

Working Paper

scale up! – Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen
Stuttgart

Öko-Institut Working Paper 1/2019

Joß Bracker
Dr. Winfried Bulach
Florian Hacker
Dr. Markus Haller
Dr. Friederike Hülsmann
Sven Kühnel
Lukas Minnich
Öko-Institut e. V.

Unter Mitarbeit von:

Martin Hofmann
Flughafen Stuttgart GmbH
Sina Salzer
Losch Airport Service Stuttgart GmbH



Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office

Postfach / P.O. Box 17 71
79017 Freiburg. Deutschland / Germany
Tel.: +49 761 45295-0
Fax: +49 761 45295-288

Büro Darmstadt / Darmstadt Office

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt. Deutschland / Germany
Tel.: +49 6151 8191-0
Fax: +49 6151 8191-133

Büro Berlin / Berlin Office

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin. Deutschland / Germany
Tel.: +49 30 405085-0
Fax: +49 30 405085-388

info@oeko.de
www.oeko.de

Working Paper

scale up! – Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart

Working Paper 1/2019 Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

Januar 2019

Download: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-scale-up.pdf>

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in dieser Publikation Begriffe wie „Fahrer“ und „Mitarbeiter“ meist nur in der maskulinen Schreibweise verwendet. Grundsätzlich beziehen sich diese Begriffe aber immer auf beide Geschlechter. Wir wollen so den Lesefluss erleichtern und bitten um Verständnis für diese Verkürzung.



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz. Öko-Institut e.V. 2019
This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0. Oeko-Institut e.V. 2019

Die Working Paper Series des Öko-Instituts ist eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge aus der Forschungsarbeit des Öko-Instituts e.V. Sie präsentieren und diskutieren innovative Ansätze und Positionen der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung. Die Serie ist offen für Arbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Working Paper entstehen in einem sorgfältigen wissenschaftlichen Prozess ohne externes Peer Review.

Oeko-Institut's Working Paper Series is a collection of research articles written within the scope of the institute's research activities. The articles present and discuss innovative approaches and positions of current sustainability research. The series is open to work from researchers of other institutions. The Working Papers are produced in a scrupulous scientific process without external peer reviews.

Zusammenfassung

Am Flughafen Stuttgart wurde im Rahmen des Projekts „scale up! – emissionsfreie Flughafenflotte“ in der bisherigen Projektlaufzeit seit Ende 2016 bereits ein erheblicher Anteil der Vorfeldflotte der Flughafen Stuttgart GmbH (FSG) und des Drittabfertigers Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS) elektrifiziert und die dafür notwendige Ladeinfrastruktur aufgebaut. Einzelne Fahrzeugkategorien wie die Vorfeldbusse und -schlepper sind bereits vollständig auf den elektrischen Antrieb umgestellt worden. Im Jahr 2019 wird die Elektrifizierung auf weitere Fahrzeuggruppen ausgeweitet.

Die wissenschaftliche Begleitforschung durch das Öko-Institut hat in der bisherigen Projektlaufzeit zu zentralen Fragestellungen des Projekts empirisch gestützte Ergebnisse erzielt, die in diesem Papier präsentiert und im Folgenden zunächst zusammenfassend dargestellt werden.

Energieeinsparung von bis zu 60 % durch elektrische Fahrzeugvariante

In den betrachteten Fahrzeugkategorien konnte durch die Elektrifizierung eine Energieeinsparung¹ von 40 bis 60 % auf Einzelfahrzeugebene erzielt werden. In der Gesamtflotte wurde bis Ende 2018 eine Energieeinsparung von 22 % realisiert.

Hohe Akzeptanz der Elektrofahrzeuge bei der Belegschaft

Die elektrischen Fahrzeugvarianten werden von den Nutzern, trotz vereinzelter Bedenken zu Beginn der Umstellung, mittlerweile sehr positiv gesehen. Die positiven Fahrzeugeigenschaften, wie geringere Lärm- und keine Luftschadstoffemissionen, werden als Erleichterung am Arbeitsplatz wahrgenommen und neue Nutzungsroutinen konnten erfolgreich etabliert werden. Die zügige und konsequente Umstellung einer gesamten Fahrzeugklasse wird von den Beteiligten als ein zentraler Erfolgsfaktor bewertet.

Aufbau der Ladeinfrastruktur als zentrale Voraussetzung für den Erfolg

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur ist mit relevanten Vorabinvestitionen verbunden und erfordert angesichts der umfangreichen Planungsprozesse einen längeren zeitlichen Vorlauf. Angesichts eines unsicheren Fahrzeugangebots (z. B. bei leichten Nutzfahrzeugen) sind die Investitionen teilweise mit erheblichen kurzfristigen Risiken verbunden. Jedoch macht die Ladeinfrastruktur nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer aus. Eine langfristig ausgelegte Dimensionierung der Ladeinfrastruktur wird als wichtiger Erfolgsfaktor gesehen. Zusätzlich müssen Stellflächen auf dem Vorfeld für die Batterieladung der Fahrzeuge längerfristig sichergestellt werden.

Der zusätzliche Strombedarf ist vernachlässigbar, neue Lastspitzen sind aber möglich

Die zusätzliche Stromnachfrage durch die Elektrifizierung der Vorfeldflotte im Rahmen des Projekts erhöht den Gesamtstrombedarf lediglich im einstelligen Prozentbereich. Die bisher etablierten Batterieladeroutinen führen jedoch bereits zu zusätzlichen Lastspitzen, denen durch eine Steuerung anderer Verbraucher entgegengewirkt wird. Die Flexibilisierung der Energienachfrage ist daher mit fortschreitender Elektrifizierung von zunehmender Bedeutung.

¹ Tank-to-Wheel (TTW) Energiebedarf, siehe auch Abschnitt 2.1

Elektrofahrzeuge haben über den gesamten Lebensweg eine vorteilhafte Klimabilanz

Die Umweltbewertung von Vorfeldebussen und -schleppern auf Basis der heutigen Nutzung und detaillierten Daten zur Fahrzeugzusammensetzung zeigt, dass die elektrischen Varianten auch bei Ansatz des deutschen Durchschnittsmix für die Stromerzeugung über den gesamten Lebensweg (inkl. Herstellung und Entsorgung) bereits etwa ein Viertel (Busse) bzw. ein Fünftel (Schlepper) weniger CO₂ verursachen als die Dieselvariante. In den kommenden Jahren wird dieser Vorteil im Zuge der Dekarbonisierung des Stromsystems weiter zunehmen. Wird der aktuelle Standortmix am Flughafen Stuttgart angesetzt, sind die Treibhausgasemissionen bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen bereits heute jeweils etwa ein Drittel geringer als bei den vergleichbaren Dieselfahrzeugen. In der Wirkungskategorie Versauerungspotenzial schneiden die E-Fahrzeuge jeweils deutlich besser ab als die Konventionellen. Beim Ressourcenverbrauch besteht bei den E-Fahrzeugen noch Verbesserungsbedarf: In dieser Kategorie fällt die Bewertung des Dieselfahrzeugs knapp (Vorfeldebuss) bzw. deutlich (Vorfeldschlepper) besser aus. In allen drei zu Rate gezogenen Umweltbewertungskategorien zeigen sich Vorteile der in den Bussen eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien gegenüber deren Blei-Säure-Pendants bei den Schleppern.

Elektrische Vorfeldfahrzeuge können bereits kurzfristig wirtschaftlich betrieben werden

Die weiterhin höheren Anschaffungskosten von elektrischen Vorfeldfahrzeugen können durch die geringeren Betriebskosten über die Nutzungsdauer teilweise bereits mehr als kompensiert werden bzw. weisen nur leicht höhere Gesamtkosten auf. Die Kosten der Ladeinfrastruktur fallen trotz hoher Anfangsinvestitionen auf Einzelfahrzeugebene langfristig wenig ins Gewicht. Angesichts der kleinen Produktionsvolumina im Anwendungskontext Flughafen sind in den betrachteten Fahrzeugkategorien insbesondere Lithium-Ionen-Batterien und der elektrische Antriebsstrang noch mit hohen Kosten verbunden. Eine deutliche Kostendegression und eine damit verbundene höhere Wirtschaftlichkeit erscheinen aber bei zunehmenden Produktionsvolumina in naher Zukunft realistisch.

Roadmap für die weitere Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart

Im weiteren Projektverlauf werden weitere Fahrzeugkategorien der Vorfeldmobilität in den Blick genommen und deren Potenzial zur Elektrifizierung sowie die dafür notwendigen Rahmenbedingungen analysiert. Ziel ist es, eine möglichst weitreichende Strategie zur Elektrifizierung am Flughafen Stuttgart zu entwickeln, deren ökonomische und ökologische Konsequenzen zu analysieren und den weiteren Handlungsbedarf aufzuzeigen. In diesem Kontext soll auch verstärkt der Dialog mit anderen Flughäfen gesucht und eine mögliche Übertragbarkeit diskutiert werden.

Abstract

As part of the "scale up! emission-free airport fleet" project at Stuttgart Airport, a considerable proportion of the apron fleet of Flughafen Stuttgart GmbH (FSG) and the third-party handler Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS) has been electrified and the necessary charging infrastructure has been set up. Individual vehicle categories such as apron buses have already been completely converted to electric propulsion. Electrification will be extended to other vehicle groups in 2019.

In the course of the project, Oeko-Institut's accompanying scientific research has produced empirically based results on key issues raised by the project, which are presented in this paper and summarised below.

Energy savings of up to 60% thanks to electric vehicles

In the vehicle categories under consideration, the electrification process resulted in energy² savings of 40 to 60% on the single vehicle level. Energy savings of 22% were achieved for the entire fleet by the end of 2018.

High acceptance of electric vehicles among the workforce

The electric vehicle variants are now viewed very positively by users, despite isolated reservations at the beginning of the conversion process. The positive vehicle characteristics, such as lower noise emissions and no air pollutant emissions, are seen as an improvement at the workplace and new usage routines have been successfully established. The rapid and consistent changeover of an entire vehicle class is regarded by the participants as a central success factor.

Development of the charging infrastructure as a central prerequisite for success

The construction of the charging infrastructure is associated with relevant upfront investments and requires a longer lead time in view of the extensive planning processes. In view of the uncertain supply of vehicles (e.g. light commercial vehicles), investments are sometimes associated with considerable short-term risks. However, the charging infrastructure accounts for only a small proportion of the total costs over the entire lifespan. A long-term-oriented dimensioning of the charging infrastructure is regarded as an important success factor. In addition, parking space on the apron must be secured for the vehicles' battery charging in the longer term.

The additional electricity demand is negligible, but new load peaks are possible.

The additional electricity consumption due to the electrification of the apron fleet as part of the project only increases the total demand in the single-digit percentage range. However, the battery charging routines established to date already lead to additional peak loads, which are counteracted by managing other consumers. A more flexible energy demand is therefore of increasing importance as electrification progresses.

² Tank-to-wheel (TTW) energy demand, see also section 2.1

Electric vehicles have an advantageous carbon footprint over their entire life cycle

The environmental assessment of apron buses and tractors on the basis of current use and detailed data on vehicle composition shows that, even if the German average mix is applied for electricity generation over the entire life cycle (including production and disposal), the electric variants already cause around a quarter (buses) or a fifth (tractors) less CO₂ than the diesel variant. In the coming years, this advantage will continue to increase as the electricity system will be decarbonised. If the present site electricity mix at Stuttgart Airport is applied, greenhouse gas emissions for electrically powered vehicles are already about one third lower than for comparable diesel vehicles. In the acidification potential impact category, electric vehicles perform significantly better than conventional ones. There is still room for improvement in the consumption of resources by electric vehicles: In this category, the assessment of the diesel vehicle is narrowly (apron bus) or significantly better (apron tractor). In all three environmental assessment categories used for the rating, the advantages of the lithium-ion batteries used in the buses compared with the lead-acid equivalent of the tractors are evident.

Electric apron vehicles can already be operated economically at short notice

The still higher acquisition costs of some electric apron vehicles can already be more than compensated by the lower operating costs over the service life or only show slightly higher overall costs. The costs of the charging infrastructure are of little significance in the long term, despite high initial investments at the single vehicle level. In view of the small production volumes in the applications considered in the airport context, lithium-ion batteries and the electric drive train in particular are still associated with high costs. However, a significant reduction in costs and the associated increase in profitability appear realistic in the near future as production volumes increase.

Roadmap for the further electrification of apron mobility at Stuttgart Airport

In the further course of the project, further vehicle categories of apron mobility will be examined and their potential for electrification and the necessary framework conditions will be analysed. The aim is to develop a strategy for electrification at Stuttgart Airport that is as far-reaching as possible, to analyse its economic and ecological consequences and to point out the need for further action. In this context, the dialogue with other airports will be intensified and a possible transferability will be discussed.

