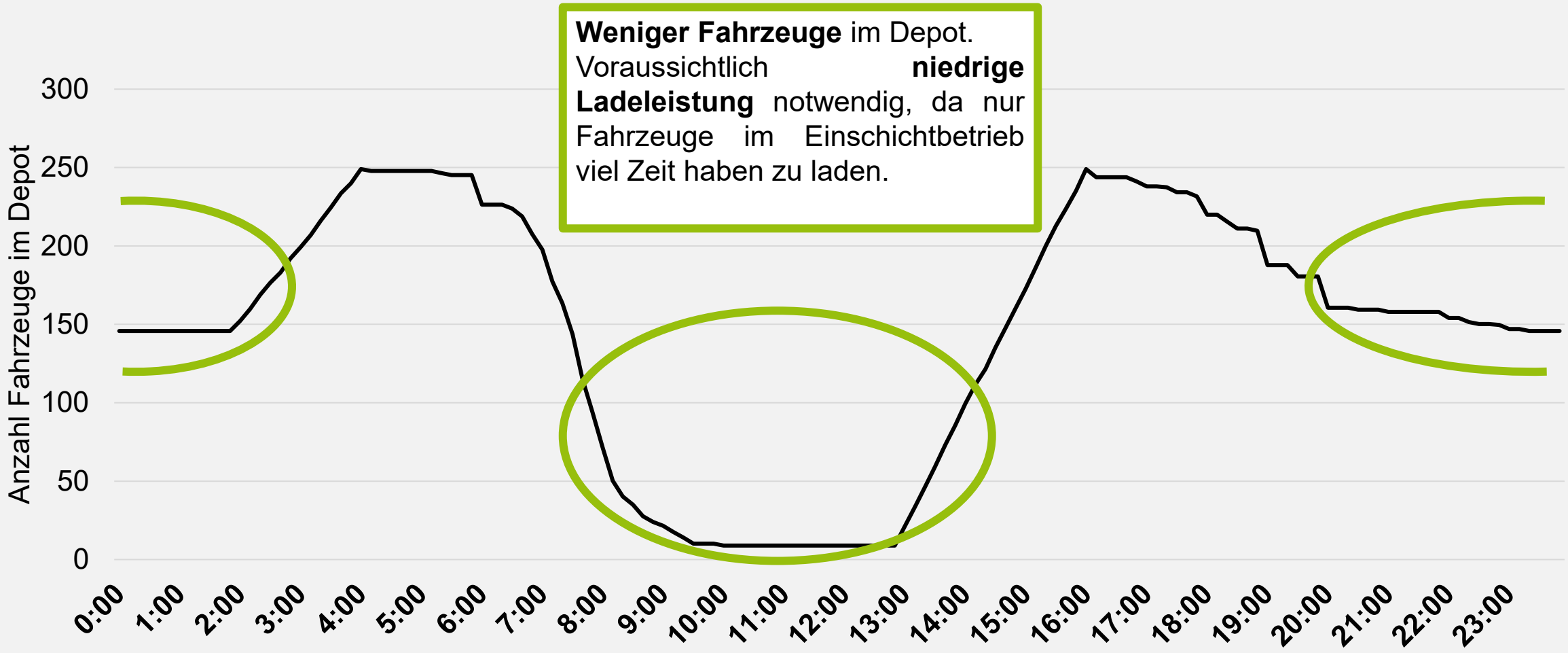
Öko-Institut

Potenzielle Lastspitzen: am frühen Tag und am frühen Nachmittag hoher Anteil an einkommenden Fahrzeugen, der potenziell Lastspitzen generiert



Öko-Institut

Potenzielle Lasttäler: am späten Abend und nachts sowie am Vormittag wenige Fahrzeuge im Depot, die eine geringe Lastnachfrage generieren



Öko-Institut

Betrachtete Optimierungsoptionen bei den Ladeszenarien

Minimierung der maximal notwendigen Leistung
Durch Steuerung und intelligente Verschiebung der Ladeleistung.

Verringerung der notwendigen Leistung durch Integration eines Batteriespeichers
Ein Batteriespeicher ermöglicht die Aufnahme von Energie bei niedriger Netzlast und deren Abgabe zu Lastspitzen, wodurch die Netzanschlussleistung reduziert werden kann.

Minimierung der notwendigen Anzahl an Ladepunkten
Durch Optimierung der Ladeleistung pro Ladepunkt werden die Anzahl der Ladepunkte und somit auch voraussichtlich die Baukosten und der Platzbedarf minimiert.

Weitere Anpassungen des betrieblichen Ablaufs:

- Teile des Fernverkehrs laden öffentlich und müssen damit weniger im Depot laden.
- das Laden der kleinen Fahrzeuge wird an Subunternehmer*innen ausgelagert und findet nicht im Depot statt.
- Der einkommende Fernverkehr lädt nachts im Depot beim Be- und Entladen der Ware.

Kriterien für die Bewertung der Ladeszenarien

Die folgenden Kriterien wurden für die systematische Bewertung der im folgenden dargestellten Ladestrategien herangezogen.

Kriterium	Beschreibung
Notwendige Ladeleistung	Maximale Leistung, die während eines Tages zur Verfügung stehen muss, um alle Fahrzeuge zu laden.
Anzahl an Ladepunkten	Anzahl Ladepunkte, die an einem Tag maximal gleichzeitig genutzt werden, um alle Fahrzeuge zu laden.
Voraussetzungen	Notwendige Voraussetzungen für die praktische Umsetzung
Herausforderungen	Logistische, technische und finanzielle Herausforderungen für die praktische Umsetzung.
Vorteile	Vorteile und Potenziale der Umsetzungsvariante.

5 Herleitung und Analyse von Ladestrategien

Hintergrund und Herleitung der betrachteten Ladestrategien

Analyse von Lastgang, Anzahl Ladepunkte und Platzbedarf

Bewertung der Strategien

Szenario A „Unoptimiertes Laden“ – Einleitung und Hintergrund

Im ersten Schritt wird ein vollständig unoptimiertes Ladeszenario betrachtet. Viele Unternehmen befinden sich derzeit noch in der frühen Phase der Elektrifizierung ihres Fuhrparks und verfügen meist nur über eine geringe Anzahl elektrisch betriebener Lkw im Depot. In einer Erhebung aus dem Jahr 2024 gaben 80 % der befragten Unternehmen mit E-Lkw an, lediglich 1 bis 5 E-Lkw einzusetzen – dies entspricht etwa 4 % ihres gesamten Fuhrparks [13]. In dieser Phase können die wenigen E-Lkw jeweils eine eigene Ladesäule nutzen oder sich gemeinsam einige wenige Ladestationen teilen. Zu Beginn der Depotelektrifizierung stehen zunächst andere Herausforderungen im Vordergrund, etwa die tatsächliche Reichweite der Fahrzeuge, die Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur sowie die Integration der Fahrzeuge in bestehende Routenplanungen. Strategische Überlegungen zur Ladeplanung und komplexe Optimierungsansätze im Depot spielen zu diesem Zeitpunkt noch eine untergeordnete Rolle, da weder die Anzahl der Fahrzeuge noch die verfügbare Ladeinfrastruktur zu Kapazitätsengpässen führt und auch die am Netz abgerufene Leistung noch keine kritische Größe darstellt.

Die intuitivste und bislang am häufigsten beobachtete Ladestrategie besteht darin, dass der*die Fahrer*in den Lkw nach Abschluss der Tour direkt an einer freien Ladesäule anschließt. Das Fahrzeug lädt anschließend kontinuierlich mit der Nennleistung der Ladesäule, bis der Akku vollständig geladen ist. Hierbei wird vereinfachend die Leistungskurve der Batterieladung vernachlässigt. Je nach Verfügbarkeit weiterer Ladesäulen, dem Ladebedarf anderer Fahrzeuge, dem Zeitpunkt des Beginns der nächsten Tour sowie personellen Faktoren wird das Fahrzeug entweder nach dem Ladevorgang umgeparkt oder verbleibt an der Ladesäule, bis die nächste Tour beginnt. Zu Arbeitsbeginn trennt der*die Fahrer*in das Fahrzeug vom Ladepunkt und beginnt die nächste Fahrt. Einige Unternehmen nutzen jedoch bereits weiterentwickelte Ladepraktiken, wie beispielsweise Zwischenladungen während der Fahrzeugbe- und -entladung, wie von einem Fallstudienpartner berichtet. Langfristig werden sich Unternehmen intensiver mit komplexeren Ladestrategien auseinandersetzen müssen, um sowohl den Leistungsbedarf als auch den Platzbedarf im Depot effizient zu gestalten.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird zunächst das beschriebene intuitive und unoptimierte Ladeszenario modelliert. Ziel ist es aufzuzeigen, welche Herausforderungen im Falle eines hohen Anteils an E-Lkw damit einhergehen, welche Höhe die erforderliche Ladeleistung annimmt und welche typischen Lademuster daraus resultieren. Darauf aufbauend lassen sich Ansätze für Optimierungsstrategien ableiten.

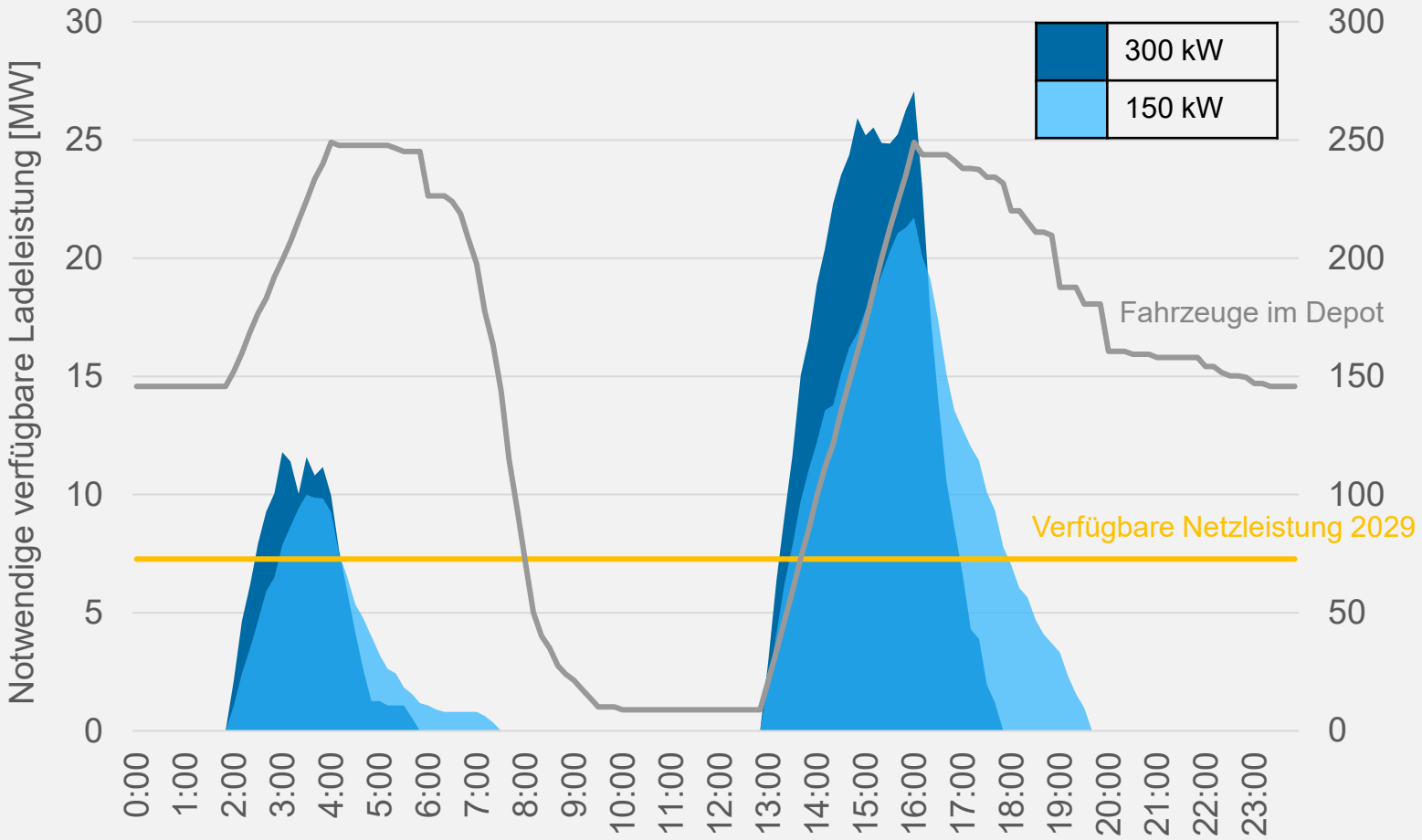
Szenario A „Unoptimiertes Laden“ – Lastgang

Umsetzung:

Ankommende Fahrzeuge im Depot laden sofort mit durchgehend 150 bzw. 300 kW so viel Energie wie sie für die nächste Fahrt benötigen.

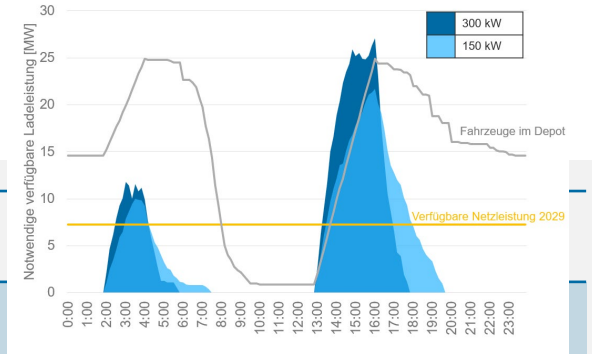
Ergebnis:

Es entstehen hohe Lastspitzen deutlich über der 2029 realisierbaren Anschlussleistung. Darüber hinaus gibt es große Zeiträume, in denen keine Ladeleistung abgerufen wird.



Öko-Institut

Szenario A „Unoptimiertes Laden“ – Bewertung



	300 kW	150 kW
Notwendige Leistung	27 MW	22 MW
Anzahl an Ladepunkten	90	155
Voraussetzungen	Fahrzeuge müssen mindestens 1:50 h im Depot stehen.	Fahrzeuge müssen mindestens 3:40 h im Depot stehen – dies stellt in einigen Fällen eine Herausforderung dar.
Herausforderungen	• Sehr hohe Netzanschlussleistung notwendig (Faktor 4 über verfügbarer Anschluss-leistung) • Hohe Kosten für den Bau von vielen, leistungsstarken Ladepunkten • Hohe Flächeninanspruchnahme, da 90 bzw. 155 Fahrzeuge gleichzeitig im Depot laden. Dies ist mit der aktuellen Depotgestaltung nicht vereinbar und würde den Erwerb zusätzlicher Flächen erfordern.	
Vorteile	• Es ist kein komplexes Lastenmanagement notwendig, da die Fahrzeuge direkt nach der Ankunft ungesteuert laden bis die Batterie voll geladen ist. • Fahrzeuge müssen nur selten umgeparkt werden, da es viele Ladepunkte gibt, an denen die Fahrzeuge gleichzeitig laden können.	

