

Projektstudie: Ökoeffizienz intelligenter &
bidirektionaler Ladestrategien von Bussen in
Depots



Bericht zu dem vom BMBF geförderten Projekt
im Rahmen des
Forschungscampus Mobility2Grid (M2G)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation und Problemstellung.....	3
2. Theorie und Szenarien	3
Intelligentes Laden.....	3
Bidirektionales Laden.....	3
Ökologisch optimiertes Laden.....	4
Szenarien	4
3. Methodik & Modellierung.....	5
Basisdaten.....	5
Simulation.....	6
Fahrzeugfahrprofilsimulation	6
Verbrauch und Alterung.....	6
Strommixsimulation	6
LCA- und Kostenmodell	7
Lebenszyklusanalyse/LCA-Modell.....	7
Kostenmodell	8
Ladezeitoptimierung	8
Auswertung.....	8
4. Ergebnisdarstellung.....	9
Intelligentes Laden.....	9
Bidirektionales Laden.....	9
Eco-Care-Matrix	10
5. Interpretation	11
6. Fazit	12
7. Quellen.....	13

1. Motivation und Problemstellung

Die Elektrifizierung von Busflotten erfordert die Bereitstellung großer Energiemengen und erzeugt einen hohen Infrastrukturbedarf. Dem folgen ökonomische und ökologische Kosten. Diese können durch ein intelligentes Management der Ladezeitpunkte reduziert werden. Bidirektionales Laden schafft hier zusätzliche Flexibilitäten, die in folgender Arbeit bewertet werden. Das Hauptziel der Studie ist der Vergleich der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen von drei verschiedenen Ladestrategien in Busdepots basierend auf ökonomischen und ökologischen Zielfunktionen. Die betrachteten Szenarien sind:

- Plug & Charge,
- intelligentes Laden und
- bidirektionales Laden

Bei letzteren Beiden wird die Ladezeit verschoben, sowie eine Leistungsbegrenzung für das Gesamtdepot implementiert. **Betrachtungsgegenstand ist ein fiktives Berliner Busdepot mit 144 Bussen**, anhand dessen simulativ evaluiert wird.

2. Theorie und Szenarien

Intelligentes Laden

Intelligentes Laden wird in Depots eine der ersten unabdingbaren Anwendungen finden. Größere Depots mit mehreren hundert Bussen, Ladeleistungen von heute üblichen 150kW pro Ladepunkt und hohen Gleichzeitigkeitsfaktoren würden unnötig hohe Anschlussleistungen erfordern. **Peak shaving** ist demnach die wahrscheinlichste Grundanwendung für Lademanagementsysteme in Depots, die allerdings die technische Infrastruktur zur Erweiterung diverser zusätzlicher Anwendungen schafft und deren Umsetzung erleichtert. Die zeitliche Optimierung des Stromeinkaufs ist hier einer der wahrscheinlichsten Zusatzfunktionen.

Bidirektionales Laden

Bidirektionales Laden ist bisher keine marktgängige, verfügbare Funktionalität in der Ladetechnik für Busse. Im Projekt Mobilty2Grid wird eine solche Entlademöglichkeit erstmal in der Leistungsklasse der 150kW-Ladegeräte mit CCS pilotiert. Eine Standardisierung ist zwar in der ISO 15118 2nd Ed. Zukünftig vorgesehen, bisher jedoch in für Busdepots relevanten Leistungsklassen nicht verfügbar. Mögliche Anwendungen für bidirektionales Laden sind:

- **Eigenverbrauchsoptimierung** (nicht anwendbar für urbane Busdepots),
- **Bereitstellung von Regelenergie** (technisch mit den prototypischen Ladegeräten derzeit nicht umsetzbar, wegen zentraler Steuerung und entsprechenden Reaktionszeiten),
- **peak shaving** (möglich, aber nur bei extremen betrieblichen Zwängen notwendig),
- **Netzanschlussentlastung durch Import von Energie** ins Depot durch Gelegenheitslader, die mit auf der Strecke geladener Energie reine Depotlader versorgen und so außergewöhnlich hohe Verbräuche bei Extremwetterlagen kompensieren.

Eine der wahrscheinlichsten Anwendungsfälle ist der Handel mit Strom. Die Preisschwankung muss jedoch groß genug sein, um die durch zusätzliche Zyklen verursachten Kosten der Batterie zu kompensieren. Um im Vergleich zum intelligenten Laden eine erhebliche

Geldeinsparung zu erzielen, müssen die Preisschwankungen auf dem Strommarkt zunehmen und die Batteriesystempreise weiter sinken.

