

UMWELTAUSWIRKUNGEN VON GLEICHSTROMBASIERTEN LADEINFRASTRUKTURSISTEMEN

Christina Kockel^{1*}, Benedict J. Mortimer², Rik W. De Doncker², Aaron Praktiknjo¹

¹ Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), Tel.: +49 241 80 49870, Fax: +49 241 80 649870, christina.kockel@eonec.rwth-aachen.de, apraktknjo@eonec.rwth-aachen.de

² Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS), Tel.: +49 241 80 49660, Fax: +49 241 80 49669, post_pgs@eonec.rwth-aachen.de, post_erc@eonec.rwth-aachen.de

^{1,2} RWTH Aachen University, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, <https://www.eonec.rwth-aachen.de/>

Kurzfassung: Der Ausbau der Elektromobilität in Deutschland gewinnt aktuell rasant an Fahrt. Neben der steigenden Verfügbarkeit batterieelektrischer PKW beschleunigt die Politik diesen Ausbau nicht nur durch Subventionierung der Fahrzeuge, sondern auch der notwendigen Ladeinfrastruktur. Letztere kann durch den verstärkten Einsatz von offboard Ladeelektronik basierend auf Gleichstromtechnologie einen zusätzlich positiven Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck zukünftiger Ladeinfrastruktur haben. Neben der technischen Ausgestaltung der Ladesysteme spielt, unter Berücksichtigung des zukünftigen deutschen Energiemix, auch die zeitliche Nutzung der Ladesysteme eine große Rolle, um Treibhausgasemission einzusparen.

Keywords: Ladeinfrastruktur, Ökobilanz, DC-Technologie

1 Einführung

Der Wandel zu einem treibhausgasneutralem Energiesystem und die gleichzeitige Nutzung dieses Potential zur Dekarbonisierung anderer Sektoren stellt das elektrische Netz vor neue Herausforderungen. Der Abbau von zentralen, fossil betriebenen und frequenzstabilisierenden Kraftwerken und der starke Ausbau von erneuerbaren Erzeugungsanlagen, die direkt in das Nieder- und Mittelspannungsnetz speisen, kann zu Spannungsabweichungen und -instabilitäten führen (Kumar et al., 2017). Elektromobilität bietet als Sektorenkopplungstechnologien die Chance einen wichtigen Baustein zur Senkung der Treibhausgasemissionen beizutragen. Im deutschen Koalitionsvertrag 2021 wird die Zulassung von mindestens 15 Millionen vollelektrischen Personenkraftwagen (PKW) und die Schaffung von einer Million öffentlich zugänglichen Ladepunkte in Deutschland bis zum Jahr 2030 zum Ziel gesetzt (SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und FDP, 2021). Bei aktuell nur ca. einer guten halben Million zugelassener vollelektrischer PKW (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2021) sowie 55.000 öffentlicher Ladesäulen (Bundesnetzagentur, 2022a) ist dies ein ambitioniertes Ziel.

Eine großflächige Integration von Ladeinfrastruktur kann zu weiteren Belastungen für bestehende Netze führen. Da sowohl die im Fahrzeug zu ladenden Batterien als auch mögliche direkte Einspeisungen von Photovoltaikanlagen und stationären Batteriespeichern gleichstrombasiert funktionieren, ist eine vielversprechende Möglichkeit das Verteilnetz mit Gleichstrom (DC) anstelle von Wechselstrom (AC) zu betreiben. Da insbesondere im Vergleich zu konventionellem *onboard* Laden die Ladegeräte in den Ladestation anstatt in den Fahrzeuge verbaut sind, kann eine gleichstrombasierte Ladeinfrastruktur folgende Vorteile

bieten: (1) Wegfall von Lade-Komponenten in jedem Fahrzeug, (2) weniger Kabelmaterial durch gleichstrombasierter Verteilung und höher realisierbarer Spannungen, (3) Wegfall einer Wandlerstufe entweder an der Ladestation oder im Fahrzeug, (4) damit insgesamt verringerte Verluste und (5) eine vereinfachte Systemregelung. Damit ist das gleichstrombasierte Verteilnetz nicht nur technisch der wechselstrombasierten Variante überlegen, sondern birgt auch das Potential für ökologische und ökonomische Vorteile. Allerdings fällt eine weitere Umwandlungskomponente am Netzanschlusspunkt an.

Unsere Studie zielt daher darauf die Umweltauswirkungen von gleichstrombasierten Ladeinfrastruktursysteme aus systemischer Perspektive zu analysieren und die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- 1) Welche Umweltauswirkungen haben gleichstrombasierte Ladeinfrastruktursysteme im Vergleich zu wechselstrombasierten?
- 2) Was sind die Haupttreiber für die Umweltauswirkungen?
- 3) Welche Auswirkungen haben verschiedene Ladestrategien und Einsatzorte?
- 4) Wie können die Ergebnisse in die Ausgestaltung von zukünftigen Ladeinfrastrukturen einfließen?

Für die Beantwortung dieser Fragen beschreiben wir zunächst den aktuellen Stand der Technik von AC- und DC-Ladeinfrastruktursystemen in Abschnitt 2. Unser methodisches Vorgehen zur Analyse der Umweltauswirkungen stellen wir in Abschnitt 3 vor. Die Ergebnisse der Analyse präsentieren und diskutieren wir in Abschnitt 4, bevor wir in Abschnitt 5 die Studie zusammenfassen und einen Ausblick für zukünftige Arbeiten geben.

2 Stand der Technik

Derzeit gibt es zwei vorherrschende konduktive Ladelösungen für batterieelektrische Fahrzeuge. Beim so genannten onboard Laden, entsprechend des Typ 2 Ladesteckers, wird das Elektrofahrzeug entweder einphasig oder dreiphasig mit der Ladestation verbunden, die an ein Niederspannungsnetz angeschlossen ist. Die Ladeelektronik zum Gleichrichten und Anpassen der Spannung ist dabei im Fahrzeug verbaut. Aufgrund von Volumen-, Gewichts- und thermischen Limitierung ist diese Ladeleistung begrenzt. Die Ladeleistungen bei herkömmlichen Elektrofahrzeugen bewegt sich in einem Bereich von 3,6 kW (einphasig) bis zu 22 kW (dreiphasig). In Anbetracht der hohen Standzeiten (Nobis and Kuhnimhof, 2018) erscheinen höhere onboard Ladeleistungen ökonomisch nicht sinnvoll.