Öko-Institut

Szenario B „Verteiltes Laden“ – Hintergrund

Die Analyse des „unoptimierten Szenarios A“ zeigt, dass das Stromnetz zu zwei Tageszeiten jeweils über wenige Stunden stark belastet wird. Zu diesen Spitzenzeiten werden Ladeleistungen von 27 MW bzw. 22 MW abgerufen, während über den restlichen Tagesverlauf nahezu keine Netzbelastung durch die Ladeinfrastruktur hervorgerufen wird. Ursache hierfür ist, dass am Nachmittag innerhalb eines Zeitfensters von etwa drei Stunden rund 240 Fahrzeuge nach Abschluss ihrer Nahverkehrstouren im Depot eintreffen und unmittelbar mit hoher Leistung zu laden beginnen. Abhängig von der zur Verfügung stehenden Ladeleistung pro Ladesäule laden dabei entweder etwa 155 Fahrzeuge gleichzeitig (bei 150 kW) oder rund 95 Fahrzeuge (bei 300 kW).

Nach spätestens 3 Stunden und 40 Minuten (bei 150 kW) bzw. 1 Stunde und 55 Minuten (bei 300 kW) sind alle Fahrzeuge vollständig geladen, sodass die Ladeinfrastruktur über weite Zeiträume ungenutzt bleibt. Ein ähnliches Muster wiederholt sich am Vormittag, jedoch in abgeschwächter Form, da hier nur etwa 104 Fernverkehrsfahrzeuge im Depot eintreffen. Die hohe Netzbelastung entsteht somit primär durch das gleichzeitige Laden vieler Fahrzeuge mit hoher Ladeleistung am Nachmittag.

Im Szenario „Verteiltes Laden“ wird daher gezielt an dem Parameter der Ladeleistung pro Fahrzeug angesetzt: Die Ladeleistung pro Fahrzeug wird so reduziert, dass jedes Fahrzeug nur die Leistung erhält, die erforderlich ist, um bis zum Ende seiner Standzeit ausreichend geladen zu sein. Hierfür wird der Energiebedarf des Fahrzeugs gleichmäßig auf die verfügbare Standzeit verteilt. Das bedeutet, dass das Fahrzeug ab seiner Rückkehr ins Depot bis zum Beginn der nächsten Tour mit einer konstanten, minimal notwendigen Leistung lädt.

Die Ergebnisse dieser Anpassung dienen im weiteren Verlauf als Grundlage für weitere Optimierungsansätze.

Szenario B „Verteiltes Laden“ – Lastgang

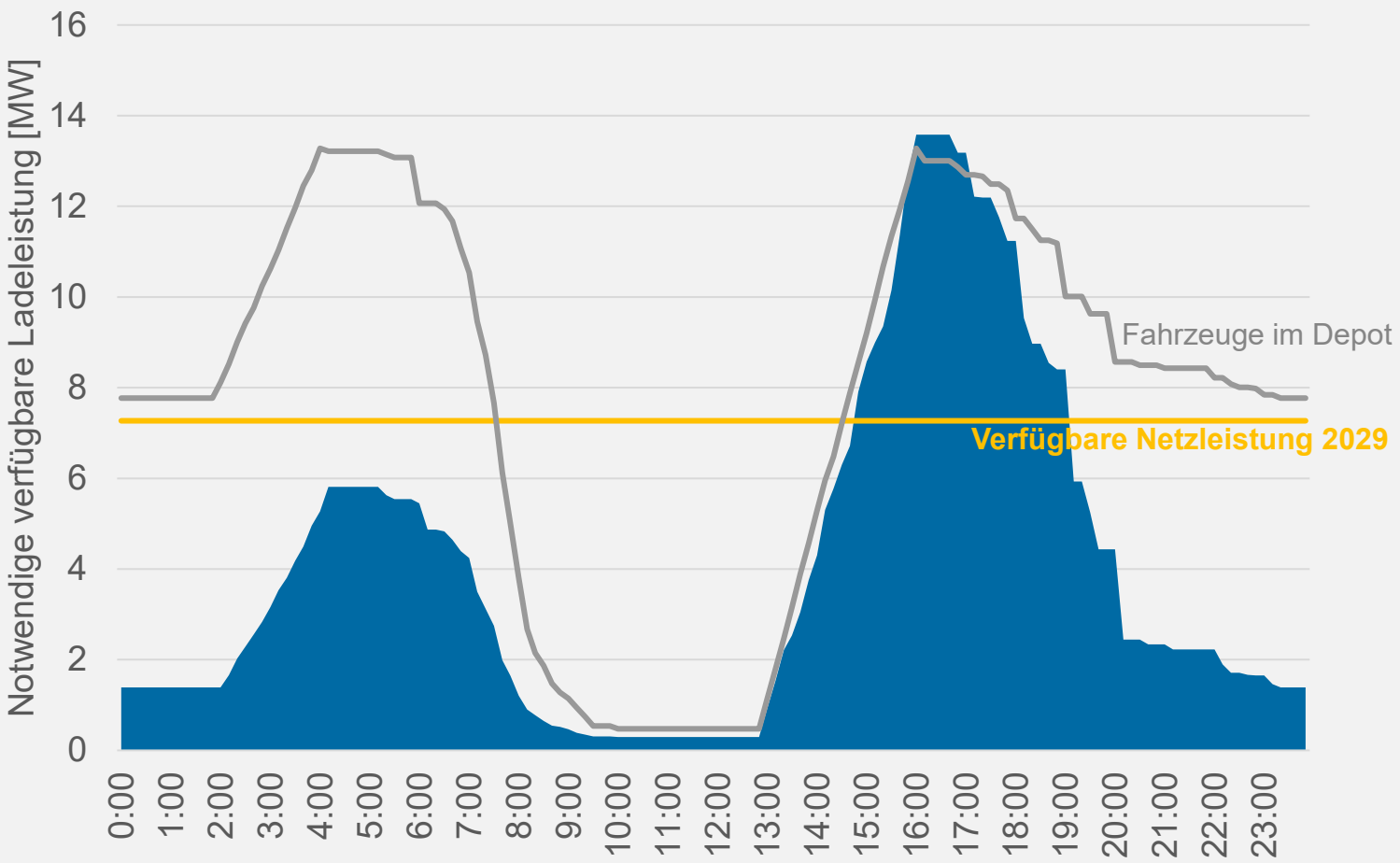
Umsetzung:

Jedes Fahrzeug lädt ab dem Zeitpunkt der Ankunft im Depot bis zur nächsten Abfahrt mit konstanter, niedriger Ladeleistung.

Dabei wird stets nur so viel Energie geladen, dass die folgende Tour vollständig durchgeführt werden kann.

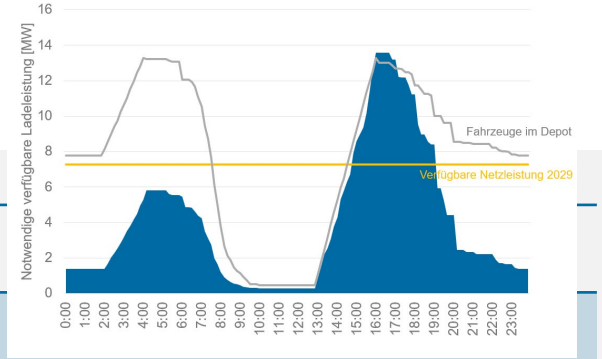
Ergebnis:

Niedrigere, aber weiterhin hohe Lastspitzen; deutlich über der geplanten Anschlussleistung. Besonders hohe Netzbelastung nachmittags und in den frühen Morgenstunden, während die anderen Zeiträume wenig genutzt werden.



Öko-Institut

Szenario B „Verteiltes Laden“ – Bewertung



Notwendige Leistung	14 MW
Anzahl an Ladepunkten	249 (1 Ladepunkt je Fahrzeug)
Voraussetzungen	• Lademanagement muss mit dem Dispositionssystem verknüpft sein, um Abfahrtszeiten zu kennen und die Höhe der Ladeleistung zu bestimmen, damit das Fahrzeug vor der Abfahrt voll geladen ist.
Herausforderungen	• Niedrigere, aber immer noch sehr hohe, nicht realisierbare Netzanschlussleistung • Hohe Baukosten für noch höhere Anzahl Ladepunkte, da jedes Fahrzeug einen eigenen Ladepunkt benötigt (249). Diese sind jedoch günstiger pro Ladepunkt, da nur niedrige Leistung je Ladepunkt notwendig ist. • Platzprobleme, da alle Fahrzeuge gleichzeitig im Depot laden. Dies ist mit der aktuellen Depotgestaltung nicht vereinbar und würde den Erwerb zusätzlicher Flächen erfordern. • Alle Fahrzeuge müssen im gesamten Zeitraum, in dem sie nicht unterwegs sind, zum Laden verfügbar sein.
Vorteile	• Kein komplexes Lastmanagement notwendig, da alle Fahrzeuge über die gesamte Zeit, die sie im Depot stehen, laden. • Fahrzeuge müssen gar nicht umgeparkt werden, da jedes Fahrzeug über einen eigenen Ladepunkt verfügt.

Öko-Institut

Szenario C „Verteiltes Laden + Lastverschiebung Einschicht“ – Hintergrund

Durch die Reduzierung der Ladeleistung auf das jeweils notwendige Minimum pro Fahrzeug konnte die erforderliche maximale Netzleistung zwar deutlich gesenkt werden – von zuvor 27 MW bzw. 22 MW auf nun 14 MW. Dennoch handelt es sich weiterhin um einen sehr hohen und in der Praxis voraussichtlich schwer realisierbaren Leistungsbedarf. Zudem zeigt sich nach wie vor eine ausgeprägte Lastspitze am Nachmittag sowie eine abgeschwächte, aber immer noch signifikante Netzbelastung am Vormittag. Diese entsteht, weil in diesen beiden Zeitfenstern alle 95 Zweischichtfahrzeuge innerhalb kurzer Zeit gleichzeitig ihre Batterien laden müssen. Der maximale Leistungsabruf tritt dabei zu dem Zeitpunkt auf, an dem alle Fahrzeuge im Depot stehen und parallel mit ihrer zwar reduzierten, in Summe jedoch weiterhin hohen Ladeleistung laden.

Im Szenario „Verteiltes Laden + Lastverschiebung Einschicht“ wird daher angestrebt, die Anzahl gleichzeitig ladender Fahrzeuge in diesen stark belasteten Zeiträumen zu reduzieren. Dazu werden die Einschichtfahrzeuge zeitlich von den Zweischichtfahrzeugen entkoppelt. Konkret laden vormittags und abends ausschließlich die 95 Zweischichtfahrzeuge, während tagsüber nur die 9 großen Einschicht-Fernverkehrsfahrzeuge laden und in der Nacht die 145 kleineren Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge ihre Batterien aufladen.

Diese zeitliche Entzerrung wird voraussichtlich nicht ausreichen, um die maximale Ladeleistung auf ein realistisch umsetzbares Niveau zu senken. Dies liegt insbesondere daran, dass die verschobenen Fahrzeuggruppen aufgrund ihrer langen Standzeiten ohnehin nur mit sehr geringer Ladeleistung laden. Dennoch stellt diese Anpassung einen wichtigen Zwischenschritt dar, von dem aus weitere Optimierungspotenziale abgeleitet werden können.

Szenario C „Verteiltes Laden + Lastverschiebung Einschicht“ – Lastgang

Umsetzung:

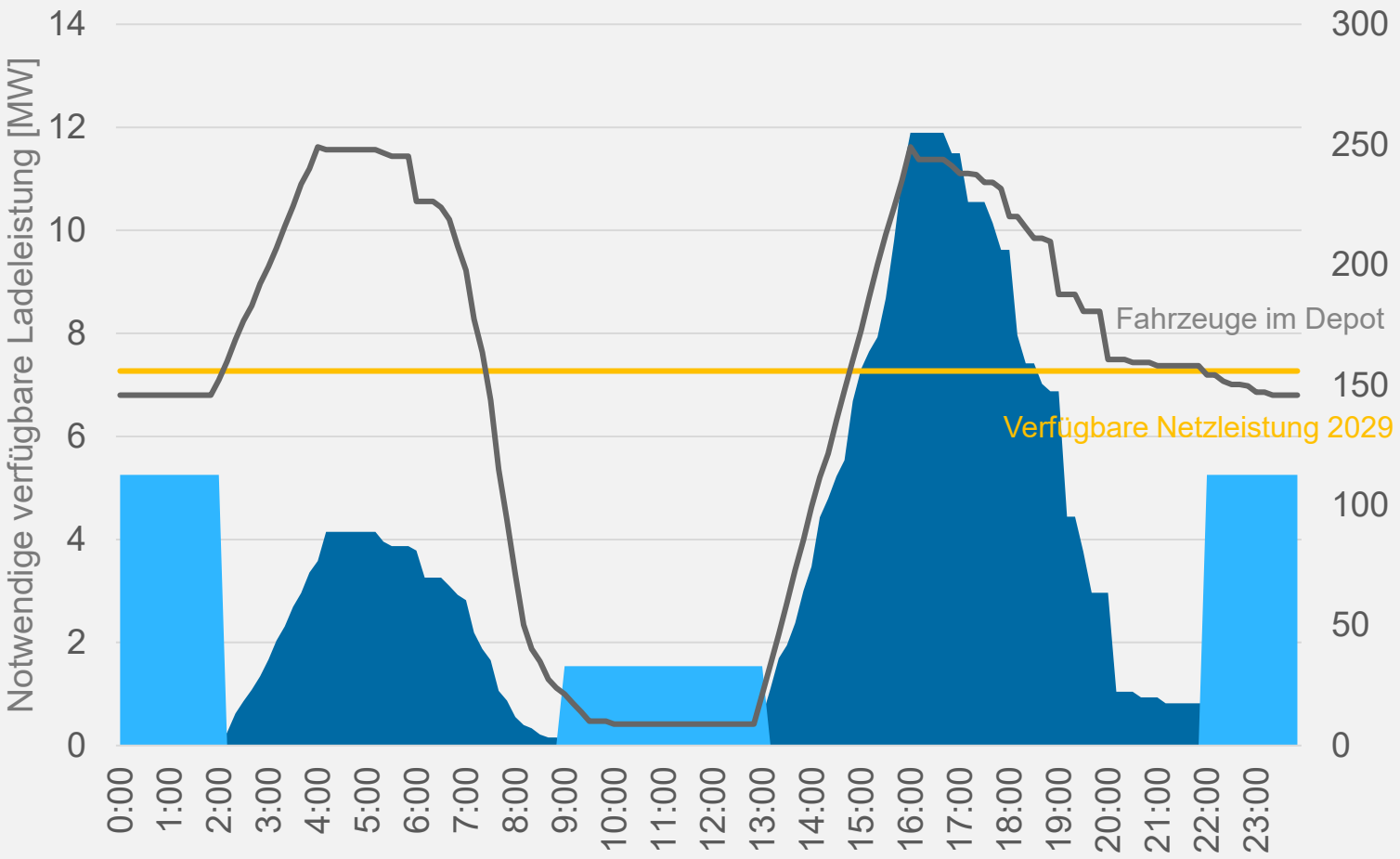
Alle Fahrzeuge, die zwei Schichten fahren (dunkelblau), laden im gesamten Zeitraum im Depot mit gleicher Leistung (vgl. Szenario B).