Inhaltsverzeichnis	
Zusammenfassung	5
Abstract	7
Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
1. Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart – Projekt „scale up!“	13
2. Erkenntnisse aus dem Praxiseinsatz	14
2.1. Ausgangssituation und bisherige Elektrifizierung der Vorfeldflotte	14
2.2. Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz	19
2.3. Ladeinfrastruktur	20
2.4. Energiewirtschaftliche Integration der Elektrofahrzeuge	21
3. Umweltbewertung	24
3.1. Vorgehen und Methodik	24
3.2. CO ₂ -Emissionen der Strombereitstellung	24
3.3. Umweltbewertung über den gesamten Lebensweg für ausgewählte Fahrzeugkategorien	26
4. Wirtschaftlichkeit des Betriebs von Elektrofahrzeugen	29
4.1. Vorgehen und Methodik	29
4.2. Gesamtbetriebskosten für ausgewählte Fahrzeugklassen (inkl. Ladeinfrastruktur)	31
5. Status quo und Ausblick	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Energiebedarf der gesamten Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart 2017	14
Abbildung 2-2:	Energiebedarf und Anzahl Fahrzeuge auf dem Vorfeld im Jahr 2014 (vor Projektbeginn)	15
Abbildung 2-3:	(Teil-)Elektrifizierung einzelner Fahrzeugkategorien der Vorfeldmobilität	16
Abbildung 2-4:	eCobus 3000-Vorfeldbus	16
Abbildung 2-5:	Energiebedarf nach Antrieb – Vorfeldbus	17
Abbildung 2-6:	Volk Elektroschlepper	18
Abbildung 2-5:	Energiebedarf im Zeitverlauf – Vorfeldschlepper	18
Abbildung 2-6:	Lagepläne zur Stromversorgung (Energierstationen) der elektrischen Vorfeldbusse und -schlepper der FSG und LAS	21
Abbildung 2-9:	Eigenerzeugung und Strombezug des Flughafen Stuttgart	22
Abbildung 2-8:	Simulation des Ladeverhaltens der E-Fahrzeuge	23
Abbildung 3-1:	CO ₂ -Emissionsfaktoren der Bilanzierungsansätze	25
Abbildung 3-2:	Vorfeldbus – Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial und abiotischer Ressourcenverbrauch	27
Abbildung 3-3:	Vorfeldschlepper – Klimaerwärmungspotenzial, Versauerungspotenzial und abiotischer Ressourcenverbrauch	28
Abbildung 4-1:	Gesamtbetriebskosten (TCO) über den Nutzungszeitraum der Busse (15 Jahre) in € ₂₀₁₈ zzgl. der anteiligen Kosten für die Ladeinfrastruktur	32
Abbildung 4-2:	Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Variation ausgewählter Kostenkomponenten auf die Gesamtbetriebskosten (TCO)	33
Abbildung 4-3:	Gesamtbetriebskosten (TCO) über den Nutzungszeitraum der Schlepper (10 Jahre) in € ₂₀₁₈ zzgl. der anteiligen Kosten für die Ladeinfrastruktur	35
Abbildung 4-4:	Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Variation ausgewählter Kostenkomponenten auf die Gesamtbetriebskosten (TCO)	36
Abbildung 5-1:	Energiebedarf (Strom bzw. Dieselkraftstoff) der gesamten Vorfeldflotte (FSG + LAS), 2014 - 2019	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Annahmen für die TCO-Berechnungen	31
Tabelle 4-2:	Input-Parameter für die TCO-Betrachtung der Vorfelddbusse	32
Tabelle 4-3:	Input-Parameter für die TCO-Betrachtung der Schleppfahrzeuge	34

1. Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart – Projekt „scale up!“

Elektromobilität wird vor allem mit dem Verkehr im öffentlichen Straßenraum in Verbindung gebracht. Aber auch in der innerbetrieblichen Mobilität bestehen hohe Potenziale für den Ersatz von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen durch Elektrofahrzeuge und die damit verbundene Reduzierung negativer Umweltwirkungen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „scale up! – emissionsfreie Flughafenflotte“ wird eine umfassende Elektrifizierung der Bodenverkehrsdienste am Flughafen Stuttgart im Zeitraum von 2016 bis 2019 realisiert und durch das Öko-Institut wissenschaftlich begleitet. Dabei ersetzen sowohl der Flughafenbetreiber, die Flughafen Stuttgart GmbH (FSG), als auch der Drittabfertiger am Standort, die Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS), in Kooperation einen großen Anteil der Diesel-Flotte durch Elektrofahrzeuge und bauen die erforderliche Infrastruktur auf.

Bei der Elektrifizierung der Flotte stehen die Minderung der global wirksamen Treibhausgasemissionen sowie der lokal wirksamen Luftschadstoff- und Lärmemissionen im Vordergrund. Letztere sind insbesondere in Bezug auf den Arbeitsschutz von großer Relevanz. Eine besondere Herausforderung stellen die hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Fahrzeuge bei der Flugzeugabfertigung dar.

Das Öko-Institut hat bereits in vorangegangenen Analysen die Potenziale zur Elektrifizierung der Vorfeldmobilität untersucht. Bei der wissenschaftlichen Begleitung der Umsetzung am Flughafen Stuttgart im Rahmen des Projekts „scale up!“ untersucht das wissenschaftliche Projektteam den laufenden Betrieb der Fahrzeuge und die weiteren Potenziale einer Elektrifizierung (Roadmap für den Flughafen Stuttgart). Themenschwerpunkte sind unter anderem die Nutzerakzeptanz, die ökologische Bewertung der Nutzungsphase und des Fahrzeuglebenswegs (Umweltbewertung), Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sowie die energiewirtschaftliche Einbindung der Fahrzeuge und mögliche Optimierungsstrategien.

Der Flughafen Stuttgart zählt mit 11,8 Millionen Passagieren pro Jahr zu den zehn größten Flughäfen in Deutschland. Das gesamte Flughafensystem besteht aus ca. 250 Einzelfirmen, die zusammen ca. 10.000 Beschäftigte auf sich vereinen. Wesentlicher Tätigkeitsschwerpunkt der Mehrheit der am Flughafen tätigen Firmen ist die Erbringung von Logistik- und/oder Servicedienstleistungen rund um die Flugzeugabfertigung und die Durchführung des Flugbetriebes. Dies gilt auch für die Flughafen Stuttgart GmbH (FSG) als Betreibergesellschaft des Flughafens. Zur Geschäftsbesorgung betreibt die FSG einen Fuhrpark von rund 1.500 Fahrereinheiten. Hiervon ist der Großteil Equipment, das bei der Flugzeugabfertigung eingesetzt wird. Neben der FSG erbringt auch die Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS) als sogenannter Drittabfertiger im Rahmen der BADV-Richtlinie Abfertigungsdienstleistungen mit einem Marktanteil von ca. 40 % am Flughafen Stuttgart.

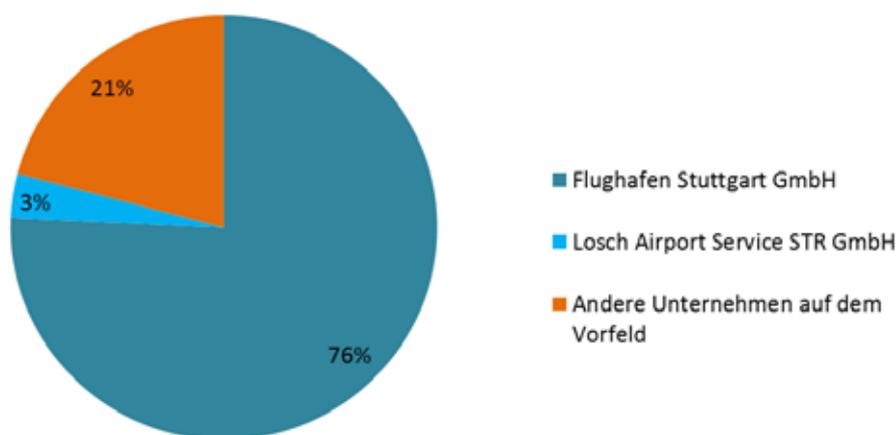
Im Folgenden werden zentrale Ergebnisse aus zwei Jahren wissenschaftlicher Begleitforschung vorgestellt und ein Ausblick auf den weiteren Projektverlauf gegeben. Ziel des Projekts ist es, im dritten Projektjahr verstärkt in den Dialog mit anderen Flughäfen zu treten. Die hier präsentierten Ergebnisse sollen dafür eine wichtige Grundlage darstellen.

2. Erkenntnisse aus dem Praxiseinsatz

2.1. Ausgangssituation und bisherige Elektrifizierung der Vorfeldflotte

Auf dem Vorfeld des Flughafens Stuttgart sind Fahrzeuge und Geräte verschiedener Unternehmen im Einsatz. Der größte Anteil der Fahrzeuge gehört der Flughafen Stuttgart GmbH (FSG). Diese machen rund drei Viertel des Energiebedarfs³ auf dem Vorfeld aus. 3 % des Energieverbrauchs der Vorfeldflotte entfallen am Flughafen Stuttgart auf Fahrzeuge des Abfertigungsdienstleisters Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS). Die restlichen 21 % sind weiteren Unternehmen wie z. B. Skytanking Stuttgart GmbH und LSG Sky Chefs Stuttgart GmbH zuzurechnen. Im Folgenden werden nur die Fahrzeugflotten der Projektpartner FSG und LAS betrachtet.

Abbildung 2-1: Energiebedarf der gesamten Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart 2017



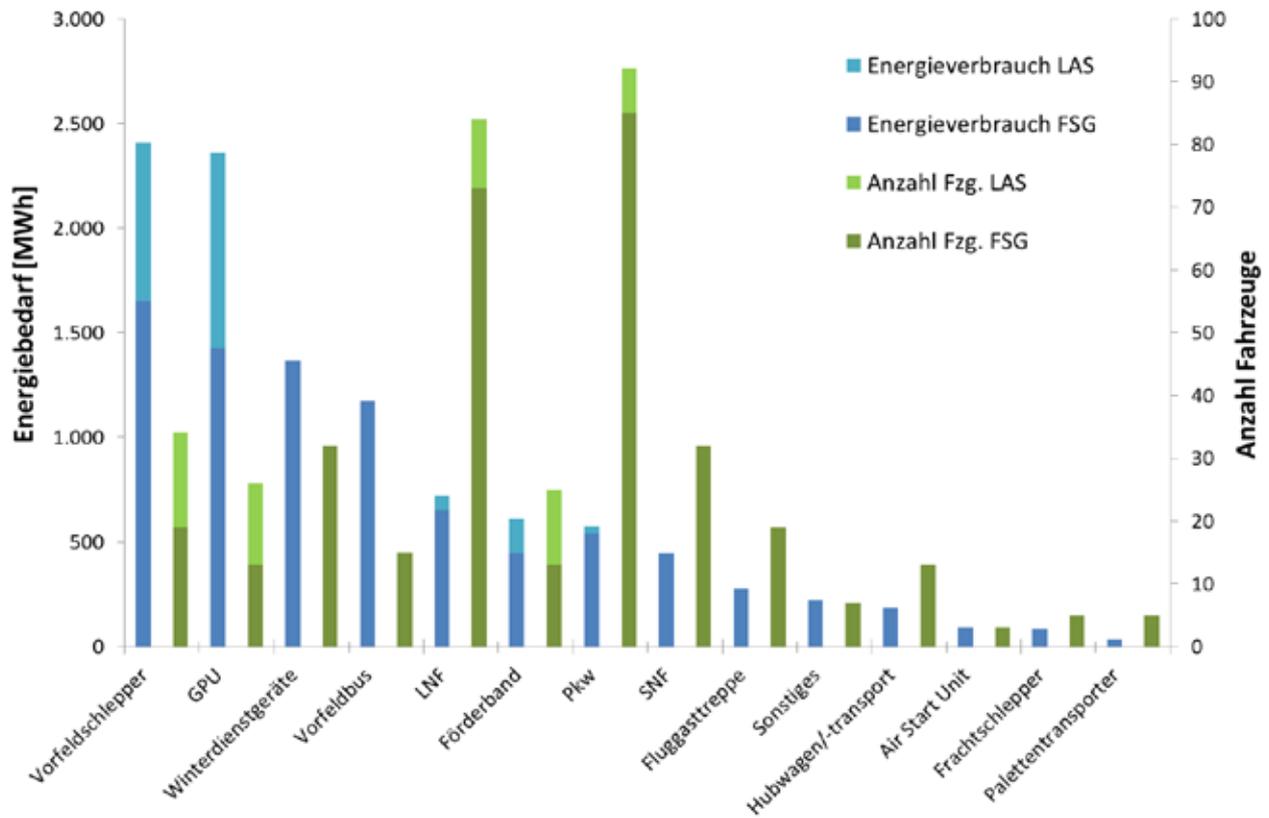
Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung auf Basis der Tankdaten der FSG, 2017

Die größten Verbraucher auf dem Vorfeld des Flughafens Stuttgart waren 2014 die Vorfeldschlepper, Bodenstromaggregate (ground power unit – GPU), Winterdienstgeräte und Vorfeldbusse. Sie weisen einen hohen Energiebedarf pro Fahrzeug auf. Aufgrund der hohen Anzahl an leichten Nutzfahrzeugen und Pkw haben diese insgesamt ebenfalls einen hohen Anteil, auch wenn der spezifische Energiebedarf dieser Fahrzeuge relativ gering ist (siehe Abbildung 2-2).

Eine Sonderrolle nehmen die Bodenstromaggregate ein, also Dieselaggregate zur Stromversorgung der Flugzeuge auf den Außenpositionen ohne stationäre Stromversorgung, da deren Energiebedarf ausschließlich auf die Stromerzeugung mittels Dieselmotor zurückgeht und nicht auf den Antrieb. Sukzessive werden die Bodenstromaggregate durch eine leitungsgebundene Stromversorgung der Außenpositionen ersetzt. Zwar bestehen auch erste Ansätze zum Ersatz von dieselgetriebenen, mobilen GPUs durch mobile Batteriespeicher. Im Rahmen des Projekts „scale up!“ wurde eine derartige Elektrifizierung mobiler GPUs jedoch nicht umgesetzt.

³ Allen Aussagen zum Energiebedarf von Vorfeldfahrzeugen und -geräten liegt in diesem Papier die Tank-to-Wheel-Betrachtung (TTW) zugrunde, bei der nur die Verbräuche der Fahrzeuge selbst sowie (bei Elektrofahrzeugen) die Ladeverluste berücksichtigt sind. Nicht betrachtet wird an dieser Stelle die Energie, die zur Stromproduktion bzw. zur Bereitstellung des Kraftstoffs aufgewendet werden muss und als Well-to-Tank (WTT) oder „Vorkette“ bezeichnet wird. Auf die CO₂-Emissionen der Strombereitstellung wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen.