Die zweite Ladeoption stellt das off-board Laden (auch DC-Laden oder Schnellladen) dar. Hier befindet sich die Leistungselektronik zum Gleichrichten und Anpassen der Spannung für die Batterieladung außerhalb des Fahrzeuges in den Ladestationen. Aufgrund der deutlich geringeren Anforderungen an die gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte, lassen sich deutlich höhere Ladeleistungen realisieren die aktuell lediglich durch die Laderaten der Fahrzeugbatterien limitiert ist. Derzeit findet man in Deutschland DC-Ladestationen ab einer Leistung von 50-150 kW im urbanen Bereich und bis zu 350 kW entlang von zentralen Verkehrsachsen.

Laut den Zahlen des Ladesäulenregisters der Bundesnetzagentur (2022a) gibt es aktuell ca. 55.000 öffentliche Ladepunkte. In Abbildung 1 sind diese anhand der verfügbaren

Ladeleistung und Ladetechnologie aufgeschlüsselt. Die derzeit größte Menge stellen die AC-Ladepunkte mit einer Gesamtzahl von ca. 50.000 Ladepunkten dar.

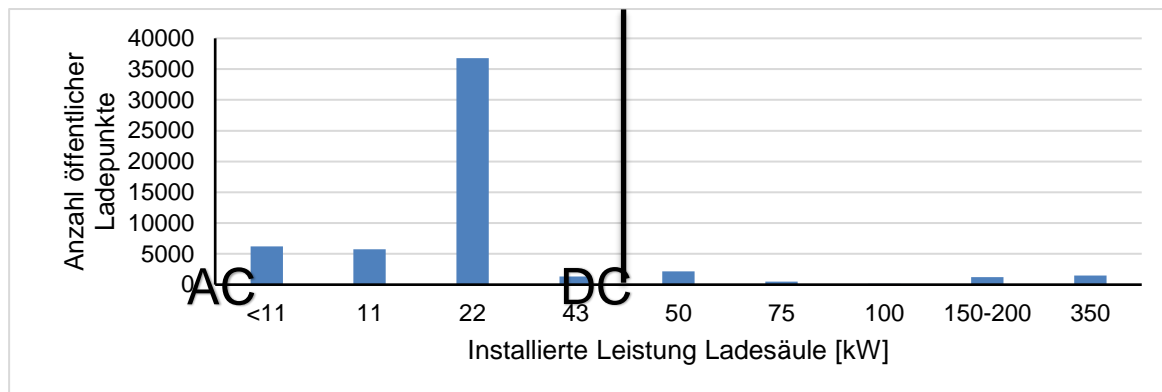


Abbildung 1: Überblick über Anzahl der öffentlichen Ladepunkte und ihrer installierten Leistung.

Grundsätzlich ist für das Laden einer Batterie aus dem Wechselstromnetz zunächst eine Gleichrichtung, eine galvanische Trennung und eine Anpassung der Gleichspannung auf das Batterieniveau notwendig.

Beim onboard Laden werden unidirektionale Gleichrichter mit Leistungsfaktorkorrektur eingesetzt. Die galvanische Trennung sowie die Anpassung der Gleichspannung wird durch einen isolierten DC-DC Wandler realisiert, welcher uni-direktional ausgeführt ist wie in Abbildung 2 dargestellt. (Yilmaz and Krein, 2013)

Beim off-board Laden wurden in der Vergangenheit ähnliche in der Leistung skalierte Topologien eingesetzt. Zukünftig müssen Ladestationen jedoch auch Blindleistung bereitstellen können, was mit einem unidirektionalen Gleichrichter nicht möglich ist. Daher werden zunehmend bidirektionale Topologien wie die B6C-Brücke eingesetzt. Je nach Philosophie werden für die Gleichspannungswandlung isolierte Resonanzwandler in modularer Verschaltung oder isolierte Gegentaktflusswandler eingesetzt, um die galvanische Trennung des Fahrzeuges gegenüber dem Netz zu realisieren.

Wie in Abbildung 2 gezeigt, können off-board Ladeparks entweder mit einer gemeinsamen Wechselstromverteilung (AC-Bus) (oben) oder einem Gleichstromverteilernetz (DC-Bus) (unten) (Benedict Mortimer et al., 2019) aufgebaut werden. Während beim gemeinsamen AC-Bus pro Ladestation ein Netzfilter sowie Gleichrichter vorhanden ist, kann bei einem gemeinsamen DC-Bus diese Wandlungsstufe zentral ausgeführt werden.

Bei der Variante mit einem gemeinsamen DC-Bus ergeben sich eine Reihe von systemischen Vorteilen. Zum einen reduziert sich die Komplexität der einzelnen Ladestationen aufgrund des Wegfalls der Gleichrichterstufe was zu einer erhöhten Effizienz, geringeren Verlusten sowie einer erhöhten Zuverlässigkeit führt. Zum anderen ist die Einbindung in ein Gleichstromnetz deutlich einfacher zu realisieren als die Netzkopplung eines Wechselrichters an ein Wechselstromnetz. Zusätzliche Regelungsschleifen und die damit einhergehenden Stabilitätsrisiken fallen vollständig weg. Zum anderen lassen sich gleichstrombasierte Erzeuger, wie Photovoltaik oder Batteriespeicher einfach integrieren.

Neben den Ladestationen ergibt sich zudem ein systemischer Vorteil, dass weniger Kabel eingesetzt werden müssen. Im Vergleich zu einem dreiphasigen AC-System lässt sich unter der Annahme äquivalenter Isolation bei einem DC-System die gleiche Leistung übertragen.

Fügt man der Betrachtung die Tatsache hinzu, dass sich die DC-Spannung in einem Verteilsystem noch einmal deutlich anheben lässt, können bei identischem Kabelquerschnitt deutlich höhere Leistungen übertragen werden oder deutliche Materialersparnisse realisiert werden.