Die Einschichtfahrzeuge (hellblau) laden in den weniger beanspruchten Zeitfenstern, wenn die Zweischichtfahrzeuge unterwegs sind:

- Nahverkehr lädt nachts
- Fernverkehr lädt vormittags

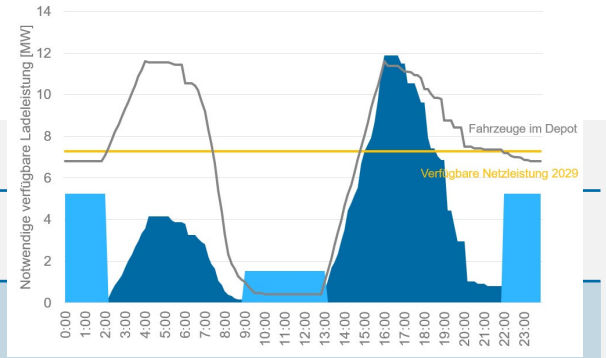
Ergebnis:

Niedrigere, aber immer noch hohe Lastspitzen über der geplanten Anschlussleistung. Effektive Entlastung der intensiv genutzten Hauptladefenster



Öko-Institut

Szenario C „Verteiltes Laden + Lastverschiebung Einschicht“ – Bewertung



Notwendige Leistung	12 MW
Anzahl an Ladepunkten	155 (alle Zweischicht Fahrzeuge. brauchen eigene Ladesäule)
Voraussetzungen	• Voraussetzungen aus Szenario B
Herausforderungen	• Niedrigere, aber immer noch sehr hohe und nicht realisierbare Netzanschlussleistung • Baukosten für weniger Ladepunkte (155) als in Szenario B, aber immer noch viele. Diese sind jedoch, genauso wie in Szenario B günstiger, da eine niedrige Leistung notwendig ist (nachts 36 kW pro Ladepunkt). • Starke Platzprobleme, da viele, aber weniger Fahrzeuge als in Szenario B gleichzeitig im Depot laden. Dies ist mit der aktuellen Depotgestaltung nicht vereinbar und würde den Erwerb zusätzlicher Flächen erfordern. • Erhöhter organisatorischer Aufwand, da manche Fahrzeuge direkt nach der Ankunft im Depot mit dem Laden beginnen und andere erst später ans Netz gekoppelt werden.
Vorteile	• Vorteile aus Szenario B • Entlastung der intensiv genutzten Hauptladefenster

Öko-Institut

Szenario D „Optimierte Ladefenster“ – Hintergrund

Durch die zeitliche Verschiebung der Ladeprozesse der Einschichtfahrzeuge in weniger ausgelastete Tageszeiten konnte die Netzbelastung im intensiv genutzten Nachmittagszeitraum von 14 MW auf 12 MW reduziert werden. Dieser Wert ist jedoch weiterhin deutlich zu hoch. Die Ursache liegt darin, dass die Doppelschichtfahrzeuge nach wie vor gleichzeitig und mit gleichbleibender, wenn auch minimierter, aber in Summe dennoch hoher Ladeleistung geladen werden. Zudem wird aus der Analyse ersichtlich, dass zu Beginn und zum Ende der Ladefenster jeweils nur sehr geringe Ladeleistungen benötigt werden – hier besteht weiteres Optimierungspotenzial.

Im nächsten Schritt wird daher eine intelligentere Verteilung der Ladeleistung sowohl innerhalb als auch zwischen den beiden stark beanspruchten Hauptladefenstern vorgenommen. Konkret bedeutet dies, dass früh zurückkehrende Fahrzeuge unmittelbar mit höherer Leistung zu laden beginnen, während spät abfahrende Fahrzeuge ihren Ladevorgang erst zeitnah vor der nächsten Tour aufnehmen. Dadurch wird die Lastspitze reduziert, da nicht mehr alle Doppelschichtfahrzeuge über das gesamte Ladefenster hinweg gleichzeitig laden. Zusätzlich wird ein Teil des Energiebedarfs für die nächtliche Langstreckentour bereits am Vormittag gedeckt, sodass nach der energieärmeren Nahverkehrstour am Tag weniger Energie nachgeladen werden muss.

Ein weiterer zentraler Aspekt betrifft die Ladeinfrastruktur selbst. Die zuvor untersuchten Szenarien erforderten zwischen 90 und 249 Ladesäulen, was – bei einem Platzbedarf von 4,5 × 16,5 m pro Fahrzeug inkl. Ladesäule – einer benötigten Fläche von 6.700 bis 18.500 m² entspricht. Eine solche Flächennachfrage ist in der Realität häufig nicht umsetzbar. Daher wird in diesem Szenario angestrebt, die Anzahl der Ladesäulen zu reduzieren, indem wenige, aber leistungsstärkere Ladepunkte eingesetzt werden. Im Fokus stehen dabei Ladesäulen mit einer maximalen Ladeleistung von 500 kW, was als ambitioniert, jedoch grundsätzlich realisierbar einzustufen ist.

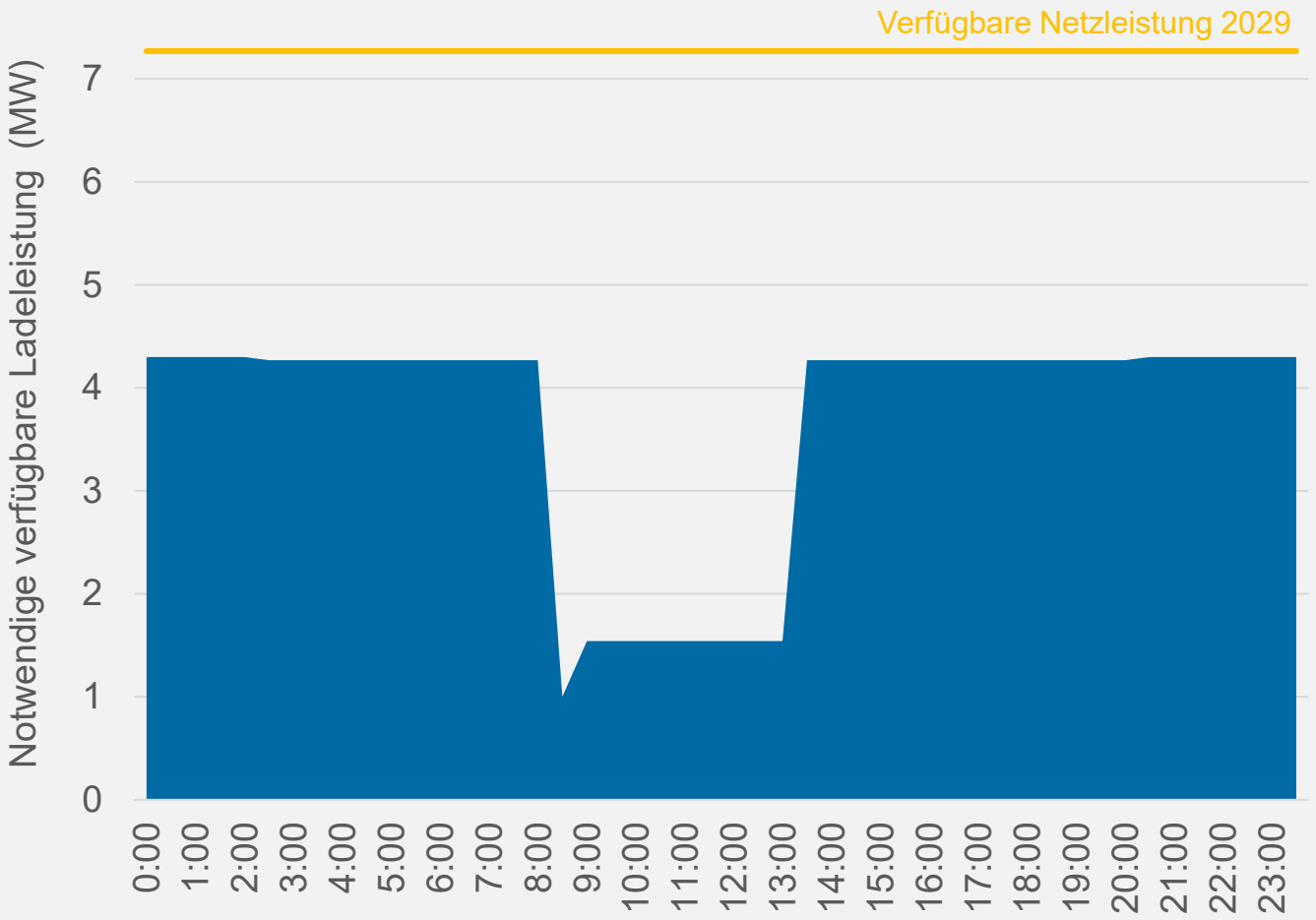
Dieses Szenario stellt eine umfassende Optimierung der Ladeprozesse dar. Zwar ist die exakte Umsetzung in der Praxis voraussetzungsreich und möglicherweise nur eingeschränkt realisierbar, es verdeutlicht jedoch das erhebliche Potenzial systematischer Ladeoptimierung und zeigt, in welchen realistischen Leistungs- und Flächen-Größenordnungen sich ein optimierter Ladebetrieb bewegen kann.

Szenario D „Optimierte Ladefenster“ – Lastgang

Umsetzung:

Die Ladeleistung als auch die Anzahl der Ladepunkte werden durch Optimierung minimiert. Jeder Ladepunkt stellt eine Leistung von maximal 500 kW zu Verfügung.

- Früh zurückkehrende Fahrzeuge laden sofort mit hoher Leistung
- Spät abfahrende Fahrzeuge, fangen erst später an, mit hoher Leistung zu laden.
- Im Hauptladefenster vormittags wird bereits mehr geladen, um das Nachmittagsladefenster zu entlasten.
- Einschicht-Fahrzeuge laden nur nachts und mittags, wenn Doppelschicht-Fahrzeuge unterwegs sind (vgl. Szenario C).



Öko-Institut

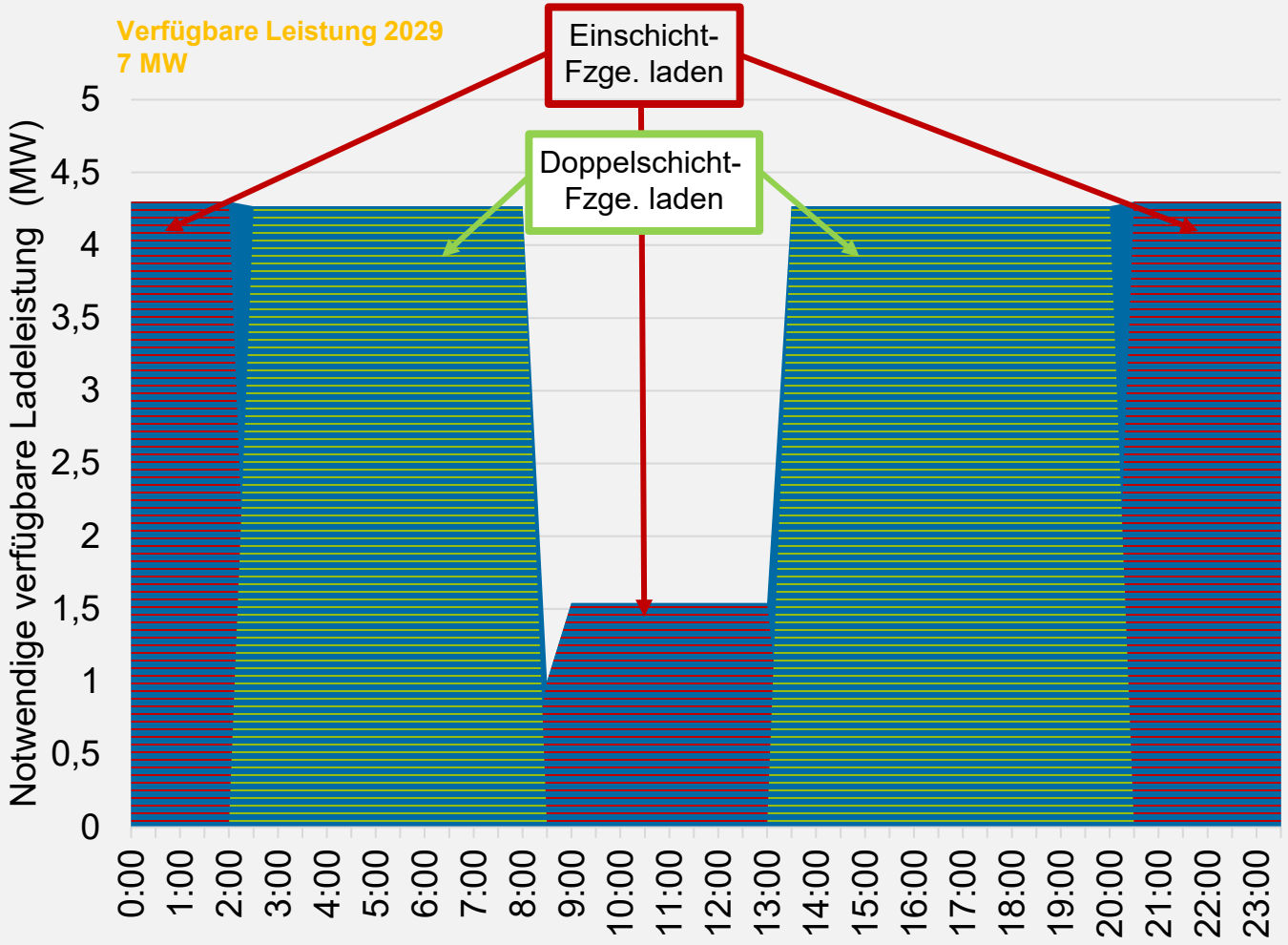
Szenario D „Optimierte Ladefenster“– Lastgang nach Fahrzeugeinsatz

Ladezeitpunkt nach Fahrzeugeinsatz:

Morgens und nachmittags laden nur die Doppelschichtfahrzeuge. Tagsüber und nachts, wenn die Doppelschichtfahrzeuge unterwegs sind, laden nur die Einschichtfahrzeuge.