Abbildung 2-2: Energiebedarf und Anzahl Fahrzeuge auf dem Vorfeld im Jahr 2014 (vor Projektbeginn)

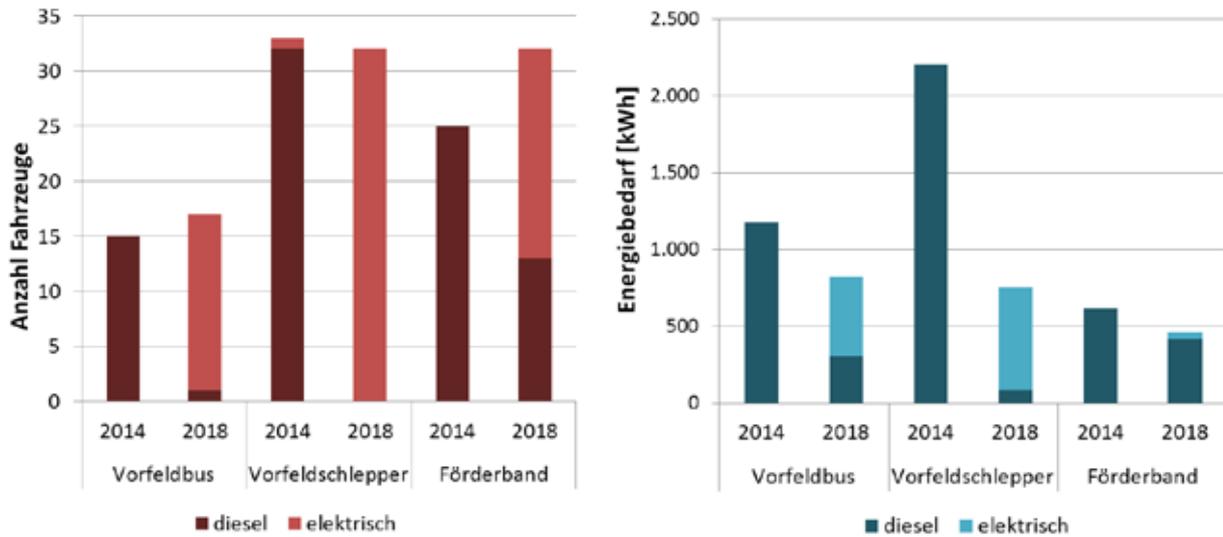


LNF = leichte Nutzfahrzeuge, SNF = schwere Nutzfahrzeuge, GPU = Ground Power Units

Quelle: Öko-Institut, eigene Auswertung auf Basis der Fuhrparkdaten der FSG und LAS

Die Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart hat 2014 mit den Vorfeldschleppern begonnen und ist von 2015 an in größerem Umfang umgesetzt worden. Abbildung 2-3 zeigt die Fahrzeugkategorien, bei denen die Elektrifizierung der Flotte bis Ende 2018 am weitesten fortgeschritten ist. Die Anzahl von dieselbetriebenen und elektrischen Fahrzeugen ist in der Abbildung für den Dezember 2018 dargestellt und die Energiebedarfe als Jahressumme für 2018. Neben den dargestellten Fahrzeugtypen werden seit 2017 auch die Flotten der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge in relevantem Umfang auf elektrischen Antrieb umgestellt. Insbesondere bei letzteren ist allerdings das Angebot an geeigneten und am Markt verfügbaren Fahrzeugen immer noch nicht ausreichend, um eine weiterreichende Elektrifizierung erfolgreich durchführen zu können.

Abbildung 2-3: (Teil-)Elektrifizierung einzelner Fahrzeugkategorien der Vorfeldmobilität: Anzahl Fahrzeuge Dezember 2018 (l.), Energiebedarf 2018 gesamt (r.)



Quelle: Öko-Institut, eigene Auswertung auf Basis der Fuhrparkdaten der FSG und LAS; Angaben zu den Fahrzeugen für 12/2018

Beispiel Vorfeldbus

Der Vorfeldbus kommt beim Flugbetrieb dann zum Einsatz, wenn ein Flugzeug nicht direkt an der Terminalposition parkt und die Passagiere somit nicht über eine Fluggastbrücke ins Terminalgebäude gelangen können. Auf den Außenpositionen werden die ankommenden Passagiere mit dem Vorfeldbus vom Flugzeug abgeholt und die abreisenden Passagiere für den nächsten Flug zum Flugzeug gebracht.

Abbildung 2-4: eCobus 3000-Vorfeldbus

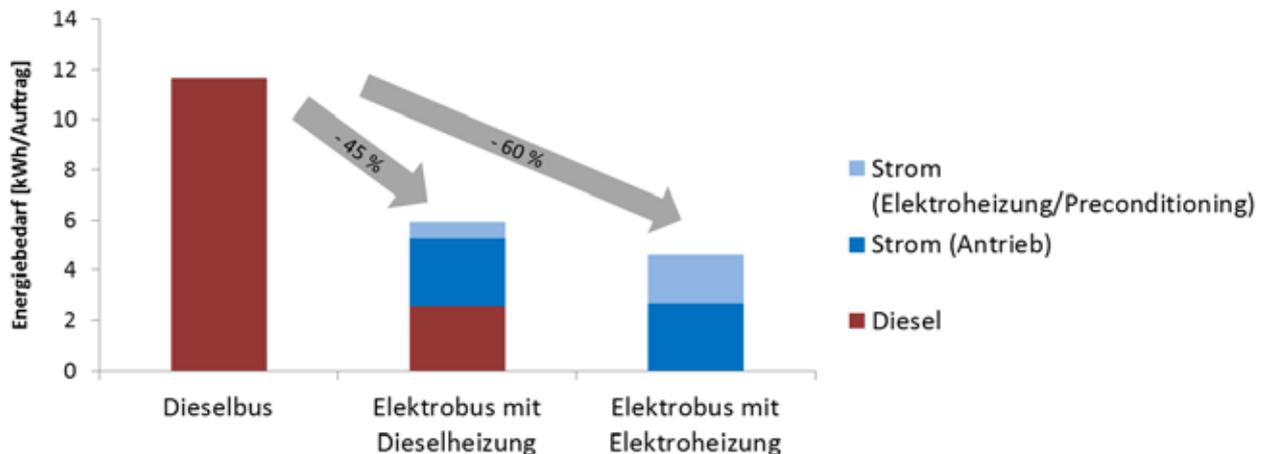


Quelle: FSG

Seit 2015 ist der elektrische Vorfeldbus, eCobus 3000 (12 t Leergewicht, 160 kW Motorleistung), mit Lithium-Titanat-Batterie (84 kWh) in der Bodenabfertigung am Flughafen Stuttgart im Einsatz. Im Laufe des Jahres 2018 wurden mit nunmehr 16 eCobus 3000 Bussen die letzten dieselbetriebenen Vorfeldbusse ersetzt. Die ersten sechs E-Busse sind 2015 noch mit Dieselheizung angeschafft worden, die weiteren zehn elektrischen Busse 2018 dann mit Elektroheizung. Letztere sind ca. 60 % energieeffizienter als die vergleichbaren dieselbetriebenen Busse (s. Abbildung 2-5). Dies hat zur Folge, dass der gesamte Energiebedarf der Busse um ca. 40 % im zweiten und dritten Quartal 2018 gegenüber 2017 gesunken ist. Zudem wurden im Laufe des Jahres 2018 die Elektro-

busse mit Dieselheizung mit einer Elektroheizung nachgerüstet. Der Elektrobus mit Dieselheizung stellte somit nur eine Übergangslösung zum rein elektrisch betriebenen Elektrobus dar.

Abbildung 2-5: Energiebedarf nach Antrieb – Vorfeldbus



Quelle: Öko-Institut, Berechnung auf Basis der Betriebsdaten der FSG; Elektrobusse bis 2017 mit Dieselheizung, ab 2018 ca. neun von 16 Elektrobusen mit Elektroheizung

Beim vollständig elektrisch betriebenen Vorfeldbus, eCobus 3000, wird Strom durch den elektrischen Antrieb, das Vorheizen vor Inbetriebnahme und ggf. für das Heizen während des Betriebes bei kalten Temperaturen verbraucht. Der Stromverbrauch variiert aufgrund des Heizenergiebedarfs beträchtlich zwischen den Jahreszeiten. Der Effizienzvorteil des Elektrobusse gegenüber dem Dieselbus fällt daher in den Sommermonaten noch größer aus, weil außerhalb der Heizperiode nur Energie für den Fahrzeugantrieb bereitgestellt werden muss.

Beispiel Vorfeldschlepper

Vorfeldschlepper kommen vorwiegend als Zugmaschinen für den Transport von Gepäck und Geräten auf dem Vorfeld bzw. zwischen Flugzeug und Terminalgebäude zum Einsatz. Da die Fahrzeuge beim Gepäcktransport in das Terminalgebäude einfahren, werden in dieser Anwendung aus Arbeitsschutzgründen standardmäßig an Flughäfen, so bisher auch am Flughafen Stuttgart, die selektive elektrische Hybridfahrzeuge eingesetzt, die einen temporären elektrischen und damit emissionsfreien Betrieb im Innenbereich ermöglichen.

Sowohl die FSG als auch LAS verfügen über Vorfeldschlepper, setzen sie jedoch unterschiedlich ein: während die Fahrzeuge bei der FSG ausschließlich zum Gepäcktransport genutzt werden, transportieren die Schlepper bei LAS auch die Ground Power Units und die Fluggasttreppen, da diese über keinen eigenen Antrieb verfügen. Die ersten rein elektrisch angetriebenen Vorfeldschlepper (6,1 t Leergewicht, 30 kW Motorleistung) wurden im Jahr 2014 (LAS) bzw. 2015 (FSG) beschafft und verfügen über Blei-Säure Batterien mit einer Kapazität von 112 kWh. Die Anzahl der Elektroschlepper erhöhte sich am Flughafen Stuttgart auf 22 Fahrzeuge im Jahr 2016 und auf 28 Fahrzeuge im Jahr 2017. Bereits im Jahr 2018 wurde die Elektrifizierung der gesamten Vorfeldschlepper-Flotte am Flughafen Stuttgart erfolgreich abgeschlossen (derzeit 32 Fahrzeuge).

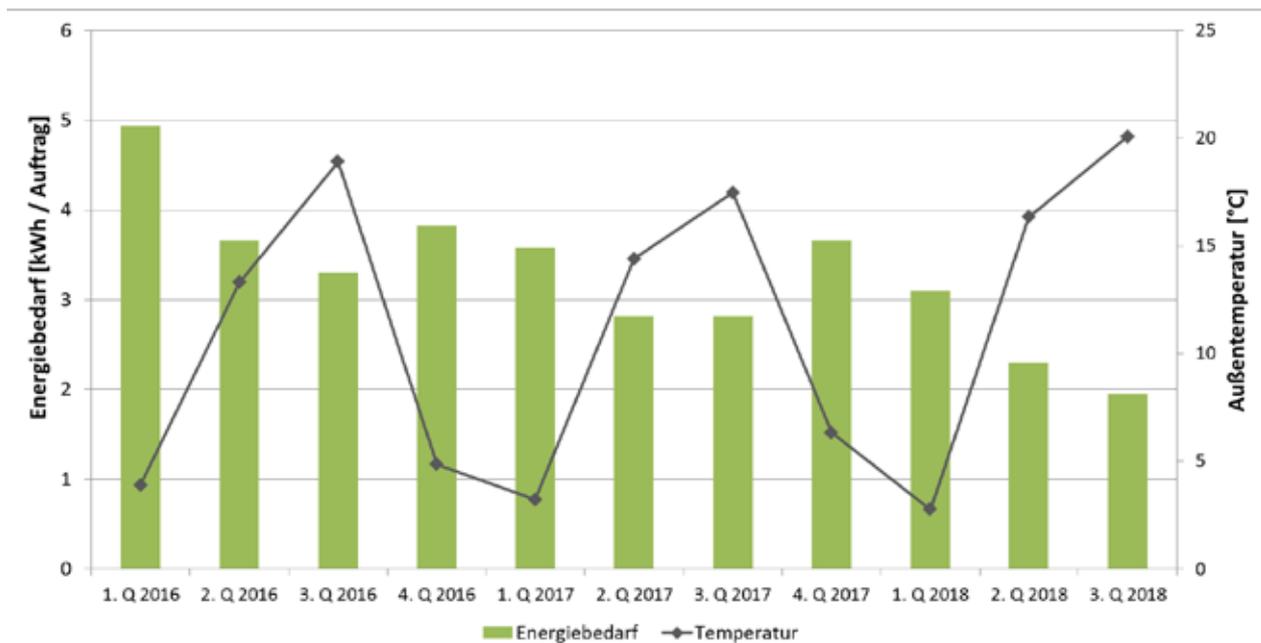
Abbildung 2-6: Volk Elektroschlepper



Quelle: FSG

Bei LAS wurde die Flotte der Vorfeldschlepper bereits 2016 weitestgehend elektrifiziert. Seit Frühjahr 2018 finden der komplette Gepäcktransport sowie das Ziehen von Passagiertreppen und Bodenstromaggregaten auf dem Vorfeld nur noch mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen statt. Der spezifische Energiebedarf der Vorfeldschlepper pro Auftrag ist von 2016 bis 2018 mit zunehmender Elektrifizierung der Flotte um ca. 40 % gesunken (siehe Abbildung 2-7).

Abbildung 2-7: Energiebedarf im Zeitverlauf – Vorfeldschlepper



Quelle: Öko-Institut, Berechnung auf Basis der Betriebsdaten der FSG

Zwischenfazit

Aufgrund der Elektrifizierung von 2014 bis 2018 konnte bei den Vorfeldbussen, -schleppern und Förderbändern der Energiebedarf trotz steigender Passagierzahlen halbiert werden. Da 2018 ein Übergangsjahr darstellt, in dem der Hochlauf der Elektrofahrzeuge stattgefunden hat, werden für 2019 noch höhere Energieeinsparungen erwartet.

Bei leichten Nutzfahrzeugen und einigen Pkw-Segmenten stellt die fehlende Marktverfügbarkeit von geeigneten Serienfahrzeugen ein Hemmnis für die weitere Elektrifizierung dar.

2.2. Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz

Angesichts der hohen Relevanz der Abfertigungszeiten für den Flughafenbetrieb werden hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit der Vorfeldfahrzeuge gestellt. Die starke Schwankung der Flugbewegungen und damit der Anzahl der Abfertigungen im Tages- und Jahresverlauf verschärft diese Anforderungen in den Hochlastzeiten. Die erfolgreiche Umstellung der Flotte auf den elektrischen Antrieb ist daher maßgeblich von der technischen Zuverlässigkeit und der Akzeptanz der Fahrzeuge durch die Mitarbeiter abhängig.

Bei der Veränderung des Fuhrparks am Flughafen Stuttgart wird deutlich, dass aus den o. g. Gründen in einer Übergangsphase zunächst in jeder Anwendung mehr Fahrzeuge im Fuhrpark sind als langfristig notwendig. Erst danach pendelt sich die Anzahl der Fahrzeuge wieder auf dem Ausgangsniveau ein. Gründe dafür sind, dass zunächst die neuen Fahrzeuge mit Elektroantrieb in den Betriebsablauf einschließlich der Ladevorgänge integriert werden müssen und es dabei zu keinen Ausfällen kommen darf, d. h. dass ein Auftrag – z. B. Passagiere oder Gepäck zu transportieren – jederzeit erfüllt werden kann.