Ökologisch optimiertes Laden

Neben der Optimierung der Lade- und Entladezeitpunkte von Fahrzeugen nach ökonomischen Gesichtspunkten, kann auch nach ökologischer Zielfunktion optimiert werden. Dies betrifft z.B. den Energieeinkauf. Der Strom im deutschen Strommix enthält einen signifikanten, stetig wachsenden Anteil erneuerbarer, fluktuierender Energie. Um deren Vermarktung und Integration zu fördern, kann der Konsum an die Verfügbarkeit angepasst werden. Der Energiemix hat zu jedem Zeitpunkt spezifische Emissionen pro Kilowattstunde. Eine Verlagerung des Konsums in Stunden mit besonders niedrigem spezifischem Emissionsfaktor ermöglicht bilanziell niedrigere CO₂ Emissionen bei gleichem Energieverbrauch (Annahme attributional LCA). Dieser Ansatz ist noch nicht weit verbreitet ist, weil eine Kompatibilität mit konventionellen Corporate Carbon Footprints nicht ohne weiteres möglich ist, hat aber einen realen Einfluss auf die Emissionen

Szenarien

Im Folgenden werden die Szenarien **Plug&Charge** sowie **Smart Charging** und **Bidirektionales Laden** fokussiert. Das Plug & Charge Szenario (in der späteren Matrixdarstellung im Ergebnis als Baseline-Szenario genutzt) beschreibt den jeweiligen Ladevorgang des Fahrzeugs der automatisch beginnt, sobald der Bus eingesteckt wird und lädt bis er voll ist. Smart Charging dagegen verwendet Algorithmen, um die jeweiligen Ladevorgänge zeitlich intelligent zu verschieben. Das ermöglicht eine Synchronisation der Nachfrage des Fahrzeugs mit der verfügbaren Kapazität am Netzanschluss. Eine Überlastung oder hohe Leistungspreise können verhindert werden (peak shaving). Des Weiteren kann nach fluktuierenden Einkaufspreisen am Strommarkt (day ahead) optimiert werden, um Kosten einzusparen, wenn der Stromtarif diese Fluktuationen weitergibt, wovon in diesem Fall ausgegangen wird. Bidirektionales Laden ist eine Sonderform des intelligenten Ladens. Hier ermöglichen Hard- und Software es dem Lademanagementsystem auch Strom aus dem Fahrzeug ins Netz zurückzuspielen. Die Busse werden bei Anwesenheit wie stationäre Batterien verwendet. Überschüssiger Strom kann zwischengespeichert und bei Bedarf entsprechend wieder abgegeben werden, bzw. es kann bei niedrigen Börsenpreisen eingekauft und bei hohen wiederverkauft werden. Das gleiche gilt für die Optimierung nach ökologischer Zielfunktion, bei der zu Niedrigemissionszeiten eingekauft/vollgeladen und zu Hochemissionszeiten verkauft/entladen wird. So kann die Speicherkapazität unter Berücksichtigung diverser Nebenbedingungen intelligent nutzbar gemacht werden. Das bidirektionale Laden könnte in einer weiteren Ausbaustufe zusätzlich direkt zur Netzstabilisierung eingesetzt werden. Eine Vermarktung z.B. am Regelenergiemarkt wird hier jedoch nicht betrachtet.

Theoretisch sind viele Vermarktungsmechanismen für die Flexibilität in Busdepots denkbar. Die hier betrachteten beziehen sich jedoch lediglich auf das Peakshaving und den kostenoptimierten Energieeinkauf an der Börse. Es wird angenommen, die Schwankungen an der Strombörse würden 1zu1 an den Depotbetreiber weitergegeben. Steuern und andere verzerrende Abgaben wie Ökostromumlagen für Wiedereinspeisung werden ignoriert.

3. Methodik & Modellierung

Das Modell zur Bewertung der unterschiedlichen Lademanagementkonzepte besteht aus mehreren Teilmodellen und Optimierern und ist gemäß der nachstehenden Abbildung 1.