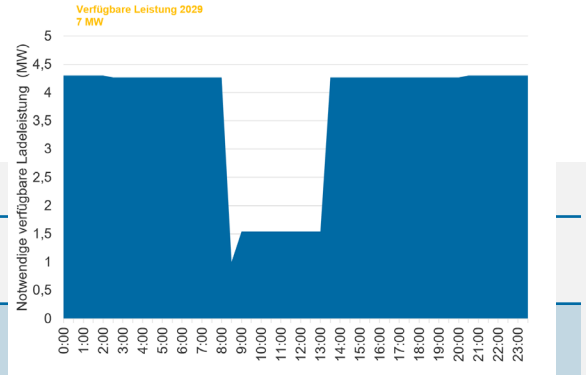
Ergebnis:

Die erforderliche Ladeleistung sinkt auf ein Niveau, das bis 2029 realistisch erreichbar ist. Die Batterieladung kann so intelligent verteilt werden, dass ein weitgehend gleichmäßiger Leistungsabruf erfolgt. Lediglich am Vormittag wird deutlich weniger Leistung benötigt, da sich zu diesem Zeitpunkt nur neun Fahrzeuge im Depot befinden und laden.



Öko-Institut

Szenario D „Optimierte Ladefenster“ – Bewertung



Notwendige Leistung	4,3 MW (2029 realistisch)
Anzahl an Ladepunkten	9 (bei 500 kW je Ladepunkt)
Voraussetzungen	• Lademanagement muss mit dem Dispositionssystem verknüpft sein, um Abfahrtszeiten zu kennen. • Es bedarf eines intelligenten Lademanagements mit komplexen Optimierungs-berechnungen, um für jedes Fahrzeug individuell den Ladezeitraum zu berechnen, so dass es vor seiner Abfahrt voll geladen ist und die Lastspitzen des Depots minimiert werden.
Herausforderungen	• Hohe Baukosten für wenige Ladepunkte mit sehr hoher Ladeleistung (500 kW). • Häufiges Umparken der Fahrzeuge notwendig (hoher Personalaufwand), da die Ladezeit pro Fahrzeug in vielen Fällen nur 20 Minuten beträgt (Nahverkehrsfahrzeuge) und die Ladesäule danach von einem anderen Fahrzeug genutzt wird.
Vorteile	• Durch die Optimierung entsteht ein verringerter Platzbedarf von 60m x 18m – dies ist mit der momentanen Depotausgestaltung vereinbar. • Deutlich niedrigere und 2029 realisierbare Leistung notwendig (Minderung der Lastspitze um 84% im Vergleich zum Szenario A).

Öko-Institut

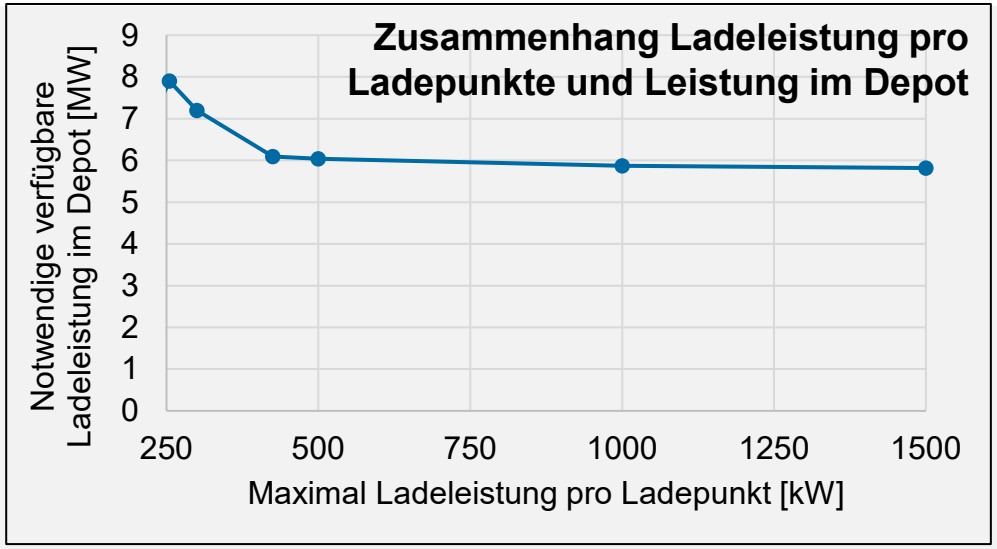
Szenario D „Optimierte Ladefenster“ – Anzahl Ladepunkte

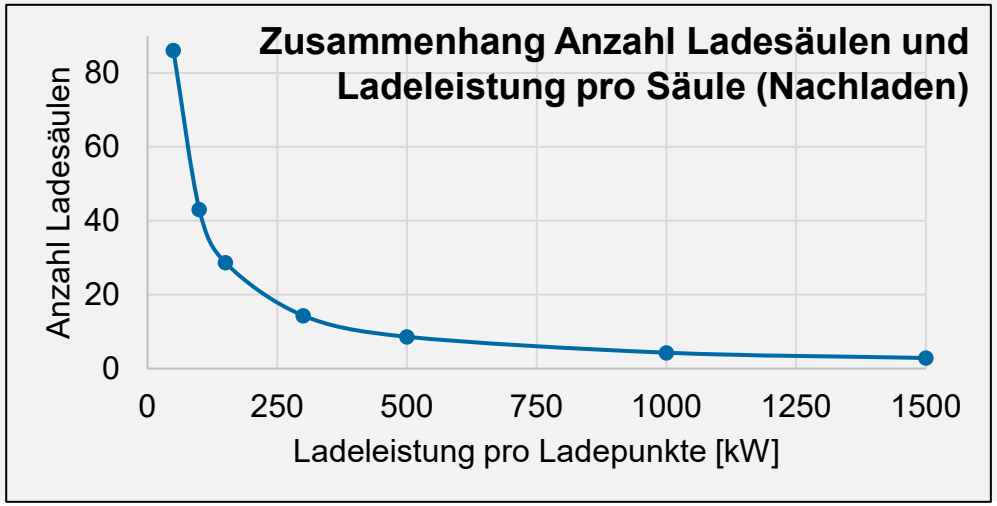
Erkenntnisse zur notwendigen verfügbaren Leistung:

Je höher die Ladeleistung pro Ladepunkt, umso geringer ist die notwendige verfügbare Leistung in den intensiv genutzten Zeiträumen, in denen die Doppelschichtfahrzeuge laden. Dies liegt daran, dass Fahrzeuge die früh ins Depot kommen oder spät wegfahren ganz am Anfang oder ganz am Ende mit hoher Leistung schnell vollladen können und somit den restlichen Zeitraum entlasten. Mit zunehmender Ladeleistung pro Ladepunkt fällt die Verringerung der Gesamtleistung geringer aus (die Kurve flacht ab).

Erkenntnisse zur Anzahl der Ladepunkte:

Mit zunehmender Ladeleistung pro Ladepunkt sinkt die notwendige Anzahl der Ladepunkte, da ein Ladepunkt im gleichen Zeitraum mehr Fahrzeuge aufladen kann. Wenn jeder Ladepunkt 300 kW Leistung zur Verfügung hat sind 14 Ladesäulen notwendig, bei 500 kW 9 Ladepunkte und bei 1500 kW nur noch 3 Ladesäulen. Hierbei wurde aber noch kein Zeitverlust zwischen zwei Ladevorgängen an einer Säule beachtet. Erst bei einer „Leerlaufzeit“ (→ kein Ladevorgang) der Ladesäule von 20 Minuten verdoppelt sich der Bedarf auf 19 Ladesäulen in der Variante mit 500 kW Ladepunkten.





Öko-Institut

Szenario E „Batteriespeicher“ – Hintergrund

Durch die intelligente Verschiebung des Leistungsbedarfs innerhalb und zwischen den Hauptladefenstern kann die erforderliche Netzleistung deutlich reduziert und auf ein realisierbares Niveau von 4,3 MW gesenkt werden. In den Abend-, Nacht- und Vormittagsstunden wird die Ladeleistung so verteilt, dass eine nahezu konstante Netzlast entsteht. In diesen Zeiträumen bestehen kaum weitere Optimierungsmöglichkeiten. Lediglich der etwas erhöhte Ladebedarf der Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge während der Nacht könnte perspektivisch teilweise auf die Hauptladefenster umverteilt werden.

Zur Mittagszeit bleibt hingegen weiterhin ein deutliches Lastminimum bestehen. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt rund 240 Fahrzeuge im Nahverkehrseinsatz unterwegs sind. Im Depot befinden sich lediglich neun Einschicht-Fernverkehrsfahrzeuge, deren Ladebedarf bei etwa 1,5 MW liegt. Dieses ungenutzte Potenzial wird im Szenario „Batteriespeicher“ adressiert. Durch die Integration eines stationären Batteriespeichers kann die ungenutzte Netzleistung am Vormittag genutzt werden, um den Speicher zu laden. Die gespeicherte Energie steht dann über den restlichen Tagesverlauf zur Verfügung, um die Ladevorgänge der E-Lkw zu unterstützen und damit die erforderliche maximale Netzleistung weiter zu reduzieren.

In diesem Szenario wurden die technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Aspekte eines Batteriespeichers sowie mögliche Wechselwirkungen mit den sonstigen Stromverbrauchern nicht betrachtet. Stattdessen erfolgte eine stark vereinfachte Modellierung. Eine spätere praktische Umsetzung könnte zudem um die Eigennutzung von lokal erzeugter Energie, beispielsweise aus auf dem Depot installierten Photovoltaikanlagen, erweitert werden.

Szenario E „Batteriespeicher“ – Lastgang

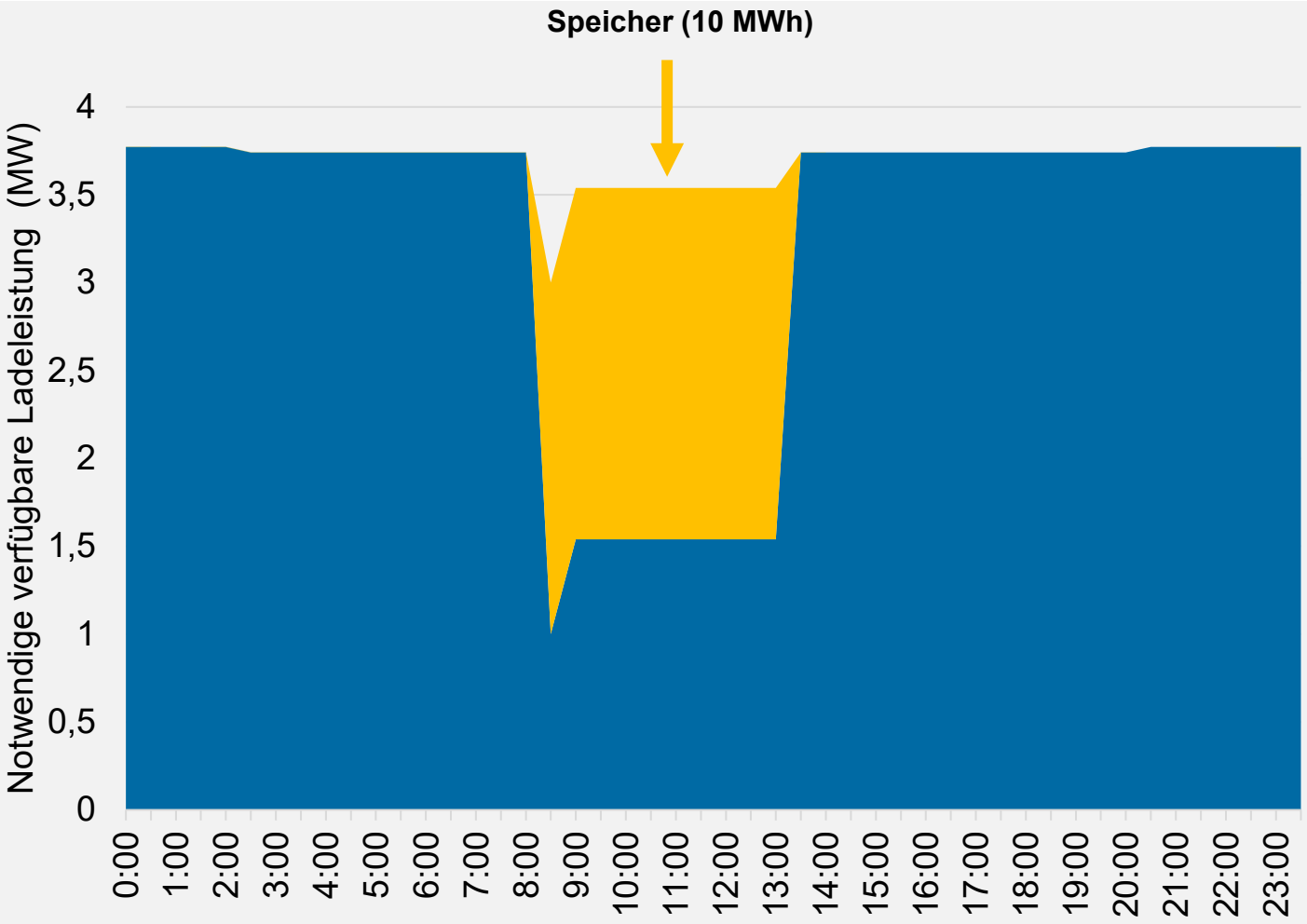
Umsetzung:

Die Ladeleistung als auch die Anzahl der Ladepunkte wird durch die Optimierung minimiert (vgl. Szenario D).

Ein stationärer Speicher mit einer Kapazität von **10 MWh** wird während der wenig beanspruchten Vormittagsstunde aufgeladen (5h*2 MW) und in den stark beanspruchten Zeitfenstern genutzt, um die Fahrzeuge zu laden.