Sowohl bei Vorfeldbussen als auch den Vorfeldschleppern ist die Akzeptanz der Elektrovariante seitens der Fahrer hoch. In der Einführungsphase gab es eine Gruppe an Fahrern, die von Beginn an begeistert von der Elektrovariante war. Der überwiegende Teil der Fahrer zeigte sich anfänglich skeptisch bezüglich der Reichweite der Fahrzeuge und setzte auf die vertraute Nutzung der Dieselfahrzeuge. Durch die praktische Erfahrung mit den Elektrofahrzeugen wurde die Wahrnehmung von Hemmnissen stark relativiert und sehr schnell die elektrische Variante der dieselpbetriebenen vorgezogen. Eine wichtige Voraussetzung für diesen Prozess war, dass eine ausreichend große Anzahl an Elektrofahrzeugen zur Nutzung bereit stand. Als besonders positiv wurde nicht nur von den Fahrern, sondern auch von den Werkstattmitarbeitern die geringere Lärm- und Luftschadstoffbelastung durch die Elektrofahrzeuge wahrgenommen. Bei der Verfügbarkeit der Fahrzeuge wurden bisher keine besonderen Einschränkungen festgestellt.⁴

Beispiel Vorfeldbus

Die Vorfeldbusse kommen täglich zwischen 14-mal in Zeiten geringer Nachfrage wie z. B. im Januar und bis zu 31-mal im Juni bei hohem Flugaufkommen zum Einsatz. Die Batterie der elektrischen Vorfeldbusse wird tagsüber, wenn keine Aufträge vorliegen, und abends nach der letzten Fahrt geladen. D. h. die Batterie wird zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich viel geladen, vor allem dann, wenn wenig Flugbetrieb ist. Für die Busfahrer gehört das zusätzliche Laden mittlerweile zum routinemäßigen Ablauf und wurde im betrieblichen Ablauf mit zeitgleichen Fahrerpausen kombiniert.

Die Zuständigkeiten für die Wartung der Busse haben sich durch die Technologieumstellung nicht verändert. Ein Servicetechniker der Firma Cobus betreut im Vollwartungsvertrag alle Busse und setzt den flughafeninternen Gerätestandard um. Insgesamt ist der Wartungsaufwand der Elektro-

⁴ Die Erfahrungen zur Akzeptanz der Elektrofahrzeuge nach dem Austausch der Dieselsvariante basieren auf Befragungen der Busfahrer und Fahrer der Vorfeldschlepper.

busse im Vergleich zu den verbrennungsmotorischen Bussen geringer, da Reparaturen am Auspuff, Getriebe und Verbrennungsmotor wegfallen.⁵

Beispiel Vorfeldschlepper

Der Einsatz der Vorfeldschlepper variiert von täglich 16-mal in Monaten geringen Flugaufkommens bis hin zu 32-mal bei hohem Flugaufkommen. Die Vorfeldschlepper können in der Regel an den Schichtenden mit einer Ladesäule verbunden und über Nacht geladen werden. Wenn es der betriebliche Ablauf ermöglicht und die Notwendigkeit besteht, finden auch Zwischenladungen statt.

In den ersten Jahren der Einführung der Elektroschlepper wurden mit den Herstellern Vollwartungsverträge vereinbart. Kleinere Wartungsaufgaben übernehmen die Werkstattmitarbeiter vor Ort. Der Füllstand der Blei-Säure-Batterien muss jede Woche überprüft und regelmäßig destilliertes Wasser nachgefüllt werden. Dafür ist zusätzlicher personeller Aufwand notwendig. Zusätzliche Anschaffungen werkstattseitig fallen für die Batterietraverse an, mit der die Batterie aus dem Fahrzeug gehoben wird. Die Anschaffungskosten und der Arbeitsaufwand sind hingegen verhältnismäßig gering. Der Reifenverschleiß ist aufgrund des höheren Gewichts der elektrischen Vorfeldschlepper von gut 6 t verglichen mit der Dieselvariante von ca. 4,5 t deutlich höher. Insgesamt ist ähnlich wie bei den Bussen der Wartungsaufwand der elektrischen Vorfeldschlepper angesichts des weniger verschleißanfälligen elektrischen Antriebsstrangs im Vergleich zur Dieselvariante geringer.⁶

Zwischenfazit

Mit der Nutzung der Elektrofahrzeuge stieg die Akzeptanz der Elektrovariante seitens der Fahrer. Gründe dafür sind vor allem die geringeren Luftschadstoff- und Lärmemissionen, die von den Fahrern als sehr positiv gegenüber der Dieselvariante wahrgenommen wurden. Das zusätzliche Laden der Fahrzeugbatterien gehört mittlerweile zum routinemäßigen Ablauf eines Auftrags oder einer Schicht. Der Wartungsaufwand ist durch die Elektrifizierung insgesamt zurückgegangen.

Die zügige Elektrifizierung einer Fahrzeugkategorie und das Stilllegen der verbrennungsmotorischen Fahrzeuge haben schnell zur Etablierung neuer Nutzungsroutinen geführt und die Akzeptanz bei der Mitarbeiterschaft gefördert.

2.3. Ladeinfrastruktur

Zwei Energiestationen mit einer Ladeleistung von 1.250 kW und 1.600 kW wurden für die Vorfeldbusse und -schlepper der FSG und LAS gebaut. 2014 wurde die Trafostation am Terminalgebäude 1 und 2015 eine weitere bei der BVD- (Bodenverkehrsdienste-)Halle errichtet. Abbildung 2-8 zeigt die Anordnung der Ladepunkte (CEE-Stecker) am Terminal (links) sowie an der BVD-Halle (rechts), farblich differenziert nach der maximalen Stromstärke (16 bis 125 Ampere).

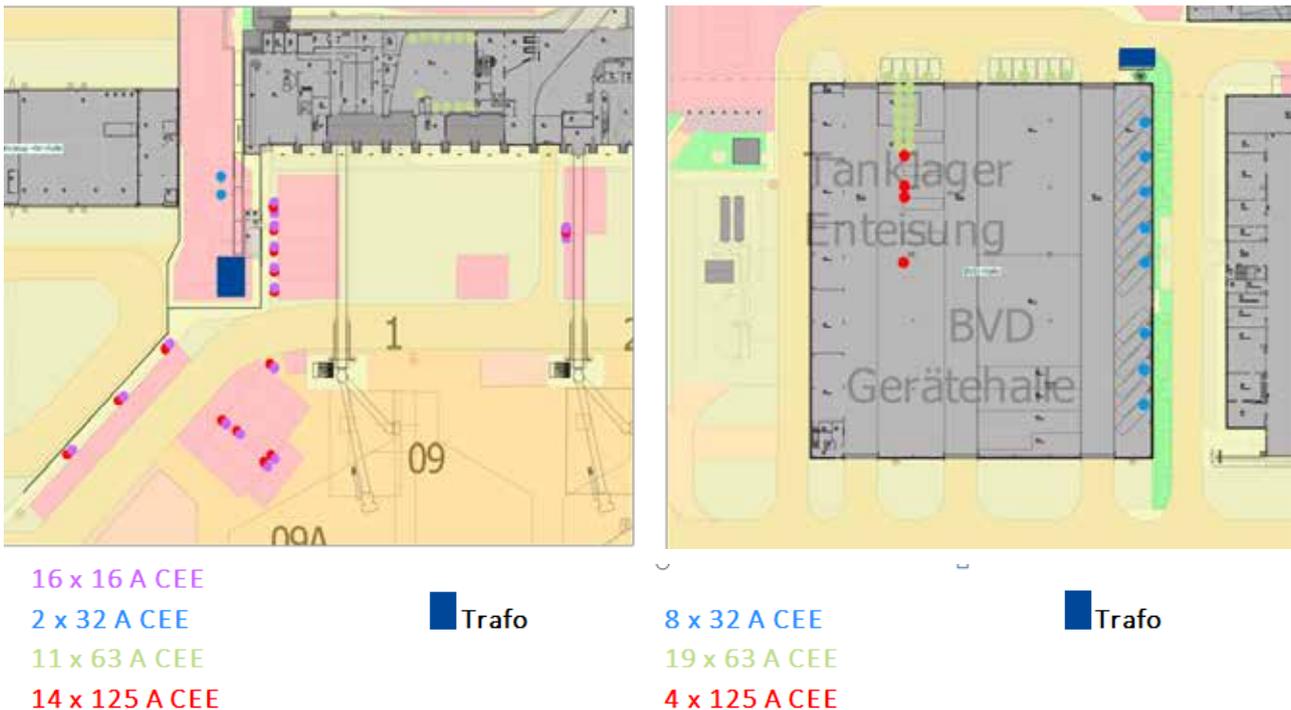
Die Bereitstellung der Stromversorgung ging mit verschiedenen Herausforderungen einher. Auf der technischen Seite mussten Lösungen für das Schnellladen der Busse gefunden und geeignete Standorte für die Energiestationen und die Ladesäulen lokalisiert werden. Die Planung der Energieversorgungsinfrastruktur hat bei der Umstellung vom Diesel- auf den Elektrobetrieb überpropor-

⁵ Die Angaben zur Wartung und Reparatur der Elektrobusse basieren auf den Befragungen der Busfahrer, des Leiters und des Supervisors der Bodenverkehrsdienste und Mitarbeiter der Werkstatt.

⁶ Die Angaben zur Wartung und Reparatur der Elektroschlepper basieren auf den Befragungen der Fahrer der Schlepper, des Leiters und Supervisors der Bodenverkehrsdienste und Mitarbeiter der Werkstatt.

tional viel Zeit und Ressourcen in Anspruch genommen. Eine größere Dimensionierung der Energiestationen als die zum Bau notwendige Leistung, ermöglichte mehr Flexibilität bei der Organisation, insbesondere beim Lademanagement, und erleichterte die weitere Elektrifizierung der Flotte in der Folge. Gleichzeitig sind damit jedoch höhere Planungs- und Investitionskosten zu einem frühen Zeitpunkt erforderlich. Das übergeordnete Ziel war beim Aufbau der Ladeinfrastruktur, dass Ladekonzepte etabliert werden können, die den operativen Betrieb der Flugzeugabfertigung nicht beeinträchtigen.

Abbildung 2-8: Lagepläne zur Stromversorgung (Energiestationen) der elektrischen Vorfeldbusse und -schlepper der FSG und LAS



Quelle: FSG

Zwischenfazit

Die technischen Herausforderungen beim Aufbau der Ladeinfrastruktur stellen kein grundsätzliches Hemmnis für den Einstieg in die Flottenelektrifizierung dar, da sich in den meisten Fällen pragmatische Lösungen finden lassen. Die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur sind im Vergleich zu Fahrzeuganschaffung und laufenden Kosten nur ein untergeordneter Kostenblock (s. Abschnitt 4.2). Dennoch ist der Einsatz von Kosten und Personalressourcen für die Planung der Ladeinfrastruktur und die Startphase des Einsatzes nicht zu unterschätzen. Eine proaktive Herangehensweise und ausreichend Reserven in der Dimensionierung (Anzahl der Ladepunkte, Auslegung des Netzanschlusses etc.) werden empfohlen, um für die Anschaffung weiterer Fahrzeuge Kapazitäten vorzuhalten. Zudem wird so die Gefahr minimiert, dass bei den Nutzern die neue Technologie durch Anlaufschwierigkeiten diskreditiert wird.

2.4. Energiewirtschaftliche Integration der Elektrofahrzeuge

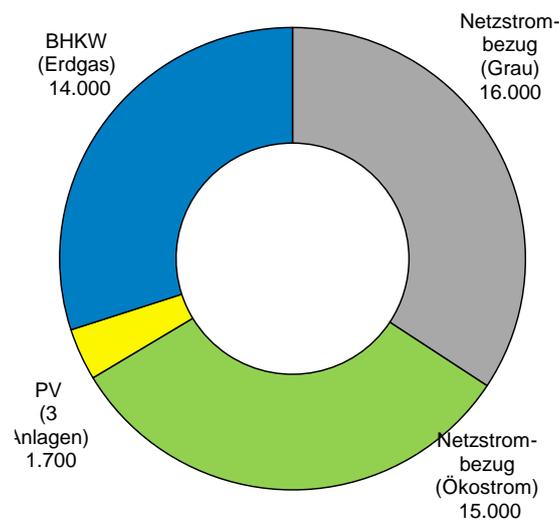
Die E-Fahrzeuge auf dem Vorfeld des Flughafen Stuttgart werden ausschließlich auf dem Betriebsgelände des Flughafens geladen. Der Ladestromverbrauch muss daher in das lokale

Stromsystem des Flughafens, welches von Eigenerzeugung und einem großen bestehenden Verbrauch geprägt ist, integriert werden.

Erzeugung und Verbrauch von Elektrizität am Flughafen Stuttgart

Der absolute Strombedarf des Flughafens beträgt ca. 47.000 MWh im Jahr 2016. Wesentliche Stromverbrauchsgruppen sind die Wärme- und Kälteerzeugung sowie die Beleuchtung. Der Strombedarf wird durch eine Mischung aus Eigenerzeugung und einem Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt. Abbildung 2-9 stellt Eigenerzeugungsarten und den Strombezug aus dem Netz dar.

Abbildung 2-9: Eigenerzeugung und Strombezug des Flughafens Stuttgart



Quelle: Energiebericht Flughafen Stuttgart, Angaben vom Flughafen Stuttgart

Zur Deckung des Strombedarfs werden etwa zwei Drittel des benötigten Stroms (ca. 31.000 MWh) durch einen Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt (Anschluss auf 12 kV-Ebene). Der Flughafen bezieht hierzu vertraglich Strom aus erneuerbaren Energien ohne weitere Qualitätsanforderungen (z. B. Ökostromzertifizierungen). Der verbleibende Strombedarf wird durch Eigenerzeugung gedeckt. Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) auf Erdgas-Basis mit knapp 2 MW Leistung erzeugt ca. 14.000 MWh pro Jahr. Neben dem BHKW erzeugen drei Photovoltaik-Anlagen auf dem Flughafengelände mit einer Gesamtleistung von 2,1 MW_{peak} ca. 1.700 MWh pro Jahr. Der Flughafen plant seine Eigenerzeugung in den nächsten Jahren weiter auszubauen und bis zum Jahr 2025 eine Photovoltaik-Eigenstromnutzung von 11.000 MWh zu erreichen.