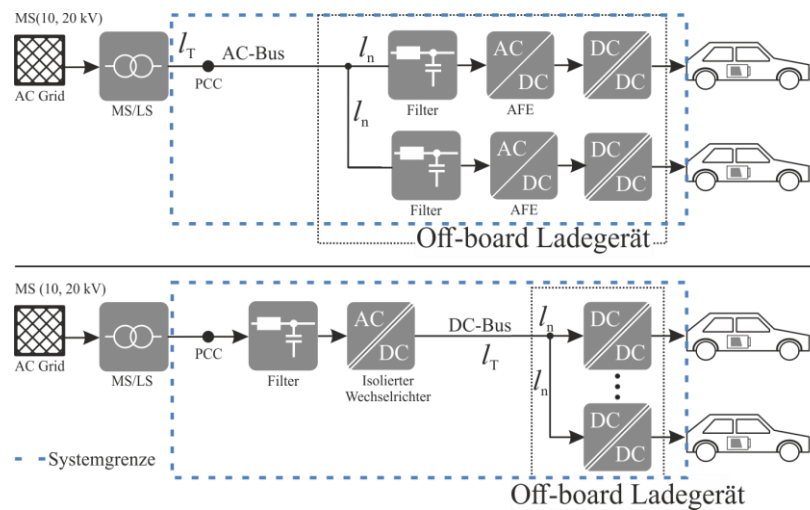


Abbildung 2: Oben) Komponenten des Off-board Ladesystems mit gemeinsamen Wechselstromkreis, Unten) Komponenten des Off-board Ladesystems mit gemeinsamen Gleichstromkreis.

Bisher wurden Off-board-Ladegeräte hauptsächlich für das Schnellladen (> 50 kW) von Elektrofahrzeugen eingesetzt. Aufgrund der oftmals limitierten onboard Ladegeräte gibt es bereits Off-board Ladegeräte (DC-Wallbox) im Leistungssegment von 25 kW.

Aufgrund der bereits genannten systemischen Vorteile soll im Folgenden das DC-basierte System (DC) (Abbildung 2, oben) mit der konventionellen onboard Ladelösung (Abbildung 3) verglichen werden. Es wird eine Ladeleistung von 22 kW angenommen.

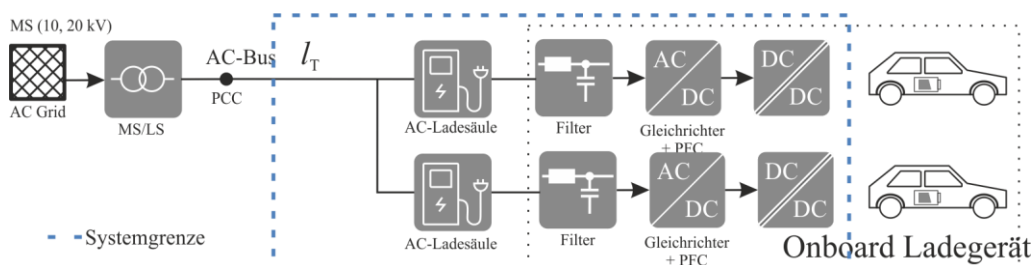


Abbildung 3: Komponenten des onboard Ladesystems.

3 Methodik

Die Analyse der Umweltauswirkungen der beiden Topologien erfolgt im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanz (Englisch: *life cycle assessment*, LCA) gemäß DIN EN 14040 (DIN, 2006). Dabei liegt der Fokus unserer Untersuchungen auf der Produktionsphase und Ausschnitten der Nutzung. Es werden damit nicht die Emissionen des kompletten Lebenszyklus auf eine funktionelle Einheit berechnet. Für das methodische Vorgehen wird zunächst in Abschnitt 3.1 der Systemrahmen und das Ziel der Ökobilanz festgelegt, dann erfolgt in Abschnitt 3.2 die Sachbilanzaufstellung für die Produktion der Komponenten sowie in 3.3 die Beschreibung der Analysen für die Nutzungsphase.

3.1 Festlegung von Systemrahmen und Ziel

Die Systemgrenze unserer vergleichenden Ökobilanz werden in den Abbildung 2 sowie Abbildung 3 dargestellt. Dabei werden jeweils die Komponenten betrachtet, die sich für die beiden Systeme unterscheiden. Dazu zählen insbesondere verschiedene Umrichter, deren Gehäuse sowie unterschiedliche Kabel. Netzseitig liegt die Grenze beim Netzanschluss an das Mittelspannungsnetz und fahrzeugseitig am Anschluss der Batterie. Die genaue Auflistung der Komponenten erfolgt in Abschnitt 3.2. Des Weiteren werden in der Nutzungsphase die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Systeme und daher der stündlich aufgelöste Strommix betrachtet.

Für den systemische Vergleich von onboard- (AC-System) versus off-board Laden (DC-System), wird ein Szenario basierend auf dem deutschen Koalitionsvertrag betrachtet. Um die Ziele des Koalitionsvertrages zu erreichen, müssen dafür mindestens – mit Berücksichtigung des Bestandes heute – noch ca. 945.000 Ladestationen und ca. 14.483.000 Elektrofahrzeuge gebaut werden.

Für die Durchführung der Ökobilanz wurde die Datenbank ecoinvent (Wernet et al., 2016) sowie das Programm OpenLCA (Open LCA, 2018) genutzt. Als Wirkungsabschätzungsmethode wird ReCiPe 2016 Midpoint (H) gewählt (Huijbregts et al., 2017), wobei der Fokus unserer Analysen auf der der Wirkungskategorie *Global Warming* liegt – im Folgenden als Treibhausgasemissionen in kg CO₂-eq verwendet.

3.2 Produktion der Komponenten

Für die Produktionsphase werden alle Komponenten, die sich für die beiden Topologien unterscheiden, modelliert. Für die Systembetrachtung ist dabei auch ihr Einsatzort entscheidend. So befinden sich die onboard Ladegeräte im Fahrzeug, während die Ladesäulen, off-board Ladegeräte und entsprechenden Verteilkabel pro Ladestation errichtet sind. Zudem wird für Ladeparks, die aus mehreren Ladestationen bestehen, noch die Verteilkabel sowie im DC-System ein isolierter netzseitiger Wechselrichter, der das Verteilnetz speist, betrachtet.