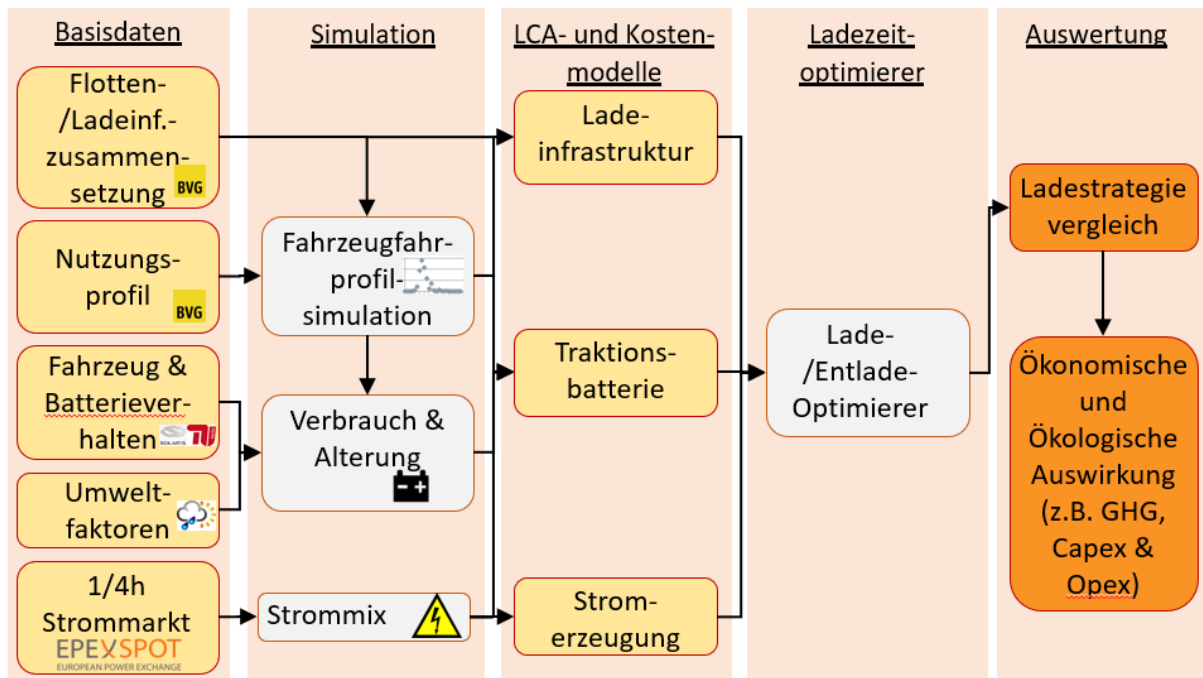


Abb. 1: Systemdarstellung Lademanagementkonzeptbewertung

Einflussgrößen/Daten der BVG über die bestehende Flotte, sowie aus Erhebungen ihrer Elektrobusse werden zur Erstellung einer Fahrzeugfahrprofilsimulation herangezogen. Ein Verbrauchs- und Alterungsmodell für Batterien wird erstellt - basierend auf Fahrleistungen und daraus resultierenden Zyklen und Entladetiefen, sowie Temperaturprofilen. Das dritte Simulationsmodell beschreibt die Stromzusammensetzung nach Energieträger im Viertelstundentakt für unterschiedliche Jahresscheiben. Zur Bewertung dieser Simulationsmodelle werden für alle beschriebenen Assets LCA- und Kostenmodelle erstellt. Auf Basis dieser wird die Ladezeitoptimierung durchgeführt. Deren Ergebnisse werden ausgewertet nach Kosten und CO₂-Emissionen.

Basisdaten

Die Szenarien basieren auf einem Busdepot, das mit einer maximalen Leistungskapazität von 6MW versorgt wird. Die maximale Batteriekapazität von 230 kWh wird für 12-Meter-Busse und 300 kWh Gelenkbusse angenommen, Zellchemie LiFePo wie sie bei den Elektrobusen zum Zeitpunkt der Erhebung weit verbreitet ist. Die Ladeleistung und andere benötigte Inputs für die Ladeinfrastruktur wurden in der ersten Phase der Forschung gesammelt.

Die Fahrprofilaten der elektrifizierten Busflotte basieren auf Aufzeichnungen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Die Daten spiegeln die Informationen von 195 Dieselnissen eines Berliner Depots wider. Sie enthalten den notwendigen Input zur Simulation einer elektrifizierten Busflotte, wie z.B. den Fahrplan (Ankunfts- und Abfahrtszeit) und die zurückgelegte Entfernung der Buse.

Die angenommenen Spezifikationen der Ladeinfrastruktur basieren auf dem Portfolio von Siemens. Für Depotladeinfrastruktur wird eine Ladeleistung von 150kW angenommen, sowie eine 1:1 Beziehung zwischen Fahrzeugen und Ladesäulen. Für die Pantographenladestationen der gelegentlichladenden Busse wurden Ladeleistungen von 300kW und 450kW angenommen.

Informationen zur Batterielebensdauer sind (J. Link, 2010) entnommen.

Der Day-Ahead-Spotmarktpreis und die Strommix-Produktion für Deutschland im Jahr 2016 wurden wie Abb.: Energiemix im Netz beispielhaft zeigt aus den Energiecharts (ISE, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme n.d.) und der ENTSO-E-Transparenzplattform entnommen.