Integration der E-Fahrzeuge

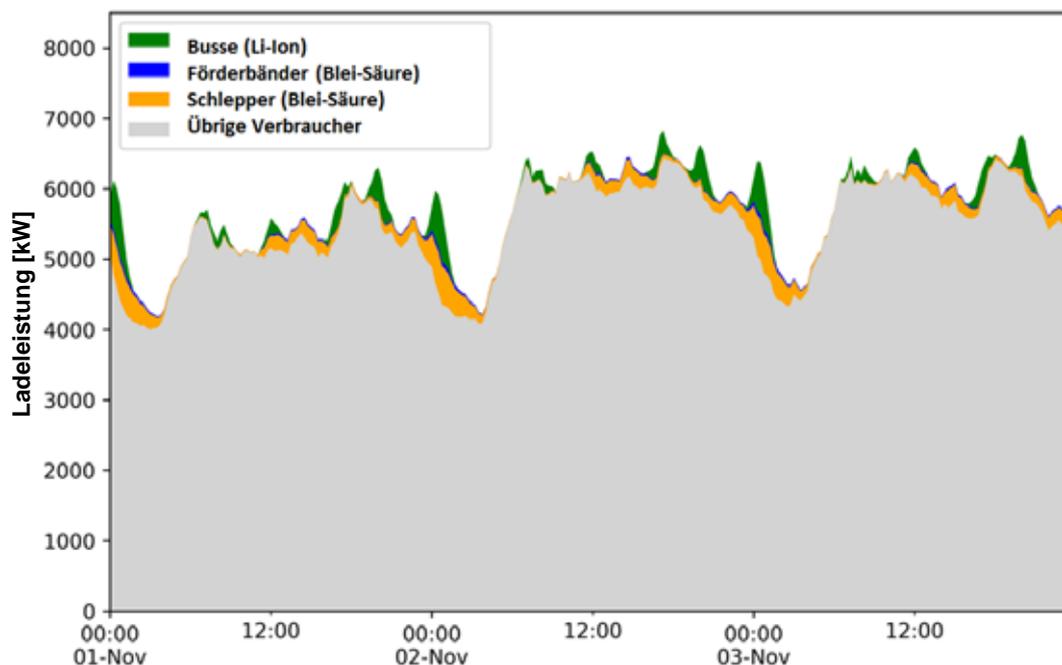
Mit dem geplanten Ausbau der E-Fahrzeugflotte im Rahmen des Projekts „scale up!“ wird der Strombedarf der Fahrzeuge bis zum Projektende im Jahr 2019 auf ca. 2.100 MWh pro Jahr ansteigen.⁷ Der zusätzlich benötigte Ladestrom macht somit nur einen Bruchteil des Jahresverbrauchs aus. Allerdings können, wenn zahlreiche Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden, deutliche Last-

⁷ Hierbei wird von einer E-Fahrzeugflotte auf dem Flughafen Vorfeld von insgesamt 98 Fahrzeugen (16 Vorfeldbusse, 23 Förderbänder, 58 Vorfeldschlepper und ein High-Loader) ausgegangen. Diese Anzahl an Fahrzeugen soll nach Projektabschluss im Jahr 2019 am Flughafen insgesamt in Betrieb sein.

spitzen entstehen. Wenn durch diese Lastspitzen die maximale Jahresnetzlast steigt, können die an den Netzbetreiber (Netze BW) zu zahlenden Netzentgelte deutlich ansteigen.⁸ Die Summe der Ladeleistungen aller E-Fahrzeuge beträgt Anfang 2019 ca. 2.500 kW. Wie groß der Anstieg der jährlichen Maximallast ist, hängt zum einen davon ab, wie viele Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden, und zum anderen davon, wie groß die Nachfrage anderer Stromverbraucher am Flughafen zu dem entsprechenden Zeitpunkt ist.

Um das Ausmaß dieser Effekte abzuschätzen, wurde eine Simulation der Ladevorgänge aller Fahrzeuge durchgeführt (Abbildung 2-10). Der maximale Ladestrombedarf besteht nachts (die letzte Schicht endet um 24 Uhr). Das größte Potenzial zur Erhöhung der Gesamtlast haben jedoch die Ladevorgänge, die tagsüber, insbesondere nachmittags, stattfinden. Entscheidend ist hier das Ladeverhalten der Busse, die auf Grund der begrenzten Speicherkapazität der eingesetzten Li-Ionen-Akkus mehrfach im Tagesverlauf nachladen müssen und auf Grund der Schnellladefähigkeit hohe Lastspitzen verursachen. Langfristig, wenn auch die aktuell mit Blei-Säure-Akkus ausgestatteten Fahrzeuge durch solche mit Li-Ionen-Akkus ersetzt werden, ist davon auszugehen, dass Ladevorgänge tagsüber noch deutlich häufiger stattfinden werden.

Abbildung 2-10: Simulation des Ladeverhaltens der E-Fahrzeuge



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Es wurde geprüft, mit welchen Strategien die negativen Auswirkungen des Ladens der E-Fahrzeuge minimiert werden können. Eine gezielte Steuerung des Ladeverhaltens der Fahrzeuge wurde dabei zum jetzigen Zeitpunkt als nicht realistisch bewertet, da insbesondere die Busse bei der aktuellen Batteriegröße auf mehrfaches Zwischenladen im Tagesgang angewiesen sind und Verzögerungen im Betriebsablauf auf Grund von Nichtverfügbarkeiten von Fahrzeugen nicht akzeptabel sind. Auch eine Begrenzung der Ladeleistungen nach Betriebsende ist nicht zielführend, da die maximalen Lastspitzen tagsüber auftreten.

⁸ Der Leistungspreis für 2019 liegt bei ca. 90 €/kW (www.netze-bw.de/unternehmen/veroeffentlichungen#3-1-1)

Eine Möglichkeit zur kurzfristigen Optimierung der Lastgänge ist die Flexibilisierung anderer Stromverbraucher. Am Flughafen Stuttgart wird bereits ein aktives Lastmanagement zur Vermeidung von Lastspitzen betrieben. Ebenfalls möglich ist perspektivisch der Einsatz stationärer Speicher, um Lastspitzen zu glätten. Die hohen Anschaffungskosten können durch die Einsparungen seitens der Netzentgelte zumindest teilweise ausgeglichen werden.

Zwischenfazit

Zwar ist die zusätzliche Stromnachfrage durch die Elektrifizierung der Vorfeldflotte im Verhältnis zum Gesamtstrombedarf des Flughafens vernachlässigbar, jedoch treten bereits heute durch die Elektrofahrzeuge verursachte zusätzliche Lastspitzen auf. Um erhöhten Netzentgelten entgegenzuwirken, wird die Flexibilität anderer Stromverbraucher durch eine Lastverschiebung genutzt. Auf ein Lademanagement der Elektrofahrzeuge wird hingegen bisher aus betrieblichen Gründen verzichtet. Der flächendeckende Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien mit größerer Batteriekapazität und schnellerer Ladung schafft diesbezüglich perspektivisch einen größeren Möglichkeitsraum.

3. Umweltbewertung

3.1. Vorgehen und Methodik

Wesentliches Ziel der Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart ist die Reduktion der Umwelteffekte, vor allem der CO₂- und Luftschadstoffemissionen und der Lärmbelastung. Die Erfahrungen der Fahrer der elektrifizierten Fahrzeuge und der Werkstattmitarbeiter zeigen, dass die geringere Schadstoff- und Lärmbelastung spürbar ist und als sehr positiv wahrgenommen wird.

Es werden zudem die Ergebnisse der Umweltbewertung für ausgewählte Fahrzeugkategorien dargestellt (siehe Kapitel 3.3). Ziel ist es, die Umweltwirkungen möglichst umfassend, d. h. unter Berücksichtigung von Herstellung, Nutzung und Entsorgung, im Vergleich zum jeweiligen konventionellen Fahrzeugpendant zu bewerten. Grundlage bei der Ermittlung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase ist der deutsche Strommix 2020. So können die Ergebnisse auf den Einsatz vergleichbarer Fahrzeuge an anderen Standorten in ganz Deutschland übertragen werden. In der Fahrzeugbewertung wird in der Kategorie Treibhauspotenzial ein Balken dargestellt, der anzeigt, wie hoch die Emissionen in der Nutzungsphase bei Anrechnung des Standortmix wären.

3.2. CO₂-Emissionen der Strombereitstellung

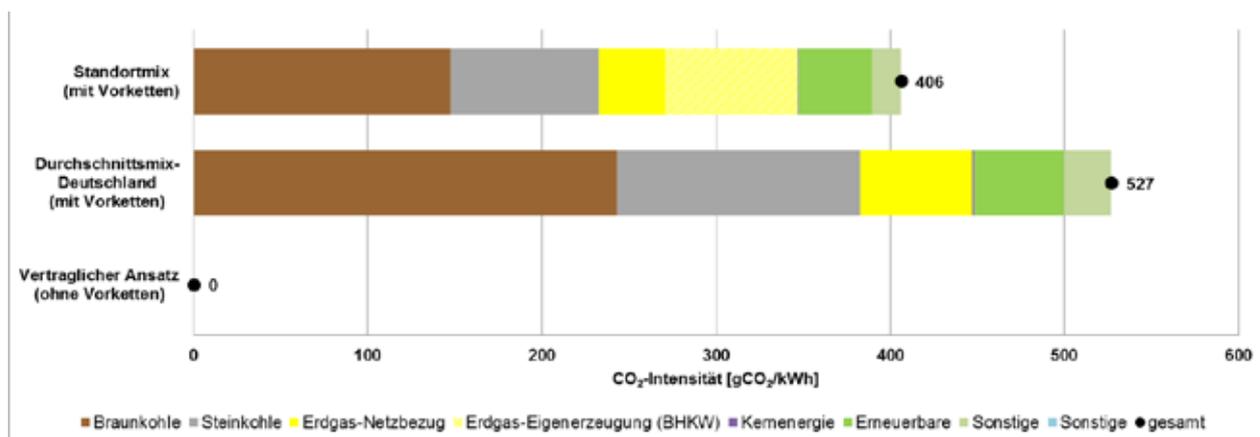
Bei der Umweltbewertung von Elektrofahrzeugen hat der Erzeugungsmix des Ladestroms einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der CO₂-Emissionen in der Gesamtbilanz der Fahrzeuge. Bei einem Strombezug ist es in der Regel nicht möglich, verbrauchten Strom zu seinem Erzeugungskraftwerk physisch „nachzuverfolgen“. Aus diesem Grund müssen für die Strombilanzierung Ansätze angewendet werden, welche eine zuverlässige Zuordnung von Erzeugungsqualitäten sicherstellen. Für die Emissionsbilanzierung eines Stromverbrauchs existiert keine einheitliche Methodik und die bestehenden Bilanzierungsansätze können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. So reduziert z. B. eine Anrechnung von Null-Emissionen für einen einfachen Strombezug aus erneuerbaren Energien die Anreize für Effizienzsteigerungen, da keine Verbesserungen der Emissionsbilanz mehr erreicht werden können. Energiewirtschaftliche Analysen zeigen zudem, dass ein vertraglicher Ökostrombezug aus erneuerbaren Energien nicht per se mit positiven Um-

welteffekten verbunden ist.^{9 10} Nur bei einem hochwertigen Ökostrombezug werden emissionsreduzierende Effekte erzielt, weshalb auch nur ein solcher Strombezug positiv in der Strombilanzierung berücksichtigt werden sollte.¹¹

Um die Effekte unterschiedlicher Bilanzierungsansätze zu vergleichen, wurden im Projekt drei verschiedene Bilanzierungsansätze analysiert und auf die Strombilanzierung am Flughafen Stuttgart angewendet:

- **Vertragsbasierter Mix:** Grundlage sind die Strombezugsverträge des Flughafen Stuttgart. Vorketten werden nicht berücksichtigt; Bezug von erneuerbar erzeugtem Strom mit Herkunftsnachweis wird als emissionsfrei betrachtet.
- **Durchschnittsmix:** Grundlage sind die durchschnittlichen Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland
- **Standortmix:** Grundlage ist die Eigenerzeugung (sofern diese auch selbst verbraucht wird) sowie bei einem Netzstrombezug die durchschnittlichen Emissionen der nationalen Erzeugung. Darüber hinaus wird bei einem hochwertigen Ökostrombezug für den Netzstrombezug diese positiv berücksichtigt.¹²

Abbildung 3-1: CO₂-Emissionsfaktoren der Bilanzierungsansätze



Durchschnitt über den Nutzungszeitraum der Fahrzeuge (2016-2025, ohne Netzverluste).

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Abbildung 3-1 zeigt, dass die verschiedenen Bilanzierungsansätze am Flughafen Stuttgart zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich des Anteils erneuerbarer Energien und der durchschnittlichen

⁹ Seebach, Dominik (2015): Electricity Disclosure and Carbon Footprinting: Effects and incentives resulting from different approaches to account for electricity consumption in carbon footprints. Deliverable 6.2 of the RE-DISS II Project. Unter Mitarbeit von Christof Timpe. Hg. v. RE-DISS II. Online verfügbar unter http://www.reliable-disclosure.org/upload/112-RE-DISSII_D6-2_Disclosure-Carbon-Footprinting_final.pdf.

¹⁰ Brander, Michael; Gillenwater, Michael; Ascuri, Francisco (2018): Creative accounting: A critical perspective on the market-based method for reporting purchased electricity (scope 2) emissions. In: Energy Policy (112), S. 29–33.

¹¹ Timpe, Christof; Bracker, Joß; Hacker, Florian; Haller, Markus; Kasten, Peter (2017): Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. Enderbericht zum „Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität“ (Vergabenummer 16EM2111) im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Öko-Institut e.V. Freiburg, Berlin

¹² Pehnt, Martin; Seebach, Dominik; Irrek, Wolfgang; Seifried, Dieter (2009): Umweltnutzen von Ökostrom – Vorschlag zur Berücksichtigung in Klimaschutzkonzepten. Diskussionspapier.

lichen CO₂-Emissionsfaktoren führen. Beim vertragsbasierten Mix entspricht der Anteil erneuerbarer Energien (EE) 100 % und die Stromerzeugung ist damit emissionsfrei. Bei Anwendung des Durchschnittsmix beträgt der EE-Anteil 43,1 % und die CO₂-Emissionen 527 gCO₂/kWh. Beim Standortmix liegt der EE-Anteil bei 35,9 % und die CO₂-Emissionen betragen 406 gCO₂/kWh.

3.3. Umweltbewertung über den gesamten Lebensweg für ausgewählte Fahrzeugkategorien

Für die Umweltbewertung wurden Primärdaten der Fahrzeughersteller (CaetanoBus (Cobus) und Siemens für die Busse sowie VOLK Fahrzeugbau GmbH für die Vorfeldschlepper), der Batteriehersteller (ACTIA I+ME GmbH für die Li-Ionen-Batterie des Elektrobusses sowie Hawker GmbH für die Blei-Säure-Batterie des Elektroschleppers) sowie der Fahrzeugbetreiber (Flughafen Stuttgart GmbH sowie Losch Airport Service Stuttgart GmbH) gesammelt. Die Qualität der Daten ist sehr gut, somit sind die Ergebnisse der Bilanzierung sehr verlässlich.

Die funktionelle Einheit der Umweltbewertung ist die gesamte Nutzungsdauer des jeweiligen Fahrzeugs. Für die Busse wurde eine Nutzungsdauer von 15 Jahren angenommen, für Vorfeldschlepper zehn Jahre. Da der Betrieb der Fahrzeuge vom Referenzjahr 2015 aus gesehen in der Zukunft liegt, wurde für den Strom der Durchschnittsmix der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2020 angesetzt, um die Veränderungen in der Strombereitstellungskette für die nahe Zukunft abzubilden (geringerer Kohleanteil, höherer Anteil erneuerbarer Energien und dadurch sinkende Emissionen).