Tabelle 1: Betrachtete Komponenten in der Produktionsphase für die Systeme.

Komponente	System	Einsatzort	Quelle
<i>Gehäuse Ladestation</i>	AC, DC	Ladestation	Kabus et al., (2020)
<i>Onboard Ladegerät 22 kW</i>	AC	Fahrzeug	Kabus et al., (2020)
<i>Onboard Ladegerät 7,4 kW</i>	DC	Fahrzeug	Kabus et al., (2020)
<i>Isolierter netzseitiger Wechselrichter</i>	DC	Ladestelle	Kockel et al., (2022); Nordelöf, (2018); Nordelöf et al., (2019)
<i>Off-board Ladegerät 22 kW</i>	DC	Ladestation	Kabus et al., (2020)
<i>Verteilkabel</i>	AC, DC	Ladestelle, Ladestation	Ecoinvent v.3.7.1 (Wernet et al., 2016)

Somit sind die zu modellierenden Komponenten für das DC-System (1) ein isolierter netzseitiger Wechselrichter bestehend aus einem Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis als AC/DC-Umrichter und einer dreiphasigen Dual-Active-Bridge als DC/DC-Wandler jeweils mit einem DC-Link Kondensator am Eingang und Ausgang,

(2) Verteilkabel wie in Tabelle 2 angegeben, (3) eine Ladesäule mit einem 22 kW DC/DC-Umrichter und Gehäuse sowie (4) ein Onboard Ladegerät mit 3,7 kW für die Möglichkeit des Heimladens in jedem Fahrzeug. Analog sind die Komponenten für das AC-System (1) Verteilkabel wie in Tabelle 3 angegeben, (2) eine Ladesäule mit Schutztechnik und (3) ein onboard Ladegerät mit 22 kW. Die untersuchten Komponenten, ihr Einsatz in den beiden Systemen und die Quellen der Sachbilanz sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 4: Länge, Wirkungsgrad und Kupfermenge für betrachtete Kabelstrecken der beiden Systeme.

Kabelstrecke	AC			DC	
	Länge [m]	Wirkungsgrad	Kupfer [kg]	Wirkungsgrad	Kupfer [kg]
Netzanschluss - Unterverteilung (t_r)	100	98 %	293,42	99 %	254,86
Unterverteilung - Ladestation (je Ladestation) (t_n)	4	98 %	0,05	100 %	1,12

3.3 Nutzung

Für die Nutzungsphase von Ladeinfrastruktursystemen ist der Strom, der zur Ladung gebraucht wird, zu bilanzieren. Die Berechnung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Wirkungsgrade wird in Abschnitt 3.3.1 erklärt. Welche verschiedenen Nutzungsarten für Ladeinfrastruktursysteme wir in der Analyse betrachten, wird in Abschnitt 3.3.2 dargestellt. Gemäß unserer Systemgrenzen kommt der Ladestrom aus dem deutschen Stromnetz und repräsentiert daher den deutschen Strommix. Insbesondere mit einem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien, die volatil ins Netz einspeisen, macht der Zeitpunkt der Ladung einen größer werdenden Unterschied. Daher wird die stündliche Ladennutzung in Abhängigkeit der Zusammensetzung des deutschen Strommix für das vergangene Jahr 2021 und in einer Szenarioanalyse für das Jahr 2030 untersucht. Die Grundlage der Bilanzierung wird in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

Tabelle 5: Verwendete Wirkungsgrade für die betrachteten Umrichter je System.

Umrichter		AC	DC
		Wirkungsgrad	Wirkungsgrad
Isolierter netzseitiger Wechselrichter	AC/DC-Wandler	-	98%
	DC/DC-Wandler	-	98%
Onboard Ladegerät 22 kW (AC/DC- und DC/DC-Wandler)	Off-board Ladegerät 22 kW (DC/DC-Wandler)	-	98%
	Onboard Ladegerät 22 kW (AC/DC- und DC/DC-Wandler)	94%	-
	Onboard Ladegerät 3,7 kW (AC/DC- und DC/DC-Wandler)	-	94%

3.3.1 Energiebedarf an Netzanschluss für beide Systeme

Der stündliche Energiebedarf am Netzanschluss einer Ladestelle ($E_{\text{Ladepark}, t}$) ist abhängig von der Ladeleistung $P_{\text{Ladestation}}$ – hier 22 kW für beide Systeme –, den Wirkungsgraden der Ladegeräte ($\eta_{\text{Ladegerät}}$), der Kabel (η_{Kabel}) sowie des netzseitigen Wechselrichters im DC-System ($\eta_{\text{Isolierter netzseitiger Wechselrichter}}$). Die Anzahl an genutzter Ladestationen ($n_{\text{genutzt}, t}$) in jeder Stunde t bestimmt den stündlichen Einsatz, wie in Formel (1) angegeben. Die Wirkungsgrade der Wechselrichter sind in Tabelle 5 und die der Kabelstrecken in Tabelle 4 zusammengefasst.

$$E_{\text{Ladepark}, t} = \frac{\left(\frac{P_{\text{Ladestation}} * 1 h}{\eta_{\text{Ladegerät}} * \eta_{\text{KabelLadestation-Unterverteilung}}} \right) * n_{\text{genutzt}, t}}{\eta_{\text{KabelUnterverteilung-Netzanschluss}} * \eta_{\text{Isolierter netzseitiger Wechselrichter}}} \quad (1)$$

3.3.2 Ladeprofile der Use Cases

An welchen Standort die öffentlichen Ladestation vermehrt installiert werden, ist momentan noch nicht geklärt. Die zukünftige Nutzung und Verteilung der Ladeleistung an verschiedenen Ladeorten ist aktuell Teil verhaltensökonomischer Forschung. Für eine erste Analyse welchen Unterschied verschiedene Nutzungszeiten machen, legen wir stündliche Auslastungen von verschiedenen Standorten zu Grunde. Dabei handelt es sich um Google Maps Daten zu spezifischen Standorten in Aachen und Umgebung. Für die Analyse werden die stündlichen Auslastungen ($p_{\text{usecase}, t}$) eines Fitnessstudios, eines Kinos, eines Supermarktes und einer Tankstelle an der Autobahn als Vergleich wie in Abbildung 4 berücksichtigt. Für die Analyse werden diese Auslastungen auf das betrachtete Kalenderjahr gemäß den Wochentagen verteilt. Dabei werden saisonale Abweichungen in dieser ersten Analyse vernachlässigt.