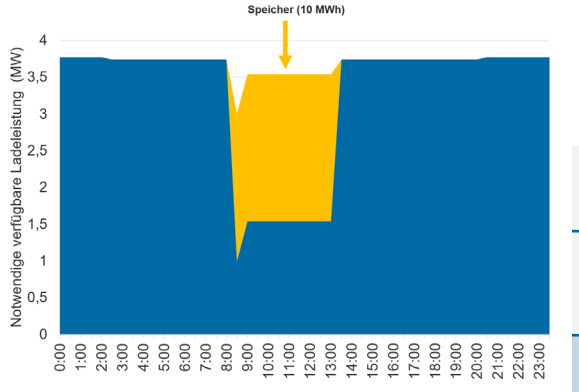
Ergebnis:

Die notwendige Ladeleistung wird um 0,5 MW verringert und das Lasttief am Vormittag wird effektiv genutzt.



Öko-Institut

Szenario E „Batteriespeicher“ – Bewertung



Notwendige Leistung	3,8 MW
Anzahl an Ladepunkten	9
Voraussetzungen	• Voraussetzungen aus Szenario D
Herausforderungen	• Herausforderungen aus Szenario D • Hohe Baukosten für den großen Batteriespeicher • Platzbedarf für den Batteriespeicher • Anmeldung/Genehmigung beim Netzbetreiber notwendig
Vorteile	• Vorteile aus Szenario D • Speicher führt zu niedrigerer notwendiger Leistung (-12% bzgl. Szenario D) • Eigenstromnutzung würde Potenzial eines Speichers ggf. noch vergrößern (hier nicht betrachtet)

Öko-Institut

Weitere Szenarien mit betrieblich-organisatorischen Anpassungen

In den vorangegangenen Szenarien wurde das Laden im Depot für den Fall eines vollständig elektrifizierten Fuhrparks schrittweise optimiert. Da in den Szenarien D und E über einen Großteil des Tages eine nahezu konstante Netzleistung abgerufen wird, lässt sich durch eine weitere Verschiebung von Ladeprozessen keine zusätzliche Reduktion der benötigten Leistung erzielen.

Aus diesem Grund richten die folgenden Szenarien den Fokus auf betrieblich-organisatorische Anpassungen, die den Leistungsbedarf weiter senken können oder bislang nicht berücksichtigte Rahmenbedingungen einbeziehen. Dabei werden sowohl zusätzliche Potenziale als auch neue Herausforderungen sichtbar, die für den praktischen Betrieb von Bedeutung sind.

Folgende betrieblichen Anpassungen werden untersucht:

- Die **Fernverkehrsfahrzeuge laden** Teile ihres Energiebedarfs **öffentlich** (Szenario F).
- Das **Laden der kleinen Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge** findet **nicht im Depot** des Fallstudienpartners statt und wird an die fahrzeugbesitzenden Servicepartner ausgelagert (Szenario G).
- Nächtlich **einkommender Fernverkehr lädt** ebenfalls **im Depot** (Szenario H).

Szenario F „Fernverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Hintergrund

Im Szenario „Fernverkehr lädt außerhalb des Depots“ wird das öffentliche Zwischenladen oder das Zwischenladen außerhalb des betrachteten Depots als zusätzliche Maßnahme betrachtet. Besonders im Fernverkehr spielt diese Option eine zentrale Rolle. Bei einer Batteriekapazität von 600 kWh und einer geplanten Restreichweite von 50 kWh bei der Rückkehr ins Depot müssten etwa 80 % der Fernverkehrsfahrzeuge im betrachteten Fall unterwegs nachladen. Dies eröffnet das Potenzial, beim Zwischenladen gezielt mehr Energie aufzunehmen als für die direkte Weiterfahrt erforderlich wäre, um dadurch die notwendige Ladeleistung im Depot zu reduzieren. Das Nachladen könnte sowohl an öffentlichen Ladesäulen als auch bei halböffentlichen Ladepunkten anderer Logistikunternehmen oder in anderen Depots des Fallstudienpartners stattfinden, sofern an diesen die notwendige Netzanschlusskapazität verfügbar ist und Ladesäulen errichtet werden können.

Zudem werden im betrachteten Fall rund 45 % der Fernverkehrstouren im sogenannten Begegnungsverkehr durchgeführt. Dabei treffen sich zwei Fahrzeuge des Fallstudienpartners an einem vorher festgelegten Ort zum Tausch der Wechselbrücken. Dieser Begegnungspunkt könnte perspektivisch mit Ladeinfrastruktur ausgestattet sein, sodass die ohnehin stattfindende Aufenthaltszeit gleichzeitig für den Ladevorgang genutzt werden kann. Dadurch bietet sich ein besonders effizientes Potenzial zur Verlagerung von Ladeprozessen außerhalb des Depots.

Im Folgenden werden drei Varianten vorgestellt, die unterschiedliche Möglichkeiten des öffentlichen Zwischenladens abbilden.

Szenario F „Fernverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Varianten

Variante	Einfluss auf Leistungsbedarf der Fernverkehrsfahrzeuge (ohne Nahverkehr)
(1) Alle Fernverkehrstouren, die sowieso eine Zwischenladung erfordern, laden die Hälfte ihres Energiebedarfs öffentlich oder außerhalb des Depots. Dabei handelt es sich um 80% der Touren.	Es ist nur 74% des ursprünglichen Leistungsbedarfs für die Fernverkehrsfahrzeuge nötig.
(2) Alle Fernverkehrstouren, die Begegnungsverkehr fahren, laden die Hälfte ihres Energiebedarfs außerhalb des Depots an den Begegnungspunkten. Dabei handelt es sich um 45% der Touren.	Es ist nur 91% des ursprünglichen Leistungsbedarfs für die Fernverkehrsfahrzeuge nötig.
(3) Alle Fernverkehrstouren laden die Hälfte ihres Energiebedarfs öffentlich oder außerhalb des Depots. Auf der Hälfte der Strecke wird ein Zwischenladestopp gemacht und die notwendige Energie geladen.	Es ist nur 66% des ursprünglichen Leistungsbedarfs für die Fernverkehrsfahrzeuge nötig.

Szenario F (3) „Fernverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Lastgang

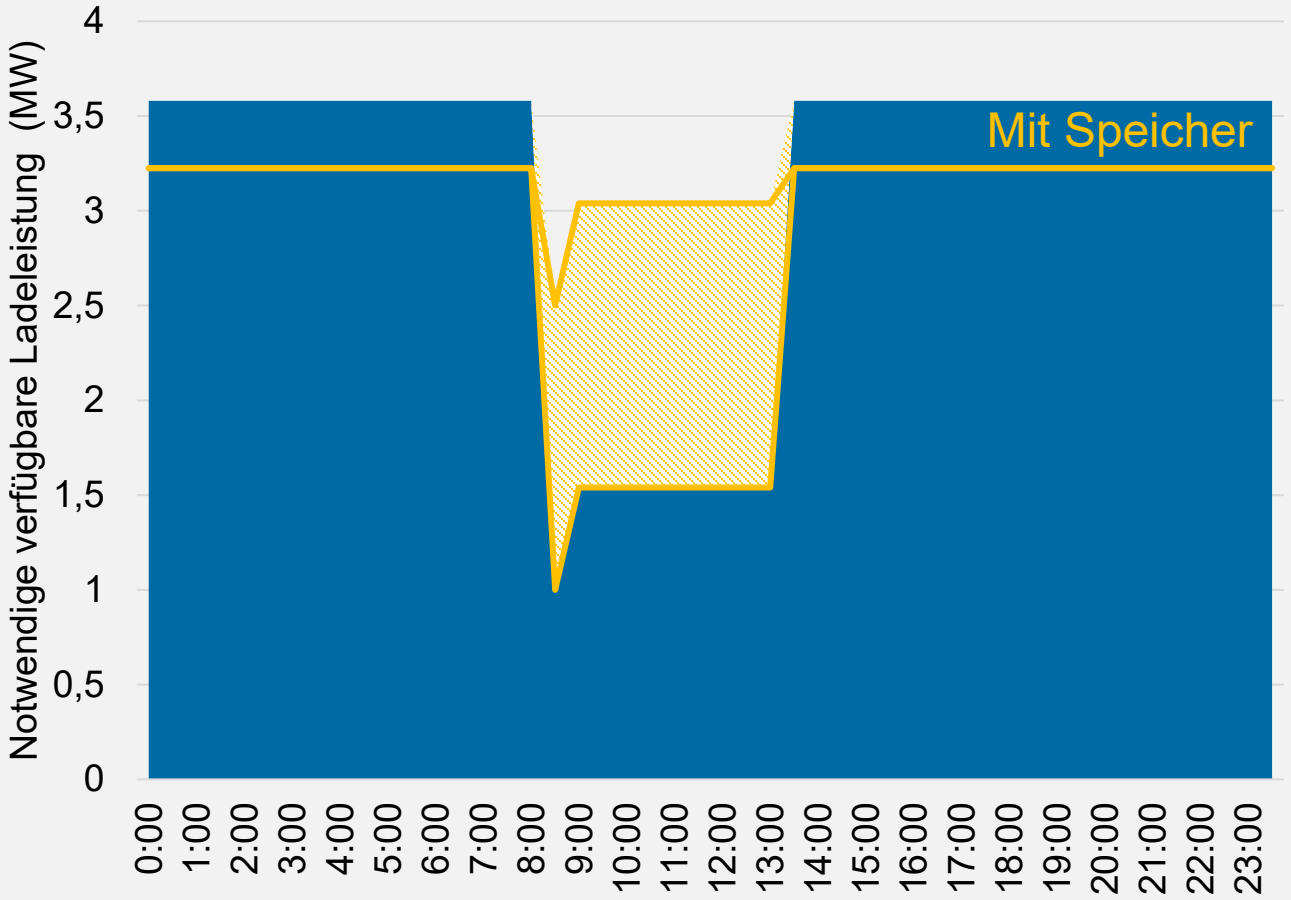
Umsetzung:

Die Hälfte des Stroms für den Fernverkehr wird öffentlich oder außerhalb des Depots geladen, da in diesem Szenario jedes Fernverkehrsfahrzeug auf der Hälfte seiner Tour öffentlich die Hälfte seines Energiebedarfs lädt. Somit muss weniger im Depot geladen werden.

Die Ladeleistung als auch die Anzahl der Ladepunkte sind weiterhin durch Optimierung minimiert (vgl. Szenario D / Szenario E). Der verringerte Ladebedarf wird auf den gesamten Tag verteilt.

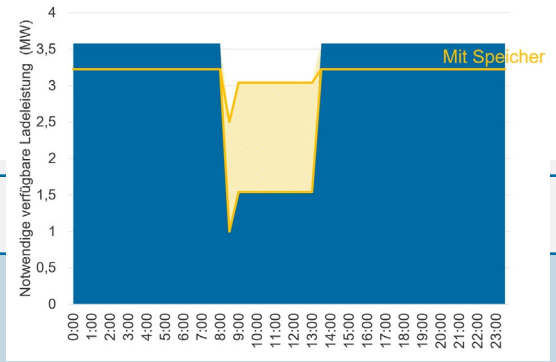
Ergebnis:

Durch die Auslagerung des Ladebedarfs für die Hälfte des Langstreckenverkehrs wird der Leistungsbedarf im Depot leicht gesenkt. Durch die Installation eines stationären Speichers kann der Effekt noch verstärkt werden.



Öko-Institut

Szenario F (3) „Fernverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Bewertung



Notwendige Leistung	3,2 MW
Anzahl an Ladepunkten	9
Voraussetzungen	• Voraussetzungen aus Szenario D • Es bedarf eines Wissens über öffentlich durchgeführte und notwendige Ladevorgänge • Zielpunkte des Begegnungsverkehrs müssten Batterieladung und Tausch von Wechselbrücken ermöglichen
Herausforderungen	• Herausforderungen aus Szenario D • Potenziell längere Strecke und Fahrtdauer durch die Ladepausen und mögliche Umwege • Machbarkeit und ökonomische Attraktivität von Höhe der Strompreise und Verfügbarkeit von öffentlicher Ladeinfrastruktur abhängig. • Erhöhung der Komplexität der Tourenplanung und -durchführung, da Ladestopps zu spezifischen Zeitpunkten durchgeführt und vorgegebene Energiemengen geladen werden müssen.
Vorteile	• Vorteile aus Szenario D • Deutliche Senkung der notwendigen Ladeleistung (-25% im Vergleich zu Szenario D) • Ausnutzung des Umstandes, dass viele Fahrzeuge ohnehin angesichts langer Strecken öffentlich laden müssen. Dadurch wird das Depot entlastet.

Öko-Institut

Szenario G „Nahverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Hintergrund

Im Szenario „Nahverkehr lädt außerhalb des Depots“ wird der Energiebedarf der kleinen Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge in der Betrachtung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese außerhalb des Depots ihren Energiebedarf decken. Diese Umsetzung ist von den folgenden Annahmen getragen:

- Die kleinen Nahverkehrsfahrzeuge gehören Servicepartnern (häufig kleinere Transportunternehmen) und stehen aktuell nicht im Depot des Fallstudienpartners, nachdem sie die Tour beendet haben. Die Fahrzeuge stehen dem Fallstudienpartner außerhalb der beauftragten Touren auch nicht frei zur Verfügung und sind womöglich in dieser Zeit für andere Auftraggeber unterwegs.
- Darüber hinaus steht der Nahverkehr wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit aktuell nicht im Fokus der Elektrifizierung. Dies liegt daran, dass durch die geringe Fahrleistung auf mautpflichtigen Straßen nur geringe Mauteinsparungen zu Stande kommen. Die Mauteinsparungen sind jedoch aktuell ein entscheidender Faktor für die betriebswirtschaftlich sinnvolle Elektrifizierung von Lkw.

Gleichzeitig muss jedoch betont werden, dass der Nahverkehr auf Grund von ökologischen und regulatorischen Notwendigkeiten perspektivisch ebenfalls elektrifiziert werden muss. Angesichts der eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten von Servicepartnern ist aber der Aufbau einer eigenen Ladeinfrastruktur mit großen Unsicherheiten behaftet und auch eine vollständige Auslagerung von deren Bedarfen auf öffentliche Ladeinfrastruktur mit Hürden verbunden. Diese Herausforderungen wurden in den folgenden Analysen jedoch nicht vertieft.

Die Umsetzung erfolgt im Folgenden auf unterschiedlichen Ausgangsszenarien:

- Zunächst werden die Auswirkungen auf den Lastgang für das optimierte Ladefenster (Szenario D) dargestellt.
- Danach werden die Auswirkungen für den Fall des unoptimierten (Szenario A) und des verteilten Ladens (Szenario B) betrachtet.