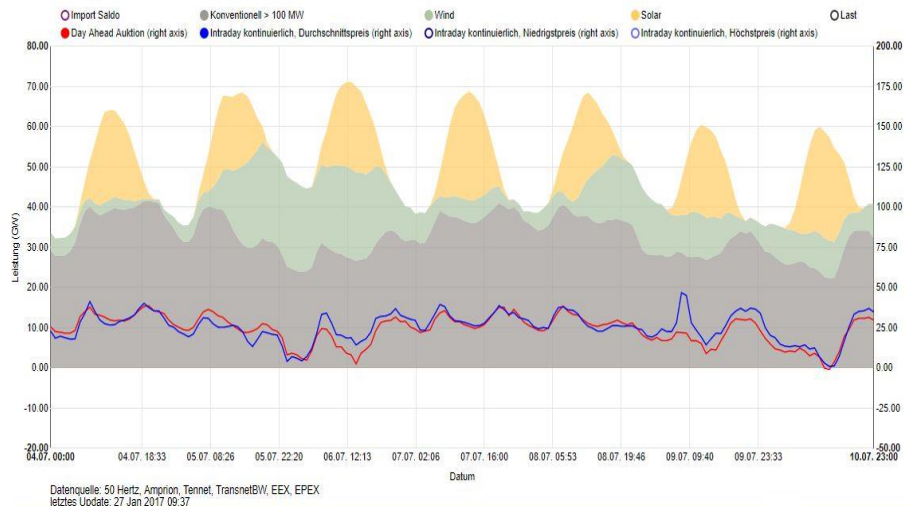


Abb.2: Energiemix im Netz

Simulation

Fahrzeugfahrprofilsimulation

Da viele der Fahrprofile der Busse nicht rein mit Depotladern zu bedienen sind, ist die Flotte in zwei Kategorien aufgeteilt. Busse mit Umläufen, die mit reinen Depotladern abgefahren werden können und Busse mit Umläufen, die von gelegentlichladenden Bussen bedient werden müssen.

Verbrauch und Alterung

Den Bussen werden temperaturabhängig Energieverbräuche und umlaufabhängig Ladezustände bei Ankunft im Depot zugeordnet. Bilanziert wird nur die im Depot benötigte Energie, da auf der Strecke bei der Gelegenheitsladung praktisch keine Flexibilität für die Ladezeitverschiebung verfügbar ist. Aufgrund der Nebenbedingungen für beide Buskategorien kann das Simulationsmodell nur 144 Busse aus der Liste von 195 Bussen unterstützen. Die restlichen Busse werden für die weitere Betrachtung ignoriert. Basierend auf der durchschnittlichen Entladetiefe der Batterien bei Ankunft im Depot und der prognostizierten Zykluszahl über 12 Jahre, wird der Bedarf an Batterien berechnet. Die Funktion wird auch in den Optimierer für die Ermittlung von Kosten durch zusätzliche Zyklen beim bidirektionalen Laden weitergegeben.

Strommixsimulation

Mit den Daten zur Stromerzeugung werden Profile für die Zusammensetzung des Strommix im Viertelstundentakt erzeugt, die mit CO2e-Emissionsfaktoren für die verschiedenen Quellen

des Energiemix in Deutschland ergänzt werden. Daraus ergeben sich stundenweise CO₂-Äquivalent-Emissionen pro kWh.

LCA- und Kostenmodell

Lebenszyklusanalyse/LCA-Modell

Vorab ein paar Worte zur Lebenszyklusanalyse: LCA bedeutet die Zusammenstellung und Bewertung von Inputs, Outputs und den Umweltauswirkungen eines Produktsystems während seines gesamten Lebenszyklus. Die Umweltbewertung kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden, abhängig vom angestrebten Ziel und dem erforderlichen Detaillierungsgrad.

Die Ökobilanz ist der systematische "von der Wiege bis zur Bahre"-Ansatz. Der Ansatz wurde zur Berechnung der ökologischen Auswirkungen von Batterien und Ladegeräten verwendet. Der Zweck der **LCA** ist die **Bewertung der Umweltaspekte in allen Phasen der Produkt- oder Prozessaktivität**. Die Ökobilanz schätzt die sich daraus ergebenden verbundenen kumulativen Umweltauswirkungen, und damit können mögliche Umweltauswirkungen und -vorteile nur ermittelt werden, wenn die Ökobilanz Schritt für Schritt durchgeführt wird. **Die Ökobilanz ist auch die Grundlage für eine große Bandbreite an Indikatoren zur Bewertung von Umweltauswirkungen**. Beispiele sind der CO₂-Fußabdruck, abiotische Ressourcenverbräuche, bis hin zum Wasser-Fußabdruck.

Die Ökobilanz ist gemäß den ISO-Normen 14040 und 14044 durchgeführt.

Die Bewertung ist **nur für Komponenten** durchgeführt, die sich in irgendeiner Weise **zwischen den drei verschiedenen Ladestrategien unterscheiden**. Alle Systemkomponenten, die in allen drei Szenarien in gleichem Umfang benötigt werden, wurden ausgeschnitten. Die Systemsymmetrie ist somit gewahrt, der Bilanzierungsaufwand aber reduziert. Beispielsweise bedingen bidirektionale Ladestrategien verglichen mit unidirektionalen Ladestrategien aufgrund zusätzlicher Lade- und Entladezyklen eine höhere Degradation der Batteriezellen und somit zusätzliche Batterien. Um diesen Unterschied abbilden zu können, müssen Batteriezellen in einer LCA modelliert werden. Für die Ladestation selbst ist dagegen nur eine zusätzliche Steuereinheit modelliert, da die Umweltauswirkung der Hardwareanpassungen in der Leistungselektronik als nicht relevant angenommen werden. In allen Fällen ist die LCAs für Produkt-Referenzflüsse durchgeführt, die erforderlich sind, um eine quantifizierte Leistung zu erfüllen, die immer durch die Funktionale Einheit repräsentiert wird. Bilanziert sind die eBus-Batterien, die genannten Ladeinfrastrukturkomponenten und der Energiemix. Verwendet sind die GABI-Datenbank und Ecoinvent.