Für die Analysen wird zudem angenommen, dass es zehn Ladesäulen pro Ladepark $n_{\text{Ladestation/Ladepark}}$ gibt. Damit ergibt sich die stündliche Anzahl genutzter Ladestation je Stunde ($n_{\text{genutzt}, t}$) gemäß Formel (2).

$$n_{\text{genutzt}, t} = \left\lceil p_{\text{usecase}, t} * \frac{n_{\text{Ladestation}}}{\text{Ladepark}} + 0,5 \right\rceil \quad (2)$$

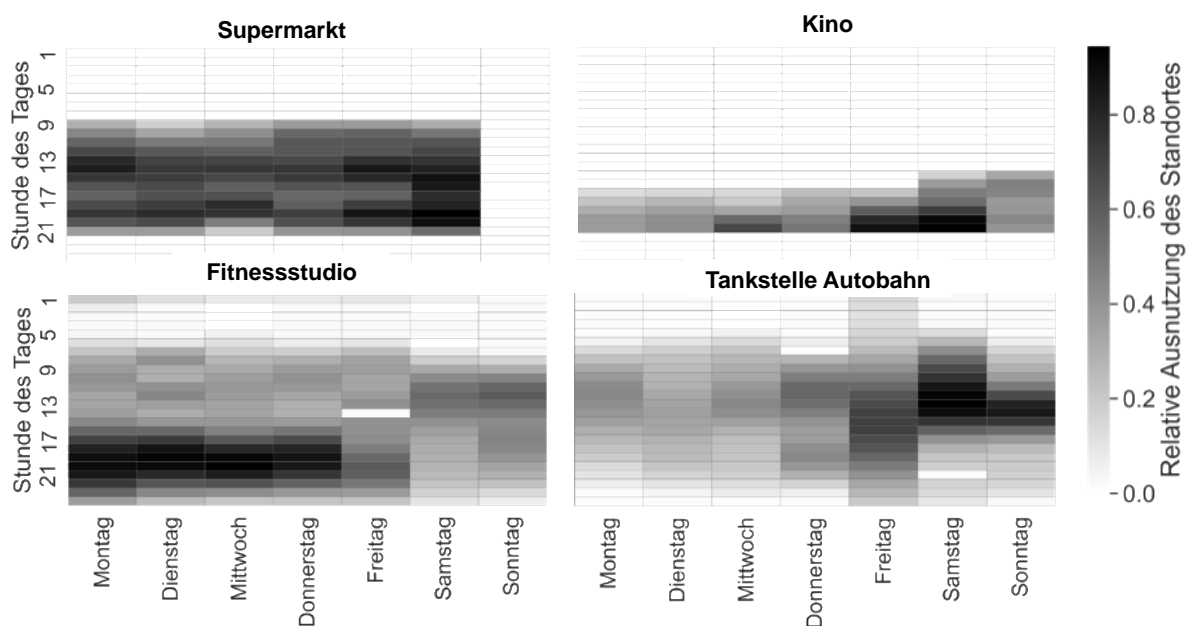


Abbildung 4: Auslastung der betrachteten Standorte in Abhängigkeit der Wochentage.

3.3.3 Strommix

Der Strommix wird über den Einsatz der Kraftwerke zu jeder Stunde und deren dazugehörigen Datensätze aus der ecoinvent Datenbank v.3.7.1 modelliert. Dabei basieren die Daten für das Jahr 2021 auf der realisierten Stromerzeugung in Deutschland veröffentlicht von der Bundesnetzagentur (2022b). Bei der Berechnung wird die Durchschnittsmethode genommen

und davon ausgegangen, dass der eingesetzte Kraftwerkspark die zusätzliche Last decken kann.

Ein möglicher Strommix für das Jahr 2030 ist mit dem JERICHO-Strommarktmodell (Priesmann et al., 2019) des Lehrstuhls für Energiesystemökonomik optimiert worden. Für die Konsistenz des Szenarios wurde der im Koalitionsvertrag festgehaltene Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 modelliert. Die installierten Kraftwerksleistungen sowie Lasten basieren daher auf dem Szenario B des Netzentwicklungsplan für das Jahr 2035, da dieser bisher noch nicht angepasst wurde (NEP, 2021). Demnach teilt sich die installierte Leistung in insgesamt 247,7 GW erneuerbarer Energien und 47,5 GW konventionelle Kraftwerke – hauptsächlich Erdgaskraftwerke – auf. Insgesamt wird eine Last von 621,5 TWh angenommen, bei der ein Markthochlauf von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen berücksichtigt ist. Es ist das Wetterjahr 2012 und das Kalenderjahr 2017 hinterlegt.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse der Umweltauswirkungen von gleichstrombasierten Ladeinfrastruktursystemen werden zuerst für die Produktionsphase in Abschnitt 4.1 und dann für die Nutzungsphase in Abschnitt 4.2 dargestellt.

4.1 Ergebnisse Produktion

Der Fokus der Produktionsphase liegt im Vergleich der beiden Systeme. Auf die detaillierte Analyse der Komponenten wird in Kabus et al. (2020) eingegangen. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung gemäß des Koalitionsvertrags mit 945.000 noch zu bauenden Ladesäulen und 14.483.000 noch zu produzierenden vollelektrischen Fahrzeugen bis zum Jahr 2030.