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse für die Vorfeldbusse und die Vorfeldschlepper dargestellt. In allen Wirkungskategorien werden die jeweiligen relevanten Emissionen über sogenannte Charakterisierungsfaktoren auf den jeweiligen Wirkungsindikator (z. B. CO₂-Äquivalente) umgerechnet. In der Wirkungskategorie **Treibhauspotenzial** (Global Warming Potential – GWP, Wirkungsindikator Kohlenstoffdioxid-Äq.) werden die klimarelevanten Emissionen quantifiziert, welche zu einer globalen Erwärmung führen können. Mit dieser Kategorie werden die relevanten Emissionen dargestellt, die z. B. bei der Bereitstellung von Strom und Metallen CO₂ aus Kohlenstoffträgern freigesetzt werden.

In der Kategorie **Versauerungspotenzial** (Acidification Potential – AP, Wirkungsindikator Schwefeldioxid-Äq.) werden diejenigen Emissionen quantifiziert, welche zu einer Senkung des pH-Wertes und somit zu einer Versauerung der Umwelt führen. Die Kategorie ist deswegen für die Bewertung von Verbrennungs- und elektrischen Antrieben relevant, weil bei Verbrennungsprozessen (wie im Motor) saure Emissionen entstehen.

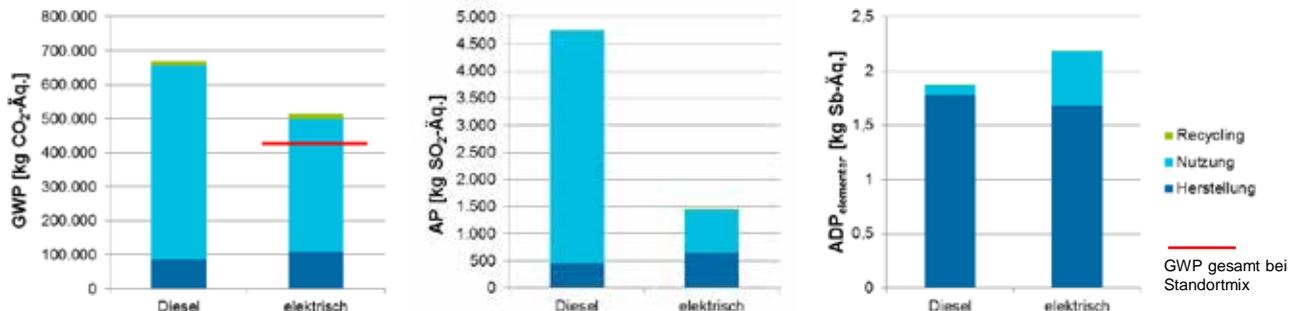
In der Kategorie **abiotischer Ressourcenverbrauch** (Abiotic Resource Depletion – ADP_{elementar}, Wirkungsindikator Antimon-Äq.) wird der Ressourcenverbrauch an Metallen und mineralischen Rohstoffen abgebildet. Verbrennungs- und elektrische Antriebe haben einen deutlich unterschiedlichen Ressourcenbedarf, der über diese Kategorie verglichen werden kann.

Vergleich Vorfeldbusse

In Abbildung 3-2 sind die Ergebnisse der drei betrachteten Wirkungskategorien für die Diesel- und die batterieelektrische Fahrzeugvariante gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass in der Kategorie GWP die Nutzungsphase dominiert, während für die Kategorie ADP_{elementar} die Herstellungsphase den größten Beitrag liefert. In der Kategorie AP ist ein deutlicher Unterschied zwischen Diesel- und Elektrobuss zu beobachten. Während beim Dieselbus die Nutzungsphase deutlich überwiegt, sind beim Elektrobuss die Anteile von Nutzung und Herstellung annähernd gleich. Für die Kategorie

GWP ist dargestellt, wieviel geringer die Gesamtemissionen des elektrischen Fahrzeugs bei Ansatz des Standortmix des Flughafens Stuttgart mit einem höheren EE-Anteil wären.

Abbildung 3-2: Vorfelddbus – Treibhauspotenzial (links), Versauerungspotenzial (Mitte) und abiotischer Ressourcenverbrauch (rechts)



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung auf Basis der Materialdaten von Siemens, CaetanoBus und ACTIA sowie Verbrauchsdaten der FSG

Dieselsbus: Der größte Beitrag in der Kategorie GWP aus der Nutzungsphase stammt aus der Verbrennung des Dieselmotors (100 % inklusive 15 % Bereitstellung des Kraftstoffs). Der größte Beitrag in der Kategorie AP aus der Nutzungsphase stammt aus der Verbrennung des Kraftstoffs (100 % inklusive 20 % Bereitstellung des Kraftstoffs). Der größte Beitrag in der Kategorie ADP_{elementar} der Herstellungsphase stammt aus der Herstellung des Aluminiums (~50 %)

Elektrobuss: Die größten Beiträge in der Kategorie GWP aus der Nutzungsphase stammen aus der anteiligen Bereitstellung von Strom aus Braunkohle (~45 %) sowie Steinkohle (~25 %). Die größten Beiträge in der Kategorie AP aus der Nutzungsphase stammen aus der anteiligen Bereitstellung von Strom aus Braunkohle (~30 %) sowie aus Biogas (~20 %). In der Herstellungsphase stammt der größte Anteil aus der Aluminiumherstellung (~55 %). Die größten Beiträge in der Kategorie ADP_{elementar} der Herstellungsphase stammen aus der Herstellung der Elektronik (~40 %) und von Kupfer (~30 %).

Vergleich: In der **Kategorie GWP** verursacht die Elektroversion des Vorfelddbusses bei Ansatz des deutschen Durchschnittsmix für die Stromerzeugung über den gesamten Lebensweg 23 % weniger Emissionen als die Dieselvariante. Dies lässt sich vor allem durch die Energieeffizienz im Betrieb erklären (60 % geringerer Energiebedarf). Die Elektroversion verursacht in der Nutzungsphase mehr als 40 % geringere Emissionen als die Dieselvariante, während die Herstellungsphase der Elektroversion etwa 30 % mehr Emissionen auslöst. Bei Ansatz des Standortmix steigt der Klimavorteil des E-Fahrzeugs über die gesamte Lebensdauer auf 37 % an.

In der **Kategorie AP** ist der Vorteil der Elektroversion noch deutlicher, da hier 70 % weniger Emissionen als bei der Dieselvariante entstehen. Auch hier sind die Energieeffizienz und der geringere Anteil an Verbrennungsprozessen in der Energiebereitstellung (Diesel 100 % vs. 56 % im Strommix 2020) die entscheidenden Faktoren, die zu 80 % geringeren Emissionen in der Nutzungsphase führen. In der Herstellungsphase verursacht die Elektroversion 40 % mehr Emissionen auf Grund des höheren Kupferbedarfs.

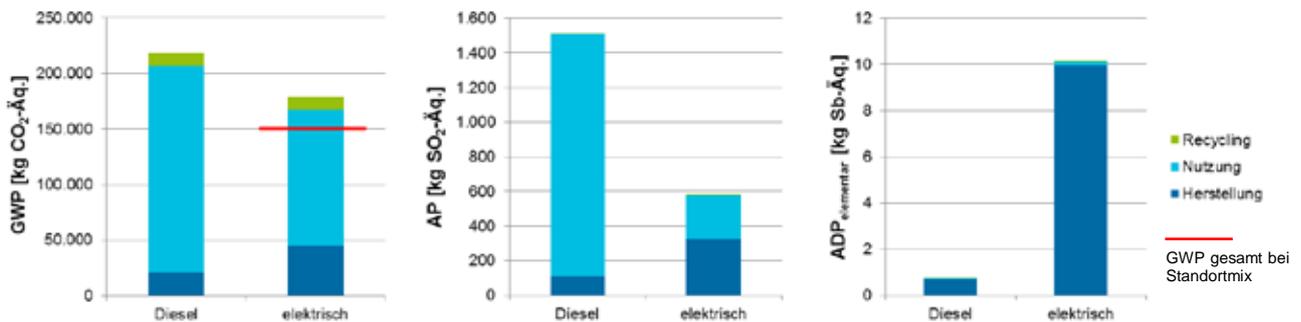
In der **Kategorie ADP_{elementar}** ruft der Elektrobuss rund 16 % mehr Ressourcenbedarf als die Dieselvariante hervor. Während in der Herstellungsphase der Elektrobuss auf Grund des fehlenden Motorblocks aus Gussaluminium noch rund 6 % besser abschneidet, verursacht die Strombereitstellung, hier vor allem die Herstellung von Solarzellen, einen deutlich höheren Ressourcenbedarf.

Vergleich Vorfeldschlepper

In Abbildung 3-3 sind die Ergebnisse der drei betrachteten Wirkungskategorien für Vorfeldschlepper mit Diesel- bzw. batterieelektrischem Antrieb (hier auf Blei-Säure-Basis) gezeigt. Es ist zu sehen, dass in der Kategorie GWP ebenfalls die Nutzungsphase dominiert, während für die Kategorie ADP_{elementar} die Herstellungsphase den größten Beitrag liefert.

In der Kategorie AP ist ein deutlicher Unterschied zwischen Diesel- und Elektroschlepper zu beobachten. Während beim Dieselbus die Nutzungsphase deutlich überwiegt, sind beim Elektrobus die Anteile von Nutzung und Herstellung annähernd gleich. Für die Kategorie GWP ist dargestellt, wieviel geringer die Gesamtemissionen der elektrischen Variante bei Ansatz des Standortmix des Flughafens Stuttgart wären.

Abbildung 3-3: Vorfeldschlepper – Klimaerwärmungspotenzial (links), Versauerungspotenzial (Mitte) und abiotischer Ressourcenverbrauch (rechts)



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung auf Basis der Materialdaten von Volk sowie Verbrauchsdaten der FSG und LAS

Dieselschlepper: Der größte Beitrag in der Kategorie GWP aus der Nutzungsphase stammt aus der Verbrennung des Dieselmotors (100 % inklusive 15 % Bereitstellung des Kraftstoffs). Der größte Beitrag in der Kategorie AP aus der Nutzungsphase stammt aus der Verbrennung des Dieselmotors (100 % inklusive 20 % Bereitstellung des Kraftstoffs). Der größte Beitrag in der Kategorie ADP_{elementar} der Herstellungsphase stammt aus der Herstellung der Elektronik (~50 %).

Elektroschlepper: Die größten Beiträge in der Kategorie GWP aus der Nutzungsphase stammen aus der anteiligen Bereitstellung von Strom aus Braunkohle (~45 %) sowie Steinkohle (~25 %). Die größten Beiträge in der Kategorie AP aus der Nutzungsphase stammen aus der anteiligen Bereitstellung von Strom aus Braunkohle (~30 %) sowie aus Biogas (~20 %), aus der Herstellungsphase stammen die größten Anteile aus der Bleiherstellung (~30 %) und aus der Kupferherstellung (~25 %). Der größte Beitrag in der Kategorie ADP_{elementar} der Herstellungsphase stammt aus der Herstellung des Bleis (~85 %).

Vergleich:

In der **Kategorie GWP** verursacht die Elektroversion des Vorfeldschleppers 18 % weniger Emissionen als die Dieselvariante. Dies lässt sich vor allem durch die Energieeffizienz des Elektromotors erklären (60 % geringerer Energiebedarf). Deshalb hat die Elektroversion in der Nutzungsphase gut ein Drittel geringere Emissionen als die Dieselvariante, während die Herstellungsphase der Elektroversion doppelt so viele Emissionen verursacht wie die Dieselversion. Bei Ansatz des Standortmix steigt der Klimavorteil des E-Fahrzeugs auf 31 % an.

In der **Kategorie AP** ist der Vorteil der Elektroversion noch deutlicher, da hier gut 60 % weniger Emissionen als bei der Dieselve Variante entstehen. Auch hier sind die Energieeffizienz und der geringere Anteil an Verbrennungsprozessen in der Energiebereitstellung (Diesel 100 % vs. 56 % im Strommix 2020) die entscheidenden Faktoren, die zu gut 60 % geringeren Emissionen in der Nutzungsphase führen. In der Herstellungsphase verursacht die Elektroversion 300 % mehr Emissionen auf Grund des deutlich höheren Bleibedarfs.

In der **Kategorie ADP_{elementar}** hat der Elektroschlepper einen vierzehn Mal höheren Ressourcenbedarf als die Dieselve Variante. Dieser drastisch höhere Bedarf kommt fast ausschließlich aus der Herstellungsphase und lässt sich mit dem hohen Bleibedarf für die Herstellung der Batterie erklären.

Zwischenfazit

Die Umweltbewertung von Vorfeldebussen und -schleppern auf Basis der heutigen Nutzung und detaillierten Daten zur Fahrzeugzusammensetzung zeigt, dass die elektrischen Varianten bereits mit dem Strommix 2020 über den gesamten Lebensweg (inkl. Herstellung und Entsorgung) in den Kategorien Treibhauspotenzial und Versauerungspotenzial einen klaren Vorteil gegenüber der jeweiligen Dieselve Variante haben. Dieser wird in den kommenden Jahren im Zuge der Dekarbonisierung des Stromsystems weiter zunehmen. Beim Ressourcenbedarf schneidet die Li-Ionen-Variante des Vorfeldebusses geringfügig schlechter ab als die Dieselve Version. Durch die Dekarbonisierung des Stromsystems kann sich diese Relation aufgrund des Zubaus von Solaranlagen geringfügig weiter verschlechtern. Besonders die Blei-Säure-Variante des Vorfeldschleppers verursacht einen deutlich erhöhten Ressourcenbedarf. Der Austausch der Batterie durch eine Li-Ionen-Variante würde hier zu deutlichen Ressourceneinsparungen führen und den Bedarf des Schleppers unter den eines Busses senken.

4. Wirtschaftlichkeit des Betriebs von Elektrofahrzeugen

4.1. Vorgehen und Methodik

Mithilfe von Daten der Fahrzeug- und Infrastrukturhersteller sowie der beiden Flottenbetreiber wurden Wirtschaftlichkeitsvergleiche zwischen batterieelektrischer und verbrennungsmotorischer Variante für Vorfeldebuse und -schlepper durchgeführt. Dabei wurde die TCO-Methodik verwendet.