Die LCA-Modelle bezüglich der Herstellung von Positive- und Negativelektroden, der Herstellung von LiFePO₄, der Herstellung von Elektrolyt für Lithium-Ionen-Batterien und des BMS (Batterie-Management-System) sind der (Guillaume MajeauBettez* n.d.) Literatur entnommen, um die CO₂e-Emissionen von der Batterieherstellung bis zur Nutzungsphase zu berechnen (Cradle-to-Gate-Ansatz). Die mit den Batteriezellen verbundenen Transportemissionen (Seemeilen) wurden mit Hilfe des (Searates 2018) berechnet.

Mit den Daten zur Stromerzeugung wurden die CO₂-Emissionen für die verschiedenen Energieträger des Energiemix in Deutschland mit den verfügbaren Informationen aus der Ecoinvent 3.3 (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich) und Lausanne (EPF Lausanne) 2016)-Datenbank berechnet, wie in Abb.: Energiemix im Netz dargestellt. Diese Daten von Ecoinvent 3.3 beinhalten auch Übertragungsverluste. Die ermittelten CO₂-

Äquivalenten-Emissionen für die Funktionseinheit kWh werden anschließend zugeordnet und auf ihren relevanten Strommix ab 2016 hochskaliert. Die resultierenden CO₂-Äquivalent-Emissionsdaten für ein ganzes Jahr wurden verwendet, um die THG-optimierten intelligenten Lade- und bidirektionalen Ladeszenarien für elektrifizierte Busflotten am Betriebshof zu ermitteln.

Kostenmodell

Der Kostentarif für den Netz- und Spannungsanschluss wird nach zwei verschiedenen Kostentarifplänen berechnet, die auf der Gesamtzahl der Netznutzungsstunden pro Jahr basieren. Diese Kosten werden ebenfalls zu den Gesamtenergiekosten addiert. Bei Überschreitung des Spitzengrenzwertes, der auch als maximal verfügbare Stromkapazität für das Depot bekannt ist, würde der Verteilnetzbetreiber eine zusätzliche Gebühr für die Überschreitung (Stromnetz Berlin 2018) gemäß ihres Jahrestarifs erheben. Diese Option steht auch im Modell zur Verfügung, wobei verschiedene Gebührenszenarien optimiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden der Spannungsanschluss und die dem Depot zur Verfügung gestellte Stromkapazität und die damit verbundenen Kosten (Leistungspreis) ermittelt (Stromnetz Hamburg 2019).

Informationen zu den Investitionskosten sowohl für die unidirektionalen als auch für die bidirektionalen Ladegeräte stammen von Siemens.

Ladezeitoptimierung

Ein bestehendes Simulationsmodell aus dem Bereich Lastmanagement von Fertigungsprozessen (Jun Liu. Aurich. J 2017), wurde modifiziert und in dieser Arbeit verwendet. Das Modell nutzt unterschiedliche Optimierungsalgorithmen für sein DSM (Demand Side Management) in einer industriellen Umgebung. Nach Anpassung des Modells auf intelligentes Laden und Bidirektionales Laden, wurden vier Optimierungsalgorithmen getestet:

- Multisim
- Monte Carlo
- Diff-Approximation und
- Gradienten-Approximation.

Unter diesen Optimierern wurde die Gradientenapproximation nach einem kontinuierlichen Testlauf ausgewählt, da sie den besten Durchschnittswert innerhalb einer angemessenen Rechenzeit für beide Ladestrategien im Modell ermöglicht.

Die Ergebnisse aus der Fahrzeugfahrsimulation und der Verbrauchssimulation, sowie dem Batteriealterungsmodell und dem Strommixmodell werden mit samt aller Nebenbedingungen wie dem Netzanschluss usw. in den Optimierer geladen. Für den pro kWh-Preis von Batterien wurden unterschiedliche Preise ausprobiert, um zu sehen, ab wann der Optimierer wirklich rückspeist. Optimiert wird wochenweise und entweder nach Kosten (arbeitspreis und Leistungspreis) oder nach CO₂e-Emissionen (für Strom und Material wie Batterien).

Auswertung

Die Kosten und Emissionen für alle drei durchoptimierten Szenarien (Plug & Charge, intelligentes Laden und bidirektionales Laden) werden vom System mitgeschrieben und können am Ende jeder Simulation bilanziert und miteinander verglichen werden. Es wird nicht nach anderen Umweltwirkungskategorien als Treibhausgaspotential in CO₂e ausgewertet. Die Darstellung erfolgt in konventionellen Balkendiagrammen und als Eco-Care-Matrix. Die Eco-Care-

Matrix ermöglicht die Bewertung hinsichtlich ihrer **Umweltverträglichkeit** und **Wirtschaftlichkeit**. Ziel ist die Darstellung der **Umwelteffizienz**.