Szenario G „Nahverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Lastgang I

Umsetzung:

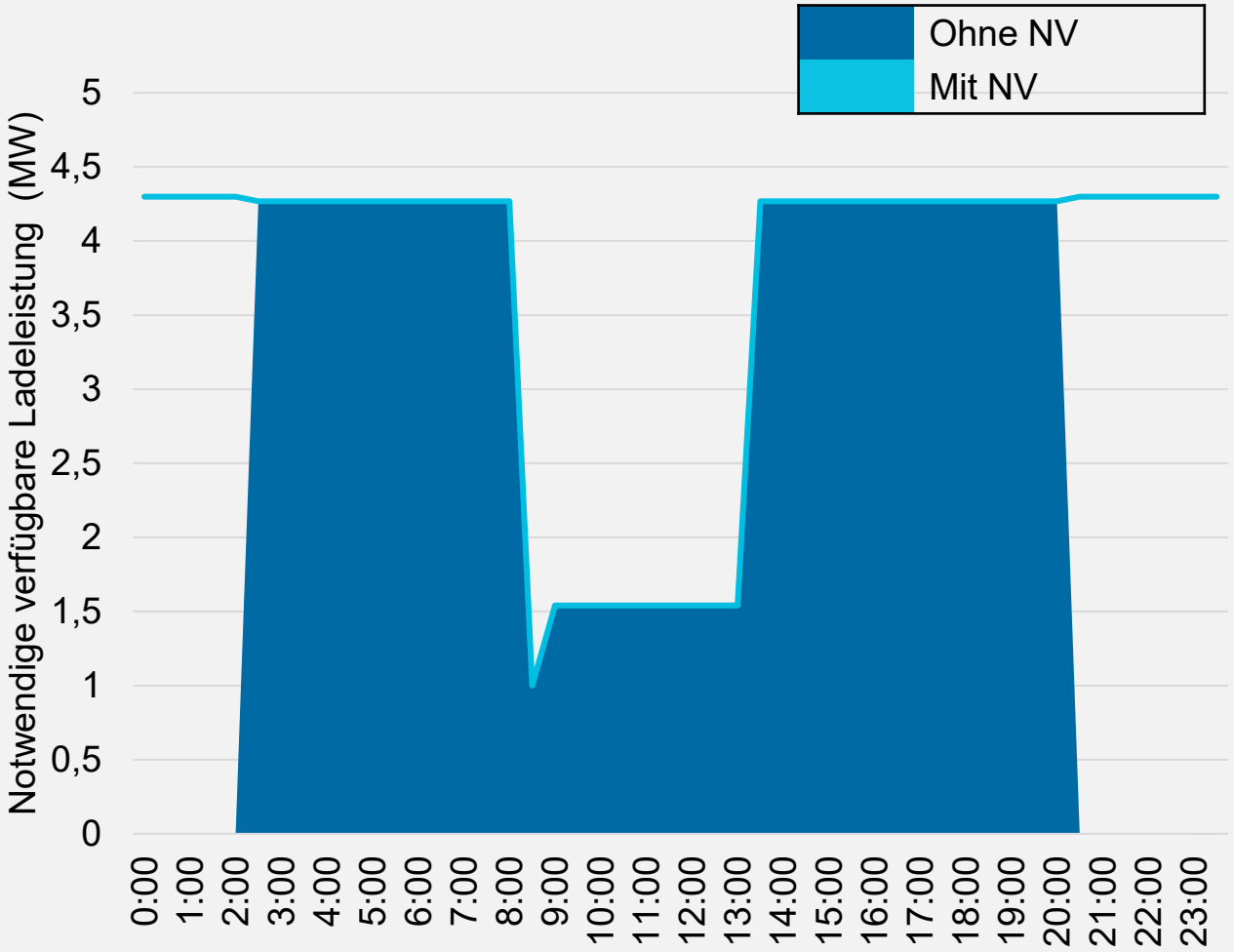
Die kleinen Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge laden nicht im Depot.

Weiterhin wird die Ladeleistung als auch die Anzahl der Ladepunkte durch Optimierung minimiert (vgl. Szenario D / Szenario E).

Ergebnis:

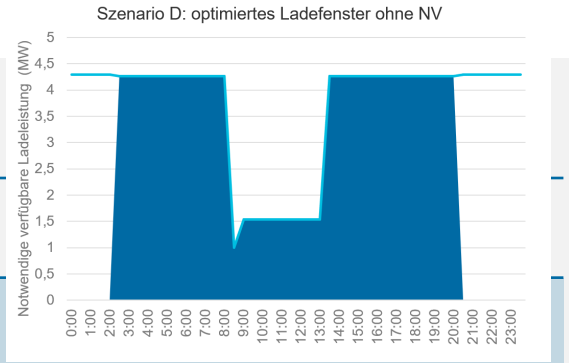
Die Auslagerung des Ladens der kleinen Einschicht-Nahverkehrsfahrzeuge führt im optimierten Szenario zu keiner Entlastung, da die kleinen Einschichtfahrzeuge laden, wenn die Fernverkehrsfahrzeuge unterwegs sind.

Diese Analyse verdeutlicht vielmehr das Potenzial für die Nutzung des Nachtzeitraums für das Laden von Fahrzeugen.



Öko-Institut

Szenario G „Nahverkehr lädt außerhalb des Depots“ – Bewertung

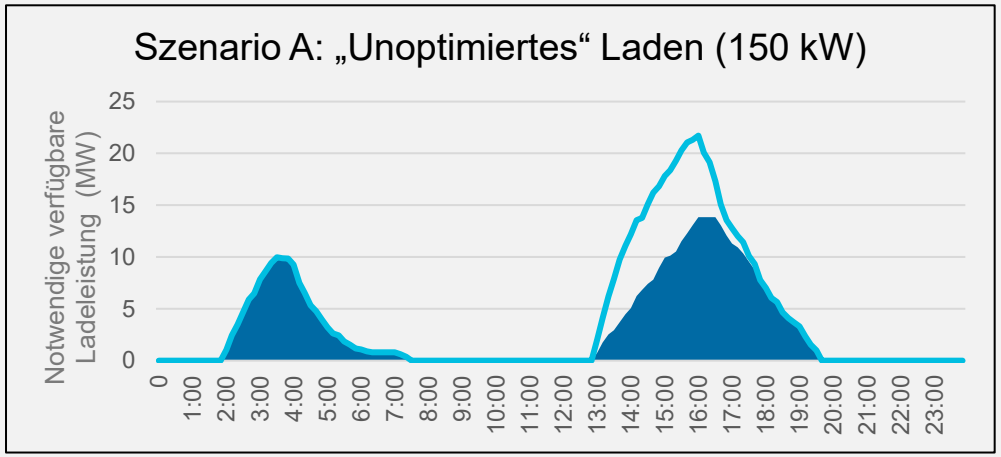


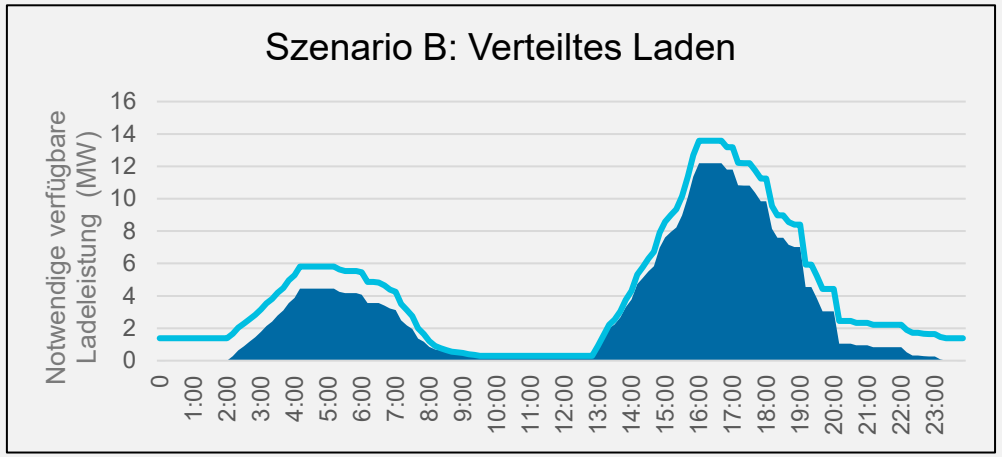
Notwendige Leistung	4,3 MW
Anzahl an Ladepunkten	9
Voraussetzungen	• Voraussetzungen aus Szenario D
Herausforderungen	• Herausforderungen aus Szenario D • Die Nahverkehrsfahrzeuge müssen außerhalb des Depots laden. • Der Ausschluss der Nahverkehrsfahrzeuge führt lediglich zu einer Verringerung der notwendigen Ladeleistung um 1% im Vergleich zu Szenario D.
Vorteile	• Vorteile aus Szenario D • Nachts gibt es keinen Leistungsbedarf mehr. Die freie Netzkapazität könnte durch einen Batteriespeicher genutzt werden.

Öko-Institut

Szenario G „ohne Nahverkehr“ – Lastgang II

Ergebnisse:
Werden die unoptimierteren Szenarien betrachtet, hat der Ausschluss des Nahverkehrs einen deutlich größeren Effekt auf die notwendige Ladeleistung. Vor allem im Szenario A wird der hohe Leistungsbedarf am Nachmittag substanziell gesenkt. Vormittags verändert sich der Leistungsbedarf nicht, da die NV-Fahrzeuge in dem Szenario direkt nach ihrer Ankunft nachmittags im Depot geladen werden und ihren Ladevorgang bereits am frühen Abend abschließen. In Szenario B verringert sich der Ladebedarf im gesamten Zeitraum gleichmäßig. Die notwendige verfügbare Ladeleistung bleibt aber trotz Auslagerung des NV-Ladebedarfs über den 2029 realisierbaren 7 MW. Somit sind immer noch weitere Optimierungen notwendig.





Ohne NV
Mit NV

Öko-Institut

Szenario H „Einkommender Fernverkehr lädt im Depot“ – Hintergrund

Dieses Szenario berücksichtigt den hypothetischen Energiebedarf von nächtlich am Depot einkommendem Fernverkehr. Dafür wurde ein zufälliger Stichtag ausgewählt. An dem Tag trafen gegen 23 Uhr 13 Fahrzeuge des Fallstudienpartners, die in anderen Depots gestartet waren, im untersuchten Depot ein.

Die Analyse des Fernverkehrs aus dem betrachteten Depot zeigt, dass ein Großteil der Langstreckentouren Zwischenladungen benötigt (im Durchschnitt etwa 130 kWh). Es ist daher davon auszugehen, dass auch die Fernverkehrsfahrzeuge aus den übrigen Depots des Fallstudienpartners zwischenladen müssen. Durch nächtliche Zwischenladungen kann darüber hinaus der hohe Leistungsbedarf in den Hauptladefenstern – wie sie auch in den anderen Depots voraussichtlich auftreten werden – reduziert und das Gesamtsystem entlastet werden.

Das Zwischenladen lässt sich besonders effizient und kostengünstig in den Depots des Fallstudienpartners realisieren, da dort bereits Ladeinfrastruktur mit hoher Leistung und niedrigeren Kosten gegenüber öffentlichen Ladeangeboten zur Verfügung steht.

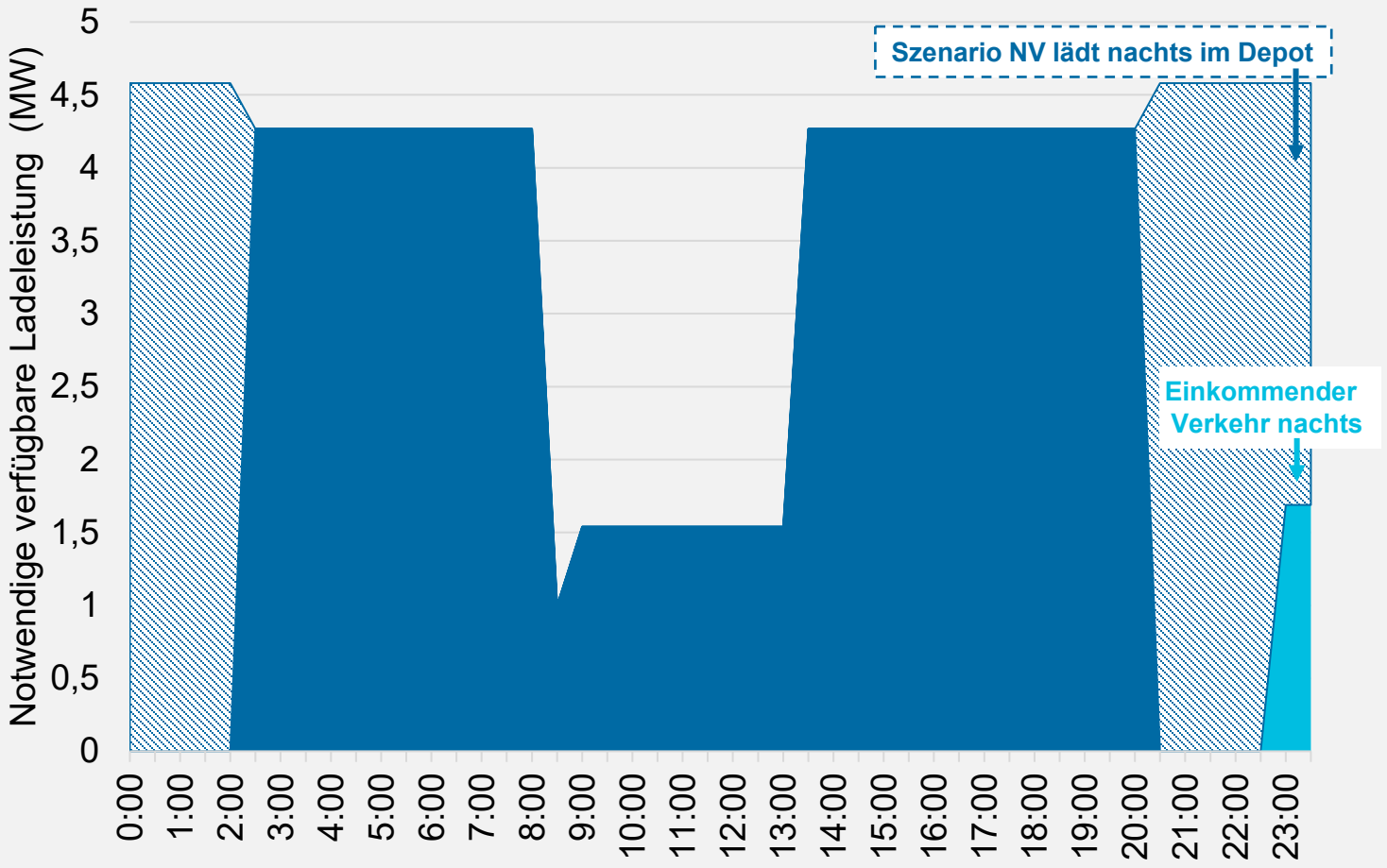
Aus diesem Grund wird ein nächtlicher, einkommender Fernverkehr von 13 Fahrzeugen um 23 Uhr mit einer Ladezeit von einer Stunde und einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von 130 kWh berücksichtigt. Dabei wird auf Basis von Szenario D und G einmal eine optimierte Ladestrategie mit und einmal ohne Nahverkehr als Grundszenario gewählt.