Gesamtbetriebskosten – Total Cost of Ownership (TCO)

Sollen sich elektrische Antriebe in der Vorfeldmobilität durchsetzen, so ist deren wirtschaftlicher Betrieb für die Unternehmen eine zentrale Voraussetzung. Angesichts der veränderten Kostenstruktur zwischen elektrischem und konventionellem Antrieb – insbesondere der Veränderung des Verhältnisses von Energie- zu Investitionskosten – ist eine Betrachtung des gesamten Nutzungszeitraums notwendig. Im Rahmen des Projekts „scale up!“ wurden auf Basis der tatsächlich eingesetzten Fahrzeuge entsprechende Analysen durchgeführt.

Die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs wird auf Basis der Gesamtbetriebskosten (TCO) bewertet. Hierbei werden sämtliche Kosten berücksichtigt, die über den gesamten Nutzungszeitraum des Fahrzeugs anfallen:

- Kosten der Fahrzeuganschaffung (inkl. Finanzierungskosten)
- Kosten des Fahrzeugbetriebs (Energiekosten, Reparatur- und Wartungskosten) sowie

- ggf. Restwert des Fahrzeugs nach Außerbetriebnahme

Die TCO werden gemäß Haendel et al. (2015)¹³ mit der folgenden Formel berechnet:

$$TCO = \text{Investitionskosten} - \text{AfA der Investition} + \text{Betriebskosten} - \text{AfA der Betriebskosten}$$

Die Abkürzung AfA steht hierbei für „Absetzung für Abnutzung“ und wird häufig auch einfach als „Abschreibung“ bezeichnet. Die Investitionskosten werden gemäß der aktuellen Rechtslage linear über den Abschreibungszeitraum „abgeschrieben“ (AfA in gleichen Jahresbeträgen), d. h. vom Betriebsvermögen des Betreibers abgezogen.

Kosten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, werden betriebswirtschaftlich unterschiedlich bewertet und können deshalb nicht direkt miteinander verrechnet werden. Diese Problematik wird mit den folgenden zwei Ansätzen berücksichtigt:

- Investitionsrechnung mit der Annuitätenmethode und
- Inflationsbereinigung¹⁴.

Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode ist ein Berechnungsverfahren der klassischen, dynamischen Investitionsrechnung, bei dem die Investitionskosten¹⁵ gleichmäßig auf die Nutzungsdauer des betreffenden Wirtschaftsguts¹⁶ verteilt werden. Die Umwandlung der Investitionskosten in die sogenannte Annuität wird an Hand des Kalkulationszinses vorgenommen. Die Annuitätenmethode entspricht somit der Berechnung eines Annuitätendarlehens mit den folgenden Eigenschaften:

- Kreditbetrag = Fahrzeugpreis (netto)
- Kreditlaufzeit = Fahrzeug-Nutzungsdauer
- Zinssatz = Kalkulationszins
- Kreditrate = Annuität

Rahmendaten

Den Kostenrechnungen liegen die in Tabelle 4-1 dargestellten Annahmen zu ökonomischen, energiewirtschaftlichen und fahrzeugbezogenen (Batterie) Rahmenbedingungen zu Grunde, die die Situation am Flughafen Stuttgart näherungsweise beschreiben.

¹³ Haendel, Michael; Gnann, Till; Plötz, Patrick (2015): Fuhrparkoptimierung für Elektrofahrzeuge. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 11/15. Hg. v. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2015/WP11-2015_Haendel_Gnann_Ploetz_Fuhrparkoptimierung.pdf

¹⁴ Sämtliche Kosten (Betriebsausgaben, Annuitäten der Investitionskosten und AfA), die in zukünftigen Jahren anfallen, werden anhand der angenommenen Inflationsrate in €₂₀₁₈ umrechnet.

¹⁵ hier: Fahrzeugpreis (netto) bzw. Kosten der Ladeinfrastruktur (netto)

¹⁶ hier: Fahrzeug bzw. Ladeinfrastruktur

Tabelle 4-1: Annahmen für die TCO-Berechnungen

Übergeordnete Rahmendaten		
Inflationsrate	1,7 % p.a.	
Kalkulationszins	6 % p.a.	
Unternehmenssteuersatz	30 %	

Energiepreise (netto)	Jahr 2018	Zukünftige Preisentwicklung (nominal)
Strompreis	15 ct/kWh	Steigerung um 1 % p.a.
Dieselpreis	12 ct/kWh*	Steigerung um 2 % p.a.

Batterieparameter	Batteriepreis (netto)	Kalkulierte technische Nutzungsdauer*
Lithium-Ionen-Batterie	1.000 €/kWh	15 Jahre
Blei-Säure-Batterie	90 €/kWh	5 Jahre

* entspricht ca. 1,20 €/Liter

* anschließend ist ein Austausch der Batterie erforderlich

Quelle: Öko-Institut, eigene Annahmen basierend auf Informationen von FSG und LAS

Ladeinfrastruktur

Die Umstellung auf Elektrofahrzeuge erfordert Investitionen in eine neue Energieversorgungsinfrastruktur. Um einen ganzheitlichen Kostenvergleich sicherzustellen, werden daher auch die Infrastrukturinvestitionen anteilig beim Kostenvergleich auf Fahrzeugebene berücksichtigt. Die verwendeten Kostensätze enthalten die Hardware der Ladestation, Trafo, Netzanschluss und Planungskosten. Bei der Ladeinfrastruktur wird einheitlich eine Nutzungsdauer von 30 Jahren angenommen.

Die Ladepunkte sind nicht eindeutig einzelnen Fahrzeugen zugeordnet und auch die geladenen Strommengen können nicht pro Fahrzeug bilanziert werden. Daher werden in den folgenden TCO-Berechnungen die Investitionskosten der Ladeinfrastruktur anteilig entsprechend der jeweiligen fahrzeugseitig maximal möglichen Ladeleistung den einzelnen Fahrzeugen zugeordnet.

4.2. Gesamtbetriebskosten für ausgewählte Fahrzeugklassen (inkl. Ladeinfrastruktur)

Vorfelddbus

Für den TCO-Vergleich zwischen dem Elektrobus und dem Dieselpassierbus wurden für beide Passierbus-Varianten die gleichen Nutzungsparameter angenommen, die typisch für den Fahrzeugeinsatz am Flughafen Stuttgart sind:

- Eine Nutzungsdauer von 15 Jahren und
- eine Nutzungsintensität von 10.000 Aufträgen (Jobs) pro Jahr.

Auch der Abschreibungszeitraum von acht Jahren ist für beide Antriebe identisch. Unterschiede ergeben sich hingegen bei den in Tabelle 4-2 aufgeführten Parametern:

Tabelle 4-2: Input-Parameter für die TCO-Betrachtung der Vorfeldbusse

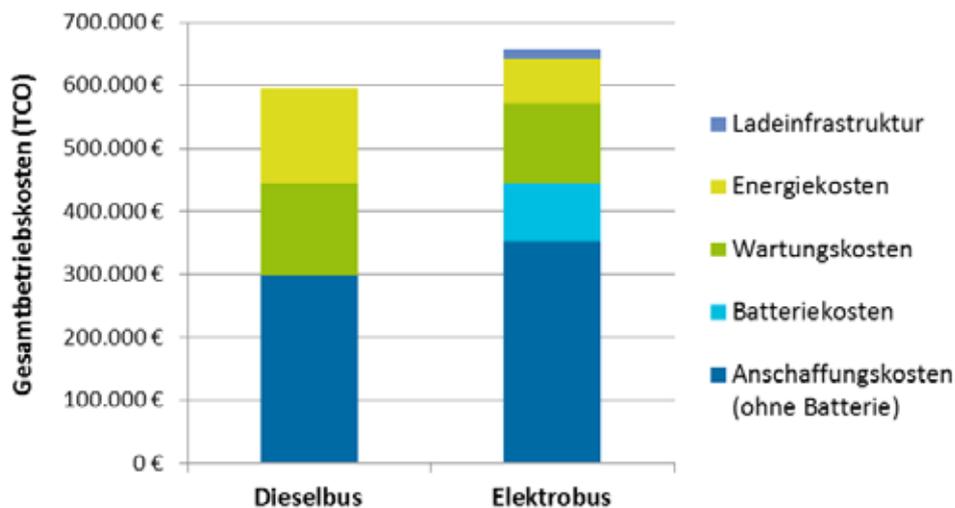
Parameter	Elektrobus	Dieselbus
Energiebedarf	47.000 kWh/a (Strom)	117.000 kWh/a (Diesel)
Batteriekapazität	84 kWh	keine*
Fahrzeugpreis	+50 % ggü. Dieselbus	
Wartungskosten	-15 % ggü. Dieselbus	
Fahrzeugrestwert	5 % des Fahrzeugpreises	4 % des Fahrzeugpreises

* nur Starterbatterie

Quelle: Öko-Institut, eigene Annahmen basierend auf Informationen der FSG

Für den Elektrobus ergibt sich aktuell ein Batteriepreis in Höhe von 84.000 €. Die Batteriekosten¹⁷ machen einen beträchtlichen Teil der Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung gegenüber dem Dieselbus aus. Auffällig ist jedoch, dass das Elektrofahrzeug auch ohne die Lithium-Ionen-Batterie in der aktuellen Marktlage für Kleinserienfahrzeuge in der Anschaffung teurer ist (siehe Abbildung 4-1). Die höheren Anschaffungskosten werden durch niedrigere Betriebskosten zum Teil ausgeglichen, vor allem durch die geringeren Energiekosten, die um mehr als die Hälfte sinken. Bei den Wartungskosten wird für Diesel- bzw. E-Fahrzeug jeweils ein Full-Service-Vertrag angesetzt, der auch Reparaturen umfasst, jedoch keine Unfall- und Gewaltschäden. Insgesamt erzielt hier der E-Bus Einsparungen von 15 % gegenüber dem Dieselfahrzeug.

Abbildung 4-1: Gesamtbetriebskosten (TCO) über den Nutzungszeitraum der Busse (15 Jahre) in €₂₀₁₈ zzgl. der anteiligen Kosten für die Ladeinfrastruktur



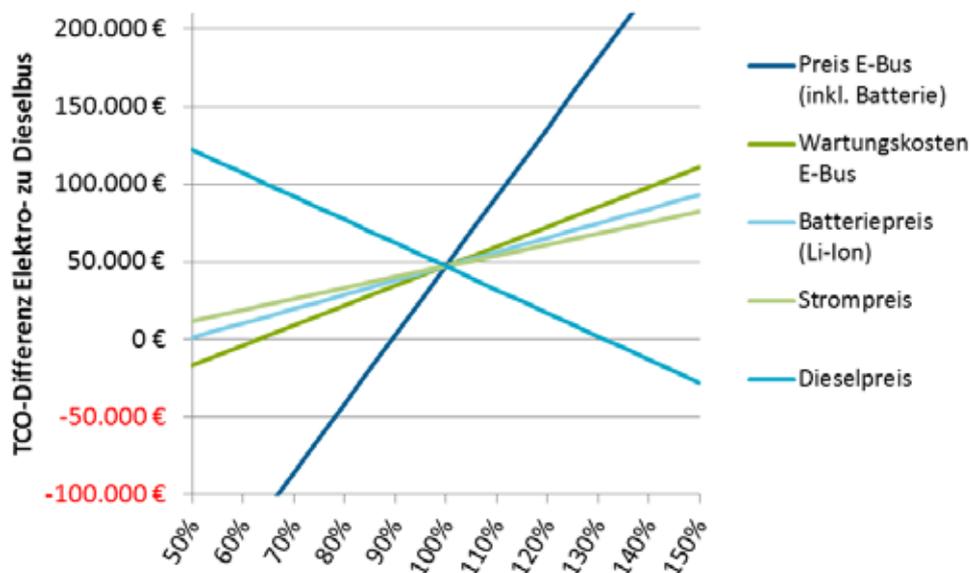
Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung

¹⁷ Die Batteriekosten ergeben sich aus den folgenden Rechenschritten: Zunächst wird der Batteriepreis mit Hilfe des Kalkulationszinses in jährliche Annuitäten umgerechnet (ca. 8.650 €/a über 15 Jahre). Die Annuitäten werden anschließend in den Wertmaßstab €₂₀₁₈ umgerechnet und ergeben in Summe ca. 115.600 €₂₀₁₈. Von diesem Betrag wird zum Schluss noch die AfA (auf den Batteriepreis) abgezogen, so dass sich schlussendlich Batteriekosten in Höhe von ca. 92.000 €₂₀₁₈ ergeben, die in Abbildung 4-1 dargestellt sind. Ein Batterieersatz während der Nutzungsdauer von 15 Jahren ist beim Vorfeldbus nicht erforderlich.

Unter dem Strich verbleiben bei aktuell verfügbaren Fahrzeugen Mehrkosten¹⁸ von knapp 50.000 €₂₀₁₈ über den gesamten Nutzungszeitraum von 15 Jahren bzw. etwa 3.100 €₂₀₁₈ pro Jahr. Hinzu kommen noch die Kosten für die Ladeinfrastruktur der Elektrobusse, die unter den getroffenen Annahmen¹⁹ mit etwa 15.000 €₂₀₁₈ je Fahrzeug jedoch den mit Abstand kleinsten Kostenbestandteil darstellen und sich lediglich in der Größenordnung des Fahrzeugrestwerts bewegen. In der betrieblichen Praxis kann die Anschaffung der Ladeinfrastruktur dennoch ein finanzielles Hindernis darstellen, da sie bereits vor Inbetriebnahme der Fahrzeuge bereitgestellt werden muss.

Den mit Abstand größten Einfluss auf die TCO-Differenz zwischen Elektro- und Dieselfahrzeug hat der Fahrzeugpreis des E-Busses (inkl. Batteriepreis). Wie aus Abbildung 4-2 ersichtlich ist, würde bereits ein Preisrückgang um ca. 10 % ausreichen, um den TCO-Nachteil gegenüber dem Dieselfahrzeug auszugleichen (bei ansonsten unveränderten Kosten und Rahmenbedingungen und ohne Berücksichtigung der Kosten für die Ladeinfrastruktur). Hintergrund ist, dass die bisherigen Fahrzeuge erst in Kleinserien hergestellt werden. Angesichts der weltweit deutlich hochlaufenden Produktion von E-Bussen könnten Skaleneffekte beim elektrischen Antriebsstrang und die dadurch sinkenden Angebotspreise also möglicherweise schon in naher Zukunft zur TCO-Gleichheit führen. Wenn der Batteriepreis (als Teil der Fahrzeugkosten) isoliert betrachtet wird, wäre ein Preisrückgang um 50 % auf dann 42.000 € (bzw. 500 €/kWh) notwendig, um eine Kostenparität auf TCO-Basis mit dem Dieselfahrzeug zu erzielen. Einen prozentual stärkeren Einfluss auf die TCO-Bilanz als der Batteriepreis hat der Dieselpreis: wenn die Kosten für Diesel – im Durchschnitt der gesamten Fahrzeugnutzungsdauer – um etwa 30 % über den angenommenen Kosten liegen, wäre bei einer ansonsten unveränderten Kostenstruktur die TCO-Parität zwischen Elektro- und Dieselfahrzeug ebenso erreicht. Am geringsten wirkt sich eine Änderung des Strompreises auf die TCO-Differenz aus, was auf die hohe Energieeffizienz (und den damit verbundenen geringen Anteil der Energiekosten an den Gesamtbetriebskosten) des Elektrofahrzeugs zurückgeführt werden kann.