4. Ergebnisdarstellung

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Performanz der **Ladekonzepte intelligentes Laden und bidirektionales Laden** im Vergleich zum Baselineszenario **Plug & Charge** jeweils für ein Jahr.

Intelligentes Laden

Verglichen mit dem Plug&Charge Szenario liegen die jährlichen Kosteneinsparungen durch das preis- und treibhausgasemissionsoptimierte intelligente Laden bei 8 % und 3,7 % (Steuern und Abgaben nicht mit berücksichtigt). Die Einsparungen umfassen die Kosten des Energiepreises an der Börse und die Netzanschlussgebühr. Die ökologischen Auswirkungen bei der Ladestrategien sind sehr gering.

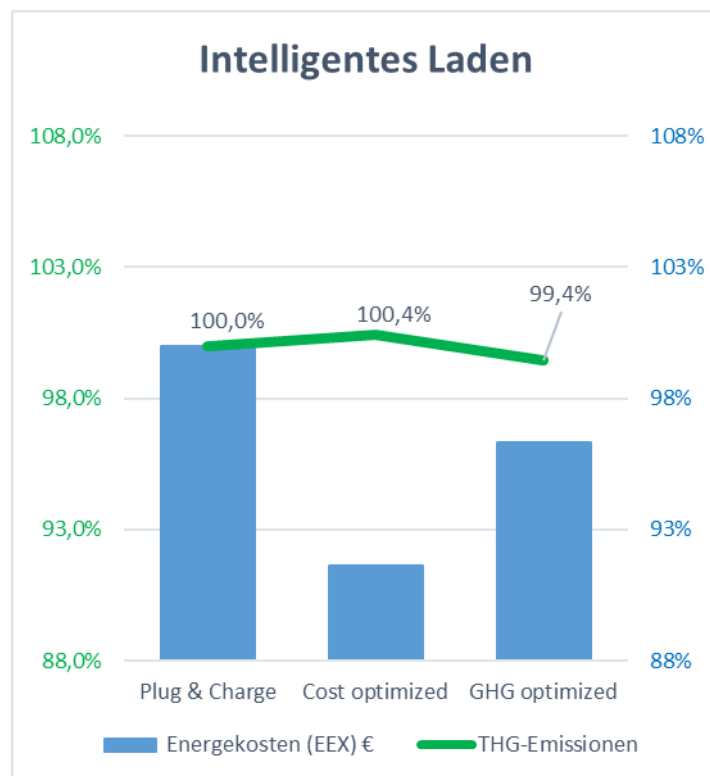


Abb.3: Vergleich: Plug&Charge / Intelligentes Ladeszenario

Bidirektionales Laden

Bidirektionales Laden setzt ab einem pro kWh-Preis der Batterien von 80€ in relevanter Größenordnung ein. Vorher reicht die Preisspreizung zwischen Einkaufspreis und Verkaufspreis nicht aus, um für die zusätzlichen Batteriekosten zu kompensieren. Diese muss um die 2 Cent/kWh ausmachen, um eine Entladung ökonomisch zu rechtfertigen (Steuern und Gebühren nicht berücksichtigt). Deshalb basieren alle folgenden Auswertungen auf diesem Batteriepreis, der aber deutlich unter den derzeitigen Systempreisen bei Busbatterien liegt. Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar (siehe Abb.4: Vergleich: Planmäßiges / bidirektionales Ladeszenario)