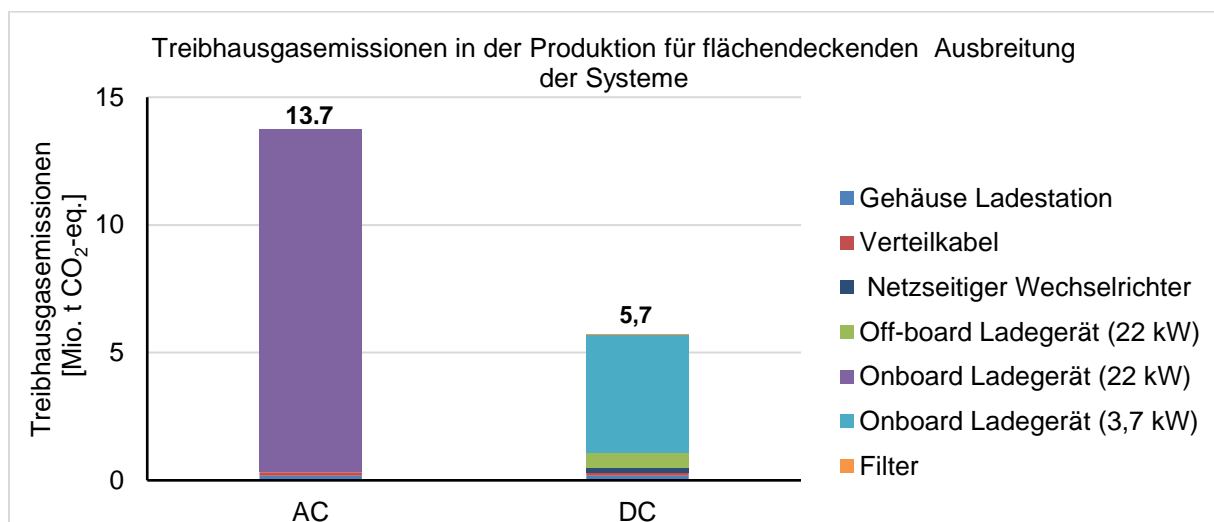


Abbildung 5 – Treibhausgasemissionen für die Produktion bei einer flächendeckenden Ausbreitung der Systeme [in Mio. t CO₂-eq.].

Wie in der Abbildung zu sehen werden durch die Produktion des AC-Systems insgesamt fast 2,4-mal so viele Treibhausgasemissionen wie beim DC-System emittiert. Dieser große Unterschied liegt insbesondere an der hohen Anzahl der Ladegeräte, die für das onboard Laden gebraucht werden. Auch im DC-System ist das onboard Ladegerät ist der Haupttreiber

für Treibhausgasemissionen. Durch die verringerte Leistung von 3,7 kW werden allerdings weniger Materialien benötigt und damit weniger Treibhausgasemissionen verursacht. Die anderen Komponenten haben vergleichsweise nur einen geringen Einfluss. Erwähnenswert ist noch, dass deutlich weniger Kupfer im DC-System eingesetzt wird (vgl. Tabelle 4). Auch wenn dies zwar keinen signifikanten Unterschied bei den Treibhausgasemissionen verursacht, wird Kupfer zu einem immer kritischerem Material (IEA, 2021) und das DC-System bietet hier Potential zu Einsparungen.

4.2 Ergebnisse Nutzungsphase

Wie in Abschnitt 3 eingeführt, ist für die Treibhausgasemissionen der Nutzungsphase insbesondere der stündliche Strommix relevant. Abbildung 6 zeigt die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen des deutschen Strommix im Jahr 2021 (links) sowie für das Szenariojahr 2030 (rechts). Wie an der rot-orangene Farbgebung zu erkennen ist, liegen die Emissionen im Jahr 2021 deutlich über denen des prognostizierten Szenariojahres 2030. Die hohen Emissionen von 2021 lassen sich durch mehrere zusammenspielende Effekte erklären. So gab es in dem Jahr durch eine ungünstige Wetterlage weniger Einspeisung durch erneuerbare Energien und durch hohe Gaspreise wurden vermehrt Kohlekraftwerke eingesetzt. Das Ergebnis des Szenariojahres 2030 hingegen ist durch deutlich mehr Einspeisung von erneuerbaren Energien geprägt. Insbesondere die Einspeisung von PV-Anlagen lässt sich tagsüber und in den Sommermonaten in der Grafik erkennen. Zudem fallen durch den Kohleausstieg die hohen durchschnittlichen Emissionen weg.

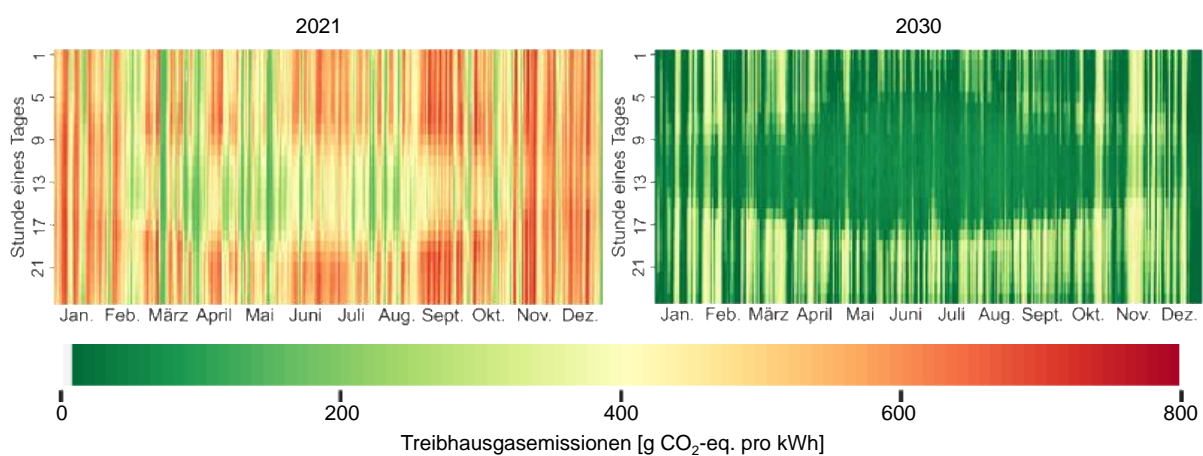


Abbildung 6: Durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für den deutschen Strommix im Jahr 2021 und im Szenariojahr 2030 in g CO₂-eq. pro kWh.

Für die vergleichende Analyse wird die Differenz zwischen AC- und DC-System betrachtet. In Abbildung 7 ist auf der linken Seite der Mehrbedarf an Strom aus dem Netz des AC-Systems im Vergleich mit dem DC-System für die gleiche Menge an Ladeenergie für die verschiedenen Standorte gezeigt. Da die unterschiedlichen Energiebedarfe der beiden Systemausführungen aus den Wirkungsgraden resultieren und diese in unserem Modell als statisch gesetzt sind, ist das Delta des Energiebedarfs proportional zu der Auslastung.