Abbildung 4-2: Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Variation ausgewählter Kostenkomponenten auf die Gesamtbetriebskosten (TCO)



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung

¹⁸ unter den betrachteten Rahmenbedingungen hinsichtlich Energiepreisentwicklung, Kalkulationszinssatz etc.

¹⁹ Investitionskosten: ca. 17.000 € pro E-Bus, technische Nutzungsdauer: 30 Jahre (zwei Bus-Generationen), Kalkulationszins: 6 % p.a.

Als Fazit der Sensitivitätsanalyse kann somit festgehalten werden, dass die Unsicherheiten bezüglich der künftigen Energiepreisentwicklung ein deutlich größeres Risiko für den Dieselbus als für den Elektrobus darstellen. Außerdem hat sich gezeigt, dass die TCO-Bilanz unter den angenommenen Rahmenbedingungen bereits zugunsten des elektrischen Vorfeldbusses kippt, wenn der Einkaufspreis gegenüber den heute am Markt verfügbaren E-Bus-Modellen um lediglich 10 % sinkt. Dies bedeutet, dass sich der Preisaufschlag gegenüber einem vergleichbaren Dieselmotormodell auf unter 35 % verringern muss, damit TCO-Vorteile erzielt werden können.

Vorfeldschlepper

Auch die TCO-Betrachtung für die Schleppfahrzeuge basiert auf einer Fahrzeugnutzung, die für den Einsatz am Flughafen Stuttgart typisch ist: einer Nutzungsdauer von 10 Jahren und 9.000 Aufträge (Jobs) pro Jahr. Die Schlepper werden über einen Zeitraum von acht Jahren vollständig abgeschrieben, so dass sie anschließend keinen buchhalterischen Restwert mehr besitzen. Eventuelle Erlöse aus einem Weiterverkauf der Fahrzeuge wurden nicht betrachtet. Die Input-Parameter, die sich zwischen der Elektro- und der Hybridvariante unterscheiden, sind in Tabelle 4-3 aufgeführt.

Tabelle 4-3: Input-Parameter für die TCO-Betrachtung der Schleppfahrzeuge

Parameter	Elektroschlepper	Hybridschlepper
Energiebedarf	22.000 kWh/a (Strom)	57.000 kWh/a (Diesel)
Batteriekapazität	112 kWh	keine*
Fahrzeugpreis	+5 % ggü. Hybridschlepper**	
Wartungskosten	-6 % ggü. Hybridschlepper**	

* nur Starterbatterie

** Nach 5 Jahren muss die Blei-Säure-Batterie ersetzt werden. Die Kosten für den Batterieersatz sind in dieser Tabelle weder im Fahrzeugpreis noch in den Wartungskosten enthalten, werden im Folgenden aber den Batteriekosten zugerechnet (s. Abbildung 4-3).

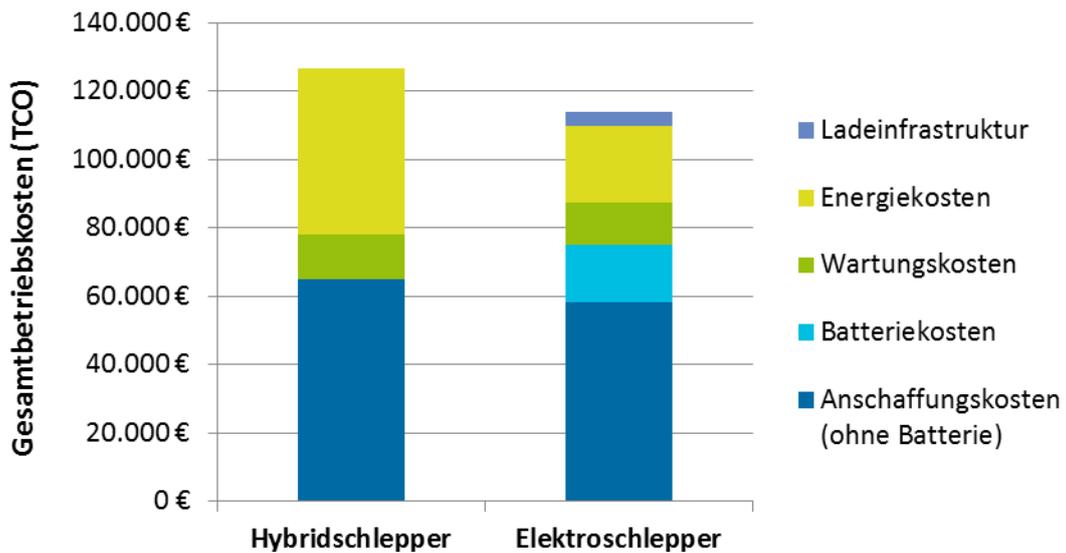
Quelle: Öko-Institut, eigene Annahmen basierend auf Informationen von FSG und LAS

Bei den hier betrachteten Elektroschleppern entfallen lediglich etwa 10.000 € des Kaufpreises auf die Batterie, obwohl diese eine größere nominale Kapazität als die Bus-Batterien hat. Die Ursache hierfür sind die sehr niedrigen spezifischen Kosten für die Blei-Säure-Batterietechnik, die bei den Elektroschleppern zum Einsatz kommt: 90 €/kWh im Vergleich zu 1000 €/kWh für die Lithium-Ionen-Batterien der Elektrobusse. Dieser enorme Preisvorteil relativiert sich allerdings etwas, wenn man berücksichtigt, dass die Blei-Säure-Batterien

- mit einem deutlich höheren Wartungsaufwand und -kosten verbunden sind,
- auf Grund der geringeren Ladeleistung deutlich längere Ladezeiten haben (und nur über Nacht wieder vollständig aufgeladen werden können) und
- eine deutlich geringere Lebensdauer aufweisen, was einen Austausch der Batterie nach fünf Jahren Nutzungsdauer erfordert.

Trotz der Kosten für den Batterieersatz weisen die Elektroschlepper nur moderate Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung (inkl. Batteriekosten) gegenüber den Hybridschleppern auf (siehe Abbildung 4-3). Die Stromkosten des E-Schleppers betragen weniger als die Hälfte der Dieselmotorkosten, die für den Betrieb des Hybridschleppers kalkuliert werden müssen. Auch die Wartungskosten liegen leicht unter denen der Hybridvariante.

Abbildung 4-3: Gesamtbetriebskosten (TCO) über den Nutzungszeitraum der Schlepper (10 Jahre) in €₂₀₁₈ zzgl. der anteiligen Kosten für die Ladeinfrastruktur

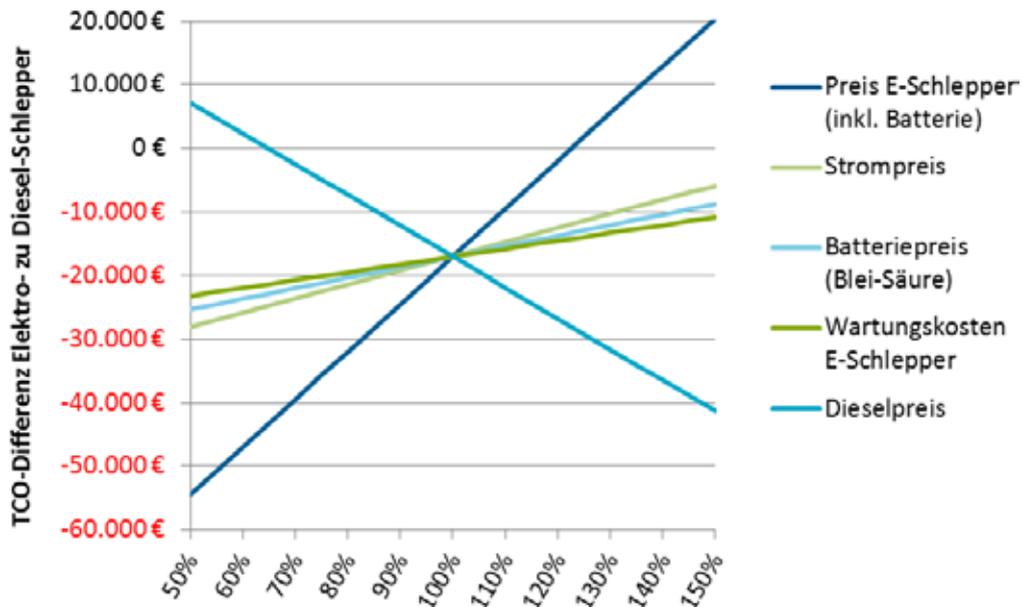


Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung

Insgesamt besitzt der Elektroschlepper unter den betrachteten Rahmenbedingungen und Preisannahmen um ca. 17.000 €₂₀₁₈ geringere Gesamtbetriebskosten als der Hybridschlepper, was einem TCO-Vorteil von etwa 13 % entspricht. Selbst unter Berücksichtigung der anteiligen Investition in die Ladeinfrastruktur²⁰, die mit knapp 4.400 €₂₀₁₈ je E-Schlepper zu Buche schlägt, weist der Elektroschlepper noch einen Gesamtkostenvorteil von 10 % auf.

²⁰ Investitionskosten: ca. 7.500 € pro E-Schlepper, technische Nutzungsdauer: 30 Jahre (drei Schlepper-Generationen), ohne Kosten für Planung, Betrieb und Wartung/Reparatur der Ladeinfrastruktur

Abbildung 4-4: Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Variation ausgewählter Kostenkomponenten auf die Gesamtbetriebskosten (TCO)



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung

Es hat sich gezeigt, dass der Fahrzeugpreis des E-Schleppers (inkl. Batterie) den größten Einfluss auf die TCO-Differenz zwischen dem Elektro- und dem Hybridschlepper hat, gefolgt vom Dieselpreis. Des Weiteren zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass der ermittelte TCO-Kostenvorteil des Elektroschleppers relativ robust ist: erst wenn die Dieselpreise um ca. 35 % unter der getroffenen Annahme liegen würden, würde der TCO-Vergleich (bei ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen und ohne Berücksichtigung der Kosten für die Ladeinfrastruktur) zugunsten des Hybridschleppers ausfallen.

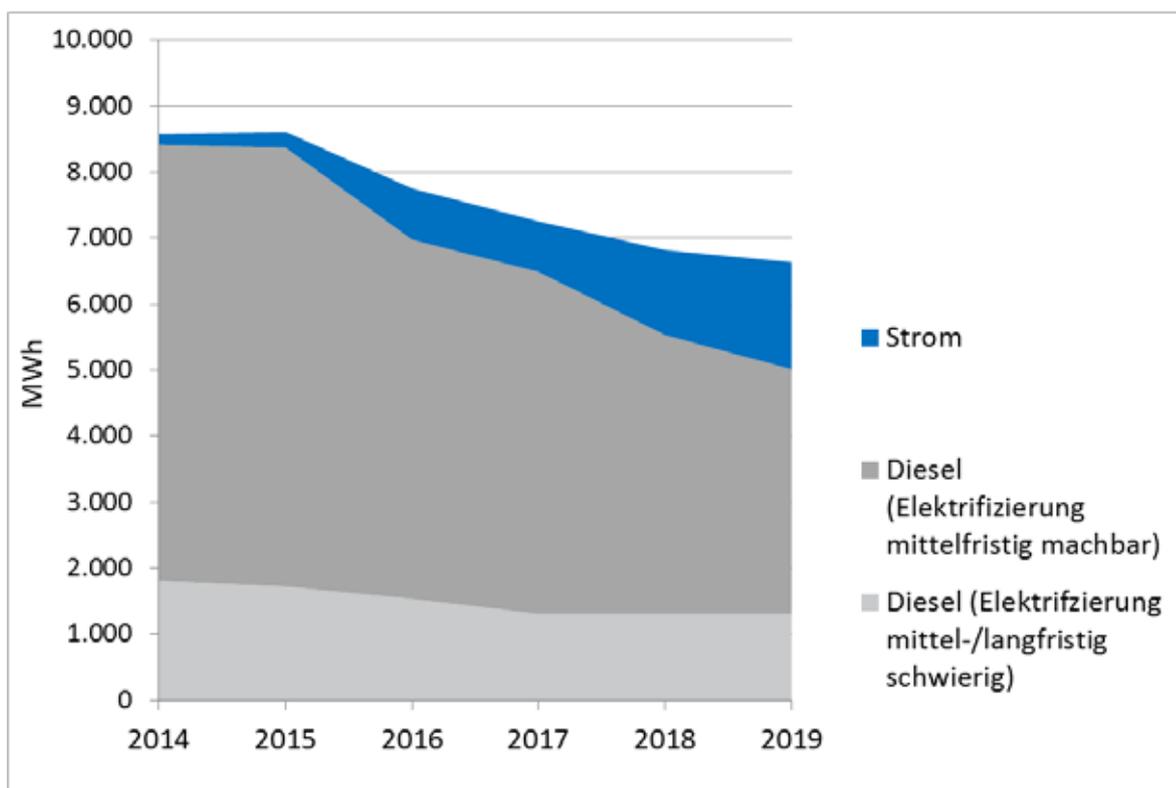
Zwischenfazit

Bereits heute bewegen sich elektrische Vorfeldfahrzeuge bei Berücksichtigung der Betriebskosten über die Gesamtnutzungsdauer im Bereich von konventionellen Vergleichsfahrzeugen oder sind im Falle von Blei-Säure-Batterien bereits günstiger. Den teilweise erheblichen zusätzlichen Anschaffungskosten stehen geringere laufende Kosten gegenüber. Die notwendige Ladeinfrastruktur erfordert bei der Systemumstellung zwar erhebliche Investitionen, über die Gesamtnutzungsdauer ist ihr Anteil an den Betriebskosten der Fahrzeuge hingegen relativ gering. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Phase der Systemumstellung der Vorfeldflotte am Flughafen mit einem hohen Personaleinsatz verbunden ist, der weitere Kosten verursacht, die in der TCO-Betrachtung nicht berücksichtigt sind. Bisher sind die Kosten von Lithium-Ionen-Batterie und elektrischem Antriebsstrang angesichts der kleinen Produktionsvolumen im Bereich