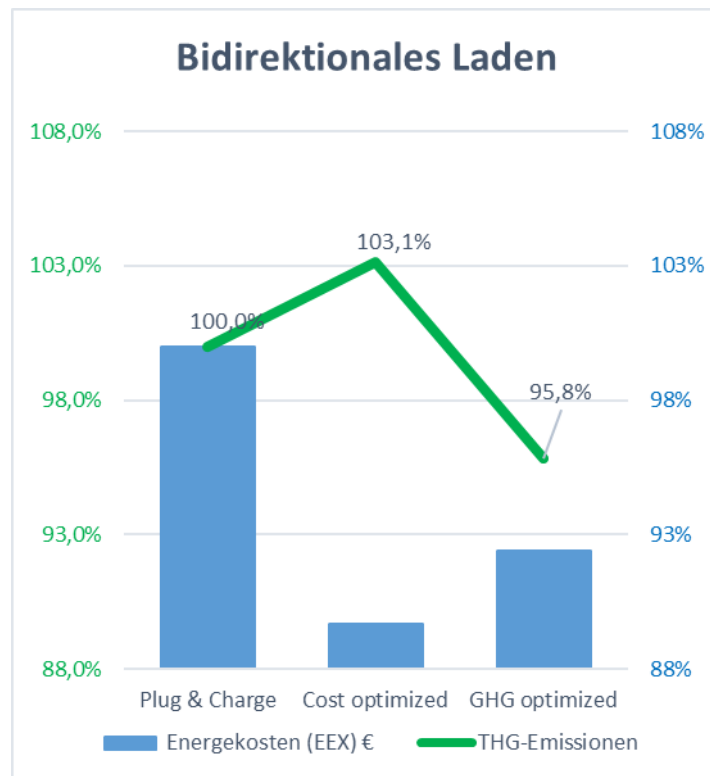


Abb.4: Vergleich: Plug&Charge / bidirektionales Ladeszenario

Bei den angenommenen Batterieparametern liegen die Kosteneinsparpotentiale bei den Energiekosten ohne Steuern und Gebühren eines intelligenten Lademanagements bei 10% (ökonomisch optimiert) bzw. bei 8% (ökologisch optimiert). Mit Blick auf die Ökologische Performance ergibt sich jedoch ein anderes Bild, wenn man ökonomisch optimiert. Das ökonomisch optimierte Lademanagementsystem erhöht die mit dem Energieeinkauf assoziierten CO₂e Emissionen sogar leicht um 3%, wohingegen die ökologische Optimierung eine CO₂e Einsparung von 4% ermöglicht.

Eco-Care-Matrix

Der Environmental Benefit (Umweltvorteil) beschreibt auf der y-Achse die Umweltauswirkungen in positiver und negativer Richtung der dargestellten Lösungen. Auf der x-Achse ist der in diesem Fall monetäre Customer Benefit und damit die „Produktivität“ der grünen Lösung dargestellt (siehe Abb.: Vergleich: Kostenoptimiertes Laden (bidirektional) / THG-optimiertes Laden (bidirektional))

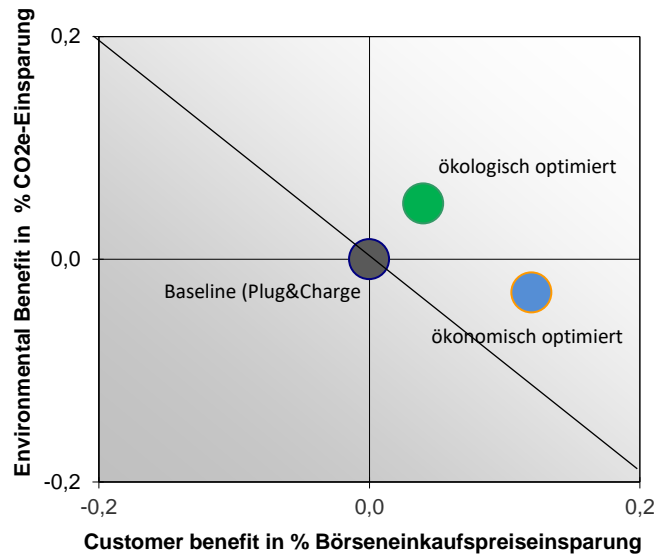


Abb.5: Vergleich: Kostenoptimiertes Laden (bidirektional) / THG-optimiertes Laden (bidirektional)

Relativ zur Baseline (Referenztechnologie Plug and Charge) werden wirtschaftlicher und ökologischer Nutzen der beiden Ladestrategien intelligentes Laden und bidirektionales Laden dargestellt. Die Matrix zeigt die Zielfunktion hinsichtlich der CO2- und Kostenreduktion an.

Es zeigt sich klar, dass die beiden Zielfunktionen sich nicht kongruent zueinander verhalten, sondern, dass hier ein Zielkonflikt entsteht. Im Szenario **Kostenoptimiertes Laden steht der Kundennutzen im Vordergrund**. Das **Szenario Kostenoptimiertes Laden** befindet sich im unteren rechten Quadranten der Matrix. Beim **THG-optimierten Szenario** ergibt sich im Vergleich zum kostenoptimierten Szenario ein **etwas geringerer Kundennutzen**, dem steht der **Umweltvorteil entgegen**. Hier ist zu sehen, dass sich dieses Szenario im oberen rechten Quadranten der Matrix befindet. Insgesamt kann gesagt werden, dass das THG-optimierte Laden einen deutliche höheren Umweltnutzen adressiert, das kostenoptimierte Laden demgegenüber den Kundennutzen in den Vordergrund stellt.

5. Interpretation

Eine **Plug&Charge** Ladestrategie führt zu vielen Ladevorgängen in den späten Abendstunden, in denen der generelle Strombedarf im Netzverhältnismäßig hoch ist, was für hohe Beschaffungskosten beim Strom sorgt. Die **zeitliche Flexibilität beim Laden kann durch intelligente Steuerung** genutzt werden, um Stromeinkaufskosten an der Börse zu reduzieren, wenn der Energieanbieter diese Schwankungen an den Flottenbetreiber weitergibt. Mit intelligentem Laden kann bereits ein großer Teil des Kosteneinsparpotentials gehoben werden. Ökologisch spielt die unidirektionale Ladestrategie in den Nachtstunden kaum eine Rolle. **Bidirektionales Laden** ermöglicht ohne rückspeisungsdiskriminierenden Marktbedingungen eine **weitere, leichte Kosteneinsparung**, in dem Strom zu Hochpreiszeiten verkauft und noch vor Abfahrt des Buses wieder zurückgekauft und geladen wird. **Ökologisch ergibt sich hier ein wesentlich stärkerer Hub als bei der unidirektionalen Optimierung**. Jedoch führt eine rein ökonomische Optimierung zu leicht erhöhten Emissionen, weil beim Entladen und Laden Verluste entstehen. Das Potential des bidirektionalen Ladens mag aber mit steigendem Anteil an Windenergie und sinkenden Batteriesystempreisen steigen.