Kombiniert mit den stündlichen Treibhausgasemissionen des Strommixes ergeben sich die Grafiken in der Mitte für das Jahr 2021 und rechts für das Szenariojahr 2030. Dabei ist auffällig, dass an den gut ausgelasteten Standorten wie dem Supermarkt viel mit einem DC-System

eingespart werden kann. Zudem kann an den Standorten, die in den emissionsreicheren Abend- und Winterstunden genutzt werden, mit einem DC-System auch mehr eingespart werden. Mit mehr erneuerbaren Energien im Netz bieten sich insbesondere die Mittagsstunden in den Sommermonaten zum emissionsarmen Laden an. Gleichzeitig verringert sich natürlich das Einsparpotential des DC-Systems mit insgesamt geringeren Emissionen im Strommix.

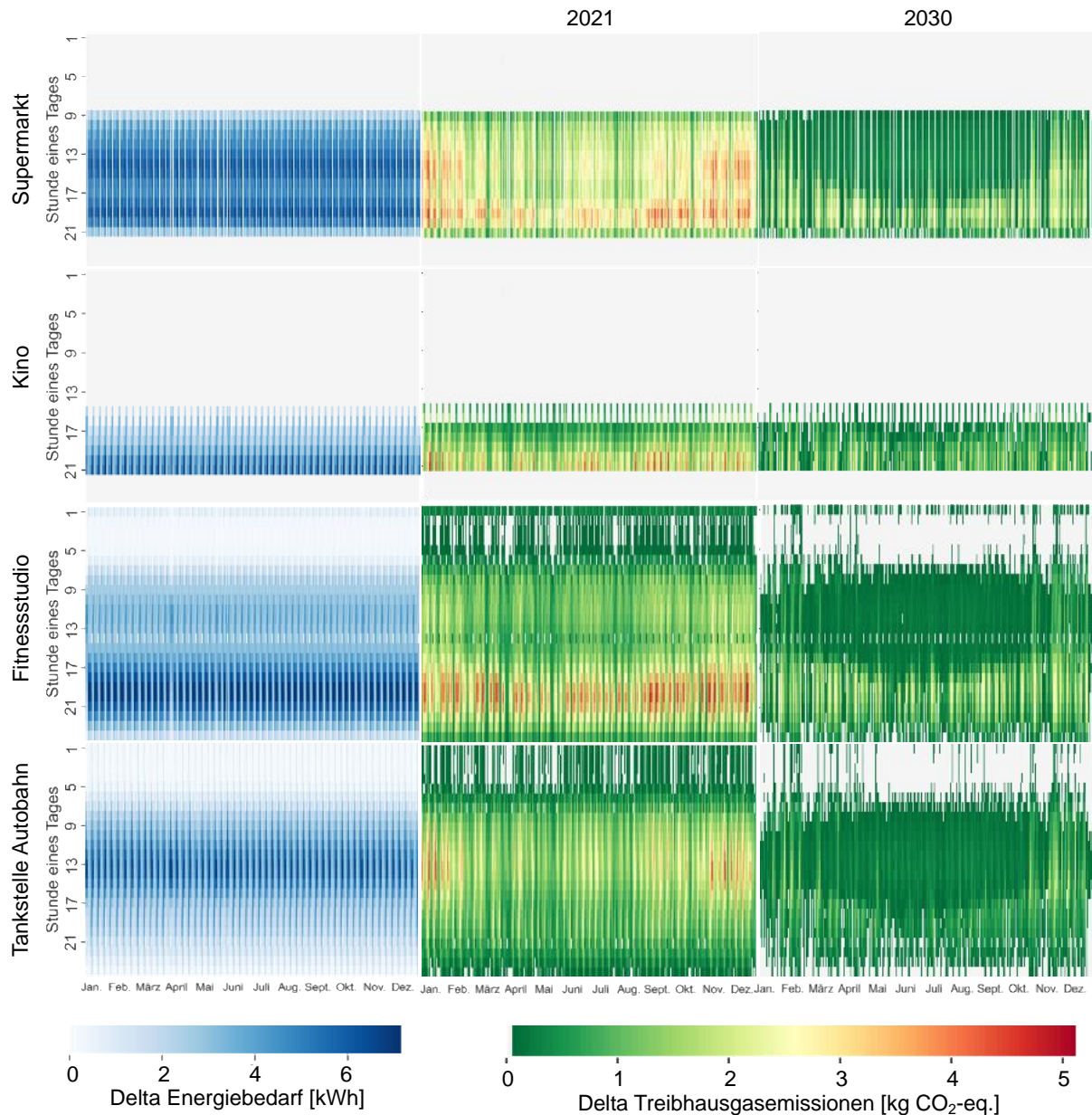


Abbildung 7: Unterschied im Energiebedarf für ein DC-System im Vergleich zu einem AC-System an den verschiedenen Standorten und resultierende potentiell einsparende Treibhausgasemissionen für die Jahre 2021 und 2030.

Abbildung 8 zeigt die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen pro geladener Kilowattstunde an den jeweiligen Standorten auf ein Jahr bezogen unabhängig von Systemausführung. Dabei ist zu erkennen, dass die Emissionen an den Standorten, an denen viel Abends geladen wird, tendenziell höher sind. Im Jahr 2030 verstärkt sich dieser Effekt, obwohl das allgemeine Niveau sinkt.