Szenario H „Einkommender Fernverkehr lädt im Depot“ – Lastgang I

Umsetzung:

Nachts einkommender Fernverkehr lädt im Depot.

Die Ladeleistung als auch die Anzahl der Ladepunkte sind weiterhin durch Optimierung minimiert (Szenario D / Szenario E).



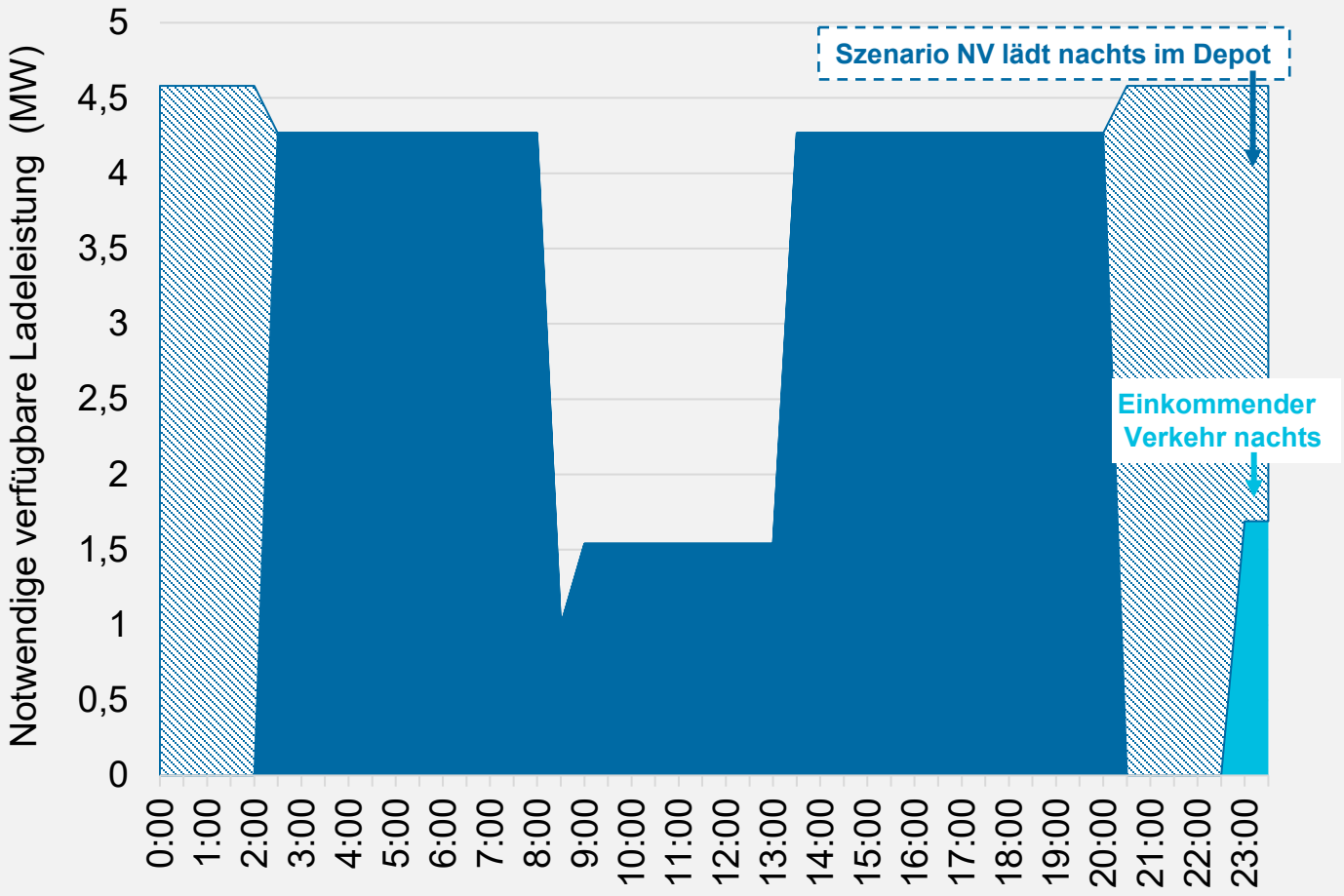
Öko-Institut

Szenario H „Einkommender Fernverkehr lädt im Depot“ – Lastgang II

Ergebnis:

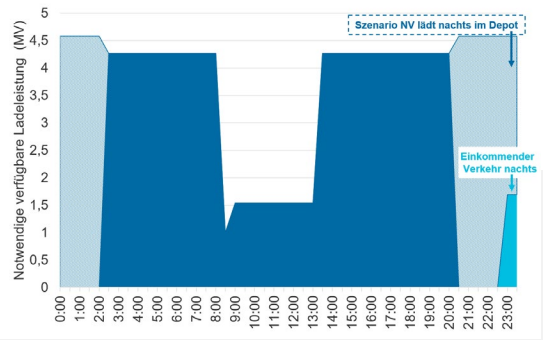
Wenn der Nahverkehr nachts im Depot lädt (dunkelblau schraffiert), erhöht sich die Ladeleistung durch den einkommenden Fernverkehr zwar substanziell (um etwa 500 kW), bleibt jedoch innerhalb des bis 2029 realisierbaren Rahmens. Diese Zusatzlast kann zudem auf Zeitintervalle verteilt werden, in denen nur die Doppelschicht-Fahrzeuge laden, und verliert dadurch an Relevanz.

Wird der Nahverkehr hingegen nicht nachts im Depot geladen, erhöht der ankommende Fernverkehr (hellblau) die Netzbelastung nicht, sondern nutzt die frei werdenden Kapazitäten effizient aus. In diesem Fall wäre es sogar denkbar, dass der einkommende Fernverkehr deutlich mehr lädt, um die Hauptladefenster in seinem Hauptdepot zu entlasten.



Öko-Institut

Szenario H „Einkommender Fernverkehr lädt im Depot“ - Bewertung



	Nahverkehr lädt im Depot	Nahverkehr lädt nicht im Depot
Notwendige Leistung	4,6 MW	4,3 MW
Anzahl an Ladepunkten	9	9
Voraussetzungen	• Voraussetzungen aus Szenario D	
Herausforderungen	• Herausforderungen aus Szenario D • Erhöht nächtliche Ladeleistung notwendig (+7% im Vergleich zu Szenario D)	• Herausforderungen aus Szenario G
Vorteile	• Vorteile aus Szenario D	• Vorteile aus Szenario G • Notwendige Ladeleistung wird nicht erhöht, freie Kapazitäten werden effizient genutzt.

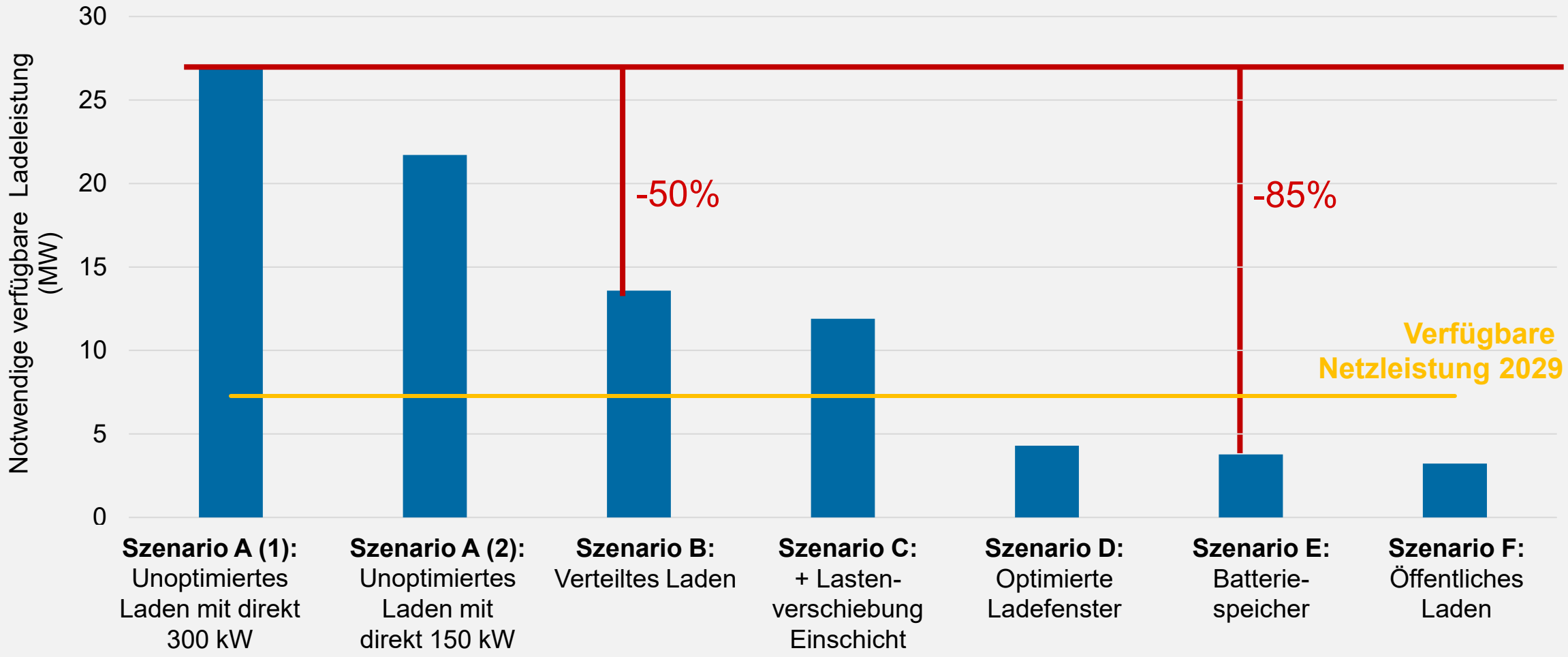
Öko-Institut

6 Szenariovergleich

Vergleich und Einordnung der notwendigen Ladeleistung

Vergleich und Einordnung der notwendigen Anzahl an Ladepunkten

Rückgang der notwendigen Ladeleistung durch die Optimierung der Batterieladung in den betrachteten Szenarien

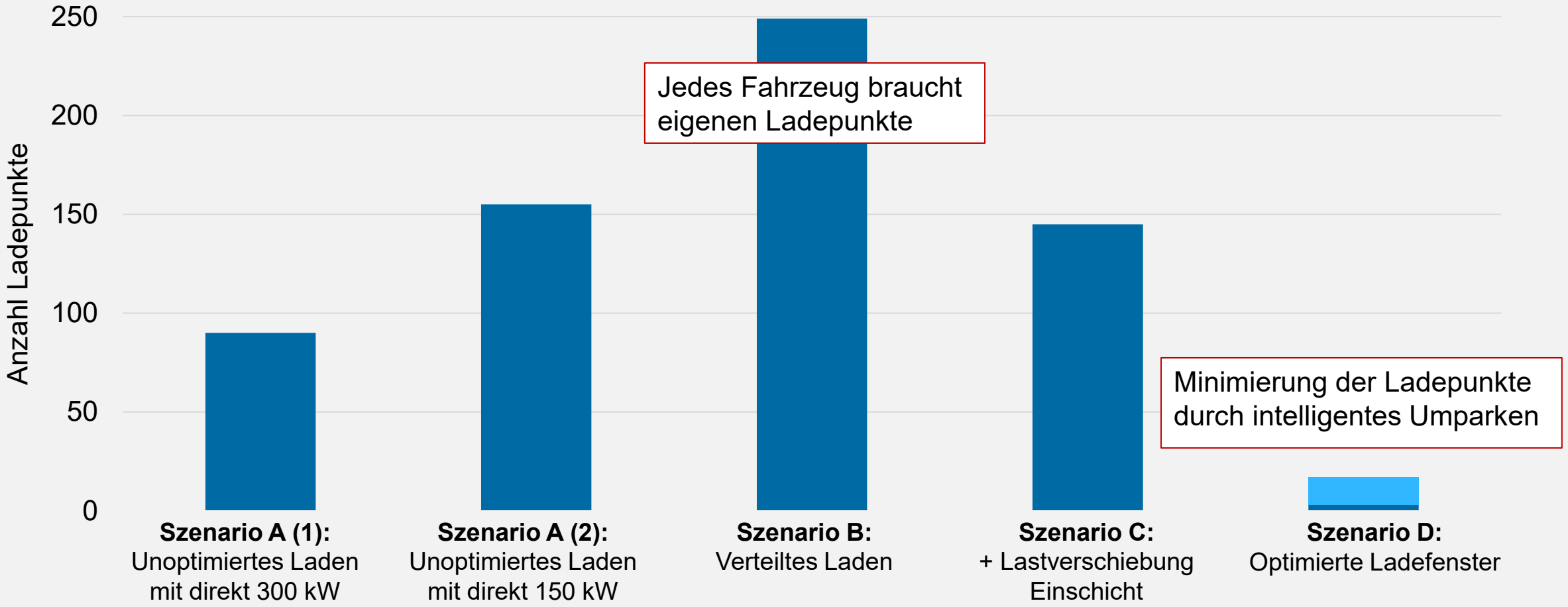


Öko-Institut

Einordnung der Szenarioergebnisse zur erforderlichen Leistung

- Durch die Optimierungen entsteht schrittweise eine substanzielle Reduktion des notwendigen Leistungsbedarfs.
- Das Szenario mit dem höchsten Leistungsbedarf ist Szenario A, da hier viele E-Lkw gleichzeitig mit 300 kW laden. Wird stattdessen nur mit 150 kW direkt geladen, reduziert sich der notwendige Leistungsbedarf bereits um knapp 20 %. Beide Varianten liegen jedoch etwa um den Faktor 3 bis 4 über der realistisch verfügbaren Anschlussleistung im Jahr 2029.
- Wird verteilt geladen (Szenario B), das heißt, dass jedes Fahrzeug über seine gesamte Standzeit mit minimal viel Leistung lädt, reduziert sich die Leistung um etwa 50% im Vergleich zu Szenario A. Durch die zeitliche Verschiebung der Einschichtfahrzeuge in weniger ausgelastete Ladefenster (Szenario C) sinkt die notwendige Leistung um weitere 15% im Vergleich zu Szenario B. Dennoch benötigen beide Szenarien immer noch etwa die doppelte Leistung dessen, was im Jahr 2029 an Netzanschlussleistung voraussichtlich verfügbar sein wird.
- Durch die intelligente Optimierung innerhalb und zwischen den stark genutzten Ladefenstern (Szenario D) kommt es zu einer deutlichen Reduktion des notwendigen Leistungsbedarfs – auf nur noch 4,3 MW – und die verfügbare Netzanschlusskapazität wird unterschritten.
- Die Implementierung eines Batteriespeichers (Szenario E) senkt den Leistungsbedarf zusätzlich um rund 12 % (im Vergleich zu Szenario D). Dies entspricht nur noch etwa 15 % des ursprünglichen Bedarfs aus Szenario A.
- Wird zudem die Hälfte des Energiebedarfs der Fernverkehrsfahrzeuge außerhalb des Depots gedeckt (Szenario F), reduziert sich der Leistungsbedarf weiter auf etwa 3,2 MW.