Generell ist festzustellen, dass in einem großen Busdepot mit Depotladern eine verhältnismäßig geringe Flexibilität zur zeitlichen Lastverschiebung besteht, und dies drückt sich auch in den moderaten Einsparungen aus. Hintergrund ist, dass die Busse nicht lange am Stück im Depot sind und meist früh am Morgen wieder verfügbar sein müssen. Die Zeiten, in denen sie länger am Stück im Depot sind, sind wiederum überwiegend nachts, wenn die schnell fluktuierende Erzeugung aus Photovoltaik nicht einspeist. Für die auch nachts einspeisende Windkraft sind die in der Regel wenige Stunden zu verschiebenden Lade- und Entladezeiten zu kurz für einen wirklichen Hub. Das gilt ökonomisch wie ökologisch in gleicher Größenordnung, da die nicht flexiblen ökonomischen Preisanteile wie Steuern und Gebühren hier nicht mit betrachtet wurden.

Der Anstieg der Gesamtemissionen bei ökonomischer Optimierung des bidirektional befähigten Systems lässt darauf schließen, dass eine Fehl-Incentivierung im Markt für solche Anwendungen mit nur nächtlichen Verschiebepotential vorliegt.

6. Fazit

Intelligentes Laden zur Optimierung der Stromeinkaufspreise ist schon heute für Busdepots möglich und **kann Kosten sparen**, wenn der Stromanbieter die fluktuierenden Einkaufspreise an der Börse 1:1 an den Kunden weitergibt. Die **Infrastruktur** dafür muss in den meisten Depots auch ohne eine solche Optimierung geschaffen werden, um **peak shaving** zu ermöglichen und mit begrenzten Netzanschlüssen auszukommen. **Bidirektionales Laden** wird erst nach Anpassung der Besteuerung attraktiv. Die derzeitige Anlage auf dem EUREF-Campus läuft sozusagen regulatorisch als PV-Anlage, was jeden Business Case unmöglich macht. Ab einem Speicherpreis von ca. 80€/kWh Speicherkapazität wird bidirektionales Laden für Depots interessant. In Zukunft zu erwartende sinkenden Batteriepreisen, steigende Zyklenfestigkeit der Batterien und steigenden Anteilen erneuerbarer Energie im Netz verbessern diesen Business Case täglich. Hier sind weitere Studien nötig, um den Business Case für Zukunftsszenarien zu validieren. Um zu verhindern, dass der Betrieb von bidirektionalen Ladestationen nachts zu erhöhten Treibhausgasemissionen führen, müssen die **Marktmechanismen angepasst** werden. Eine Option ist z.B. die Erhöhung der Kosten für Zertifikate im ETS, die zu einer Synchronisation der **Optimierung nach ökonomischer und ökologischer Zielfunktion** führen würde.

7. Quellen

- Bloomberg New Energy Finance . „Bloomberg New Energy Finance (BNEF) Electric Buses report.“ 2018.
- Fournier, G., Baumann, M., Buchgeister, J., Weil, M. & Seign, R. „Elektrofahrzeuge als virtuelle speicher zu Kompensierung der Voltaler erneuerbare energien in Deutschland- Eines neues Geschäftsmodell?“ In *Schritte in die zuünftige Mobilität*, von H., Pascha, W., Schönhartig, V., Proff, 253-272. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
- Guillaume MajeauBettez*, Troy R. Hawkins and Anders Hammer Strømman. „Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. Supporting Information.“ kein Datum.
- International Energy Agency's (IEA). „International Energy Agency's (IEA)- Global Electric Vehicle Report.“ Annual report, 2017.
- J. Link, M. Buettner, D. Dallinger, J. Richter. „Optimization Algorithms for the Charge Dispatch of Plug in Vehicles based on variable Tariff.“ *Sustainability and Innovation No.3*. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), 2010.
- Pihaltie, M., Kukkonen, S., Halmeaho, T., Karvonen, V., Nylund, N-O., „fully electric buses- The viable option.“ *IEEE International Electric vehicle conference* . Florence, Italy, 2014.
- Ramesh Shunmugasundaram., Marie Francine Lagadec., Nishan Degnarain., Vanessa Wood. *World Economic Forum*. September 2017 .
<https://www.weforum.org/agenda/2017/09/lithium-ion-batteries-ethics-global-battery-alliance/>.
- Standardization., International Organization for. „ISO (2006a): ISO 14040: Environmental management—life cycle assessment—principles and framework.“ Geneva, Switzerland., kein Datum.