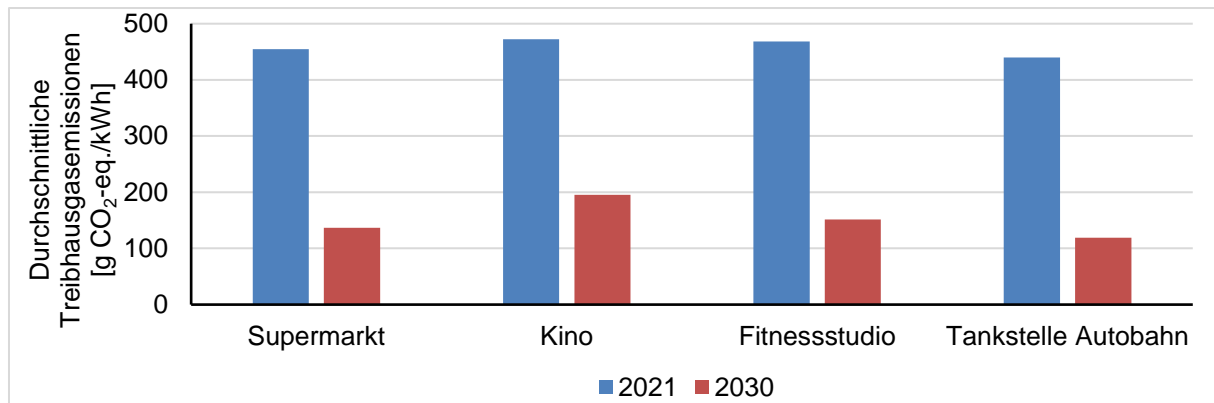


Abbildung 8: Jährliche durchschnittliche Treibhausgasemissionen an den verschiedenen Standorten für die Jahre 2021 und 2030.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurden die Umweltauswirkungen von gleichstrombasierten Ladeinfrastruktursystemen im Vergleich zu wechselstrombasierten Systemen identifiziert und analysiert. Dabei ergab sich, dass der Haupttreiber von Treibhausgasemissionen in der Produktionsphase die Komponenten sind die in den Fahrzeugen verbaut werden. Eine bessere Ausnutzung von Ladegeräten kann erreicht werden, wenn sie (teil-)öffentlich verfügbar sind. Daher ist zu empfehlen, dass bei zukünftigem Ausbau von Ladeinfrastruktur auch in dem Leistungsbereich von 22 kW vermehrt auf DC-Technologie gesetzt werden sollte und in den Fahrzeugen nur ein Ladegerät mit begrenzter Ladeleistung werden sollte.

Der Haupttreiber der Emissionen in der Nutzungsphase ist der Strommix der geladenen wird. Ladeparks an Standorten mit höheren Auslastungen während Zeiten in denen erneuerbare Energien einen großen Anteil am Strommix haben bieten damit einen Vorteil aus ökologischer Systemsicht. Diese Zeiten sind vermehrt tagsüber und in den Sommermonaten. Der Effekt wird mit einem DC-System durch eine höhere Effizienz noch verstärkt. In unserer Analyse haben die DC-Systeme in allen Fällen geringere Treibhausgasemissionen. Daher sind auch aus Nutzungsperspektive DC-Systemausführungen zu empfehlen. Zudem führen Orte mit hoher Besucherfrequenz zu höheren Auslastungen von Ladeinfrastruktursystemen, was insgesamt die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus verringert.

Aufbauend auf diesen ersten Analysen soll innerhalb des vom BMWK geförderten Forschungsprojekts IDEAL (FKZ: 01MV21008A) die Emissionen über den kompletten Lebenszyklus abgebildet werden. Dazu soll die Analyse der Nutzungsphase unter anderem um Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge und Ladeparks erweitert werden und die Entwicklung und Rückkopplungen des Energiesystems weiter analysiert werden. Zudem sollen weitere Konzepte zum Beispiel auch für den Hochleistungs-ladebereich untersucht werden.

Förderhinweis

Dieser Beitrag wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) innerhalb des Forschungsprojektes „IDEAL – Innovative DC-Technologie zur nachhaltigen Integration moderner Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität“ gefördert (FKZ: 01MV21008A).

6 Referenzen

- Benedict Mortimer, Christopher Olk, Gaurav Kumar Roy, Wilbert Rey Tarnate, Rik W. De Doncker, Antonello Monti, Dirk Uwe Sauer, 2019. Fast-charging technologies, topologies and standards 2.0, E.ON Energy Research Center series -. E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Aachen.
- Bundesnetzagentur, 2022a. Ladesäulenregisters Stand (01.01.2022) [WWW Document]. URL https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/E-Mobilitaet/Ladesaeulenkarte/start.html (accessed 8.2.22).
- Bundesnetzagentur, 2022b. SMARD.de – Marktdaten realisierte Erzeugung 2021 [WWW Document]. URL <https://www.smard.de/> (accessed 8.2.22).
- DIN, 2006. ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IEA, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.
- Kabus, M., Nolting, L., Mortimer, B.J., Koj, J.C., Kuckshinrichs, W., De Doncker, R.W., Praktiknjo, A., 2020. Environmental Impacts of Charging Concepts for Battery Electric Vehicles: A Comparison of On-Board and Off-Board Charging Systems Based on a Life Cycle Assessment. *Energies* 13, 6508. <https://doi.org/10.3390/en13246508>
- Kockel, C., Nolting, L., Goldbeck, R., Wulf, C., De Doncker, R.W., Praktiknjo, A., 2022. A scalable life cycle assessment of alternating and direct current microgrids in office buildings. *Appl. Energy* 305, 117878. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117878>
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2021. Fahrzeugzulassungen 1.Oktober 2021.
- Kumar, D., Zare, F., Ghosh, A., 2017. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects. *IEEE Access* 5, 12230–12256. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2705914>
- NEP, 2021. Netzentwicklungsplan Strom 2035. Zweiter Entwurf. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2035_V2021_2_Entwurf_Teil1.pdf. Zuletzt abgerufen am 04.10.2021.
- Nobis, C., Kuhnimhof, T., 2018. Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur(FE-Nr. 70.904/15)., Bonn, Berlin.
- Nordelöf, A., 2018. A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1491-3>
- Nordelöf, A., Alatalo, M., Söderman, M.L., 2019. A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 78–92. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1503-3>
- Open LCA, 2018. The idea | openLCA.org. URL [/the-idea/](https://openlca.org/the-idea/) (accessed 11.5.18).
- Priesmann, J., Nolting, L., Praktiknjo, A., 2019. Are complex energy system models more accurate? An intra-model comparison of power system optimization models. *Appl. Energy* 255, 113783. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113783>
- SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und FDP, 2021. Koalitionsvertrag 2021 – 2025: Mehr Fortschritt wagen, Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Yilmaz, M., Krein, P.T., 2013. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.* 28, 2151–2169. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212917>