Vergleich der Anzahl an Depot-Ladepunkten in den Szenarien



Öko-Institut

Einordnung der Szenarioergebnisse zur Anzahl an Depot-Ladepunkten

- Die Szenarien weisen einen stark unterschiedlichen Bedarf an Ladepunkten auf. Eine geringere notwendige Ladeleistung bedeutet dabei nicht automatisch mehr oder weniger Ladepunkte, dies hängt von der konkreten Strategie und anderen Faktoren ab.

- Beim direkten, unoptimierten Laden mit 300 kW (Szenario A) werden rund 90 Ladepunkte benötigt. Wird hingegen direktes Laden mit 150 kW umgesetzt, steigt die Anzahl der benötigten Ladepunkte um den Faktor 1,7 auf etwa 155. Beide Varianten sind aufgrund des sehr hohen Platzbedarfs sowie der damit verbundenen Bau- und Investitionskosten nicht realistisch umsetzbar.

- Das verteilte Laden über die gesamte Standzeit mit niedriger Leistung (Szenario B) führt zur höchsten Anzahl erforderlicher Ladepunkte. In diesem Fall benötigt jedes der 249 Fahrzeuge einen eigenen Ladepunkt.

- Durch die zeitliche Verschiebung der Einschichtfahrzeuge in weniger ausgelastete Ladefenster (Szenario C) sinkt der Bedarf um etwa 100 Ladepunkte. Auch dieses Szenario ist jedoch aufgrund des hohen Flächenbedarfs und der Kosten für eine sehr große Anzahl – trotz niedrigerer Leistung – nicht praktikabel.

- Eine Minimierung sowohl der Ladeleistung als auch der Anzahl der Ladepunkte wird möglich, wenn wenige Ladepunkte mit hoher Leistung genutzt werden und die Fahrzeuge nacheinander durch häufiges Umparken geladen werden (Szenario D). Je nach gewählter Ladeleistung je Ladepunkt werden benötigt: 14 Ladepunkte bei 300 kW; 9 Ladepunkte bei 500 kW; 3 Ladepunkte bei 1.500 kW. Der zusätzliche Zeitaufwand durch das Umparken ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Dieses Szenario und seine Umsetzungsvarianten stellt eine flächentechnisch realisierbare Ladeinfrastruktur dar.

7 Fazit

Zentrale Ergebnisse

Betriebliche Voraussetzungen für die Umsetzung

Limitationen der dargestellten Analysen

Schlussbemerkung und Ausblick

Zentrale Ergebnisse I: Ladezeiträume und Leistungsbedarf

- Durch den Fahrzeugeinsatz ergeben sich für das betrachtete Depot **Hauptladezeiträume nachmittags/abends und am frühen Morgen**. Die größten Laderestriktionen bestehen im Zweischichtbetrieb, da die Fahrzeuge in kurzer Zeit viel Energie laden müssen.

- **Ohne** eine umfassende **Optimierung der Batterieladung** bei Vollelektrifizierung des Depots fällt der maximale **Leistungsbedarf im Jahr 2029 um ein Vielfaches höher (22-27 MW) als die verfügbare Netzanschlusskapazität** (~7 MW) aus.

- **Bei einer umfassenden Optimierung** der Ladevorgänge kann der maximale Leistungsbedarf hingegen teilweise sogar deutlich (~4 MW) niedriger als die verfügbare Kapazität ausfallen und die **ursprünglichen Lastspitzen um 85% reduziert** werden.

- Die **Batterieladung des Nahverkehrs und eines Teils des Fernverkehrs außerhalb des Depots** kann den maximalen **Leistungsbedarf** auf etwas mehr als **3 MW** reduzieren.

Zentrale Ergebnisse II: Anzahl Ladepunkte und Platzbedarf

- **Beim unoptimierten** oder auch über die gesamte Standzeit verteilten **Laden** der Fahrzeuge wären zwischen **90 und 249 Ladepunkte** im Depot erforderlich.

- Durch die **Optimierung** der Ladevorgänge kann die **Anzahl der erforderlichen Ladepunkte deutlich geringer** ausfallen.

- Bei der **Installation von Hochleistungsladepunkten** (300 bis 500 kW), die optimiert genutzt und von Fahrzeugen nur während der notwendigen Ladedauer belegt werden, kann die **Anzahl der Ladepunkte auf 9 bis 14 reduziert** werden und es wäre ein Platzbedarf von etwa 60 x 18 m für den Aufbau der Ladeplätze erforderlich.

- Während der **Aufbau von einer hohen Anzahl an Ladepunkten** in dem betrachteten Depot aus Platzgründen aktuell **nicht realistisch** wäre, erscheint der **Aufbau weniger Hochleistungs-ladepunkte platztechnisch realisierbar.** Die Minderung der Anzahl an Ladesäulen ginge jedoch mit einem hohen Personalaufwand für das Umparken der Fahrzeuge einher.

Betriebliche Voraussetzungen für die Umsetzbarkeit der Szenarien

Die untersuchten Szenarien erfordern unterschiedliche **betriebliche Voraussetzungen** jenseits der Netzanaschlussleistung, um umgesetzt werden zu können. Diese wurden im Zuge der Analysen **nicht im Detail bewertet** und geprüft, stellen aber wichtige Erfolgskriterien dar.

- **Vorausschauende Informationen zu Abfahrtszeiten sowie Energiebedarfen** der einzelnen Touren/ Fahrzeuge sind in allen Szenarien (außer A und B) erforderlich.
- Große Anzahl an Ladepunkten (90–249) in den wenig optimierten Szenarien gehen mit einen erheblichen **Flächenbedarf im Depot** (ca. 6.700 bis 18.500 m²) einher. Je nach Szenario werden entweder sehr viele Ladesäulen mit niedrigerer Ladeleistung oder weniger Ladepunkte mit hoher Ladeleistung gebraucht.
- Für die stärker optimierten Szenarien sind **umfangreiche Optimierungsberechnungen sowie ein intelligentes Flotten- und Lademanagement** notwendig. Je nach gewählter Strategie kann auch hier ein großer Platzbedarf bestehen, sofern die Anzahl der Ladepunkte nicht minimiert wird – oder es entsteht ein erhöhter **personeller Aufwand, um häufiges Umparken durch Berufskraftfahrer** bei wenigen zentralen Ladepunkten **zu ermöglichen**. Die Umsetzbarkeit wird aus Anwendersicht kritisch bewertet.
- Wird ein **Batteriespeicher** integriert, entsteht ein **zusätzlicher Platz- und Investitionsbedarf** sowie **Aufwände für Bau und Genehmigung**.
- Um ein Teil des **Ladens im öffentlichen Raum** zu ermöglichen, ist die Verfügbarkeit und die **technische und ökonomische Eignung der öffentlichen Ladeinfrastruktur** eine zentrale Voraussetzung.

Limitationen der dargestellten Analysen

In dieser Fallstudie wurden **einige Vereinfachungen** vorgenommen. Einige weitere Aspekte, die für eine umfassende Potenzialanalyse der Depotelektrifizierung relevant wären, wurden außen vor gelassen und werden im Folgenden erläutert.

- Die **Tourendaten** des Fuhrparks **beruhen auf einem Stichtag**. Potenzielle saisonale oder wöchentliche Schwankungen wurden nicht betrachtet.
- **Zwei Depots**, die in großer räumlicher Nähe sind, wurden **gemeinsam betrachtet**. Mögliche Unterschiede in den Standortbedingungen sowie im Abstellort der Fahrzeuge wurden dabei nicht berücksichtigt.
- Die Ladeszenarien beruhen auf der Annahme, dass alle **Fahrzeuge während der gesamten Zeit**, in der sie keine Tour fahren, **flexibel für Ladevorgänge und Umparkprozesse zur Verfügung stehen**. Tatsächlich befinden sich die Fahrzeuge von Servicepartnern jenseits von Be-/Entladevorgängen nicht auf dem Depotgelände und es ist auch nicht auszuschließen, dass sie jenseits der berücksichtigten Fahrten weitere Touren für andere Auftraggeber leisten. Die verfügbaren **Ladezeiträume** werden daher tendenziell **überschätzt**.
- Weitere relevante Herausforderungen, wie **logistische Abläufe im Depot, verfügbare Stellflächen und Abstell- bzw. notwendige Umparkprozesse**, gerade auch mit Blick auf eine erhebliche Anzahl an betriebsfremden Fahrzeugen von Servicepartner, wurden nicht bzw. nicht im Detail berücksichtigt.
- Ebenso blieben **Wechselwirkungen mit anderen Energieverbrauchern**, die **Eigenstromerzeugung** sowie die Einbindung in das **übergeordnete Stromsystem** und **damit verbundene Preissignale** unberücksichtigt.

Schlussbemerkung und Ausblick

Die vorliegende Analyse konnte anhand von Fahrzeug- und Netzanschlussdaten für einen realen Depotstandort zeigen, dass eine **Vollelektrifizierung des betrachteten** Fuhrparks unter den getroffenen Annahmen insbesondere **mit Blick auf die notwendige maximale Ladeleistung grundsätzlich möglich** erscheint, jedoch nur unter der Voraussetzung einer intelligenten Steuerung aller Ladevorgänge.

Mit Blick auf die notwendigen betrieblichen Voraussetzungen und getroffene Vereinfachungen werden folgende Aspekte **als besonders relevant für vertiefende Analysen** eingeschätzt:

- **Praktische Prüfung der Umsetzbarkeit** der Ladestrategien (inkl. Umparkprozesse) und des Aufbaus der notwendigen Ladeinfrastruktur.
- **Vertiefte Analyse** der Touren und Ladebedarfe **von Fahrzeugen von Servicepartnern** unter Berücksichtigung möglicher weiterer Touren.
- **Integrierte Betrachtung mit weiteren Stromverbrauchern** (inkl. Flexibilitäten) und der Eigenstromerzeugung im Depot sowie Wechselwirkungen.
- **Analyse der Investitions- und Betriebskosten** der unterschiedlichen Umsetzungsstrategien.

Referenzen

[1] Bundesministerium für Verkehr (2025). Klimaschutz im Verkehr – Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Klimaschutz-im-Verkehr/klimaschutz-nutzfahrzeuge-mit-alternativen-antrieben.html (letzter Zugriff am 25.11.2025).

[2] Hacker, F., Le Corguillé, J., Göckeler, K., Minnich, L., Ziegler, L., Dolinga, T. (2025). Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen und Aufbau von Ladeinfrastruktur. 1. Teilbericht des Forschungsvorhabens „ELV LIVE – Begleitforschung zum Einsatz batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge im logistischen Regelbetrieb“ FKZ 16EM6003-1. gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

[3] NOW GmbH (2024). Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024.

[4] Hacker, F., Gnann, T., Le Corguillé, J., Stephan, A., Kappler, L., Mottschall, M., Plötz, P. (2025). Truck depot charging. Final report for Transport and Environment. Study commissioned by Transport & Environment, Karlsruhe, Berlin.

[5] Sanchari Deb, Mikko Pihlatie, Mohammed Al-Saadi (2022). Smart Charging. A Comprehensive Review.

[6] Sevdari, K., Knudsen, R. M., Fabbri, G., Pedersen, K. L., Alami (2025). Demonstration of bidirectional charging using ISO 15118-20. Paper presented at 38th International Electric Vehicle Symposium, Göteborg, Sweden.

[7] Alain Aoun, mehdi Adda, Adrian Ilinca, Mazen Ghandour, Hussein Ibrahim. Dynamic Charging Optimization Algorithm for Electric Vehicles to Mitigate Grid Power Peaks. World Electric Vehicle Journal 2024/15(7), 324.

[8] Beckers, A., Medina, R., Wilkins, S. (2024). Charge Planning Tool for Heavy-Duty Electric Vehicle Fleets.

[9] Saeed Naghdizadegan Jahromi, Gilles Van Kriekinge, Cedric De Cauwer, Thierry Coosemans (2025). Scheduling Electric Vehicle Charging for Participation in the Belgian Imbalance Market Using Model-Free Reinforcement Learning, Göteborg, Sweden.

[10] Fabio Frank, Johannes Oebel, Till Gnann (2025). Optimizing Charging Infrastructure for Truck Depots: Cost-Minimal System for Truck Charging Combined with PV and Battery Storage Systems. Paper presented at the 38th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Gothenburg, Sweden, 15-18th June 2025, Gothenburg, Sweden.

[11] Abdullah Dik, Siddig Omer, Rabah Boukhanouf (2022). Electric Vehicles. V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration. Energies 15(3), 803.

[12] Transport-online (2025). Bidirektionales Laden: ISO 15118 verändert E-Lkw-Flottenbetrieb. https://transport-online.de/news/bidirektionales-laden-iso-15118-veraendert-e-lkw-flottenbetrieb-182197.html (letzter Zugriff am 25.11.2025).

[13] Göckeler, K., Hacker, F., Dolinga, T., Le Corguillé, J. (2025). Akzeptanz von E-Lkw bei Early-Adoptern. Ergebnisse einer Online-Befragung von Transportunternehmen im Projekt ELV-LIVE. Öko-Institut.

Öko-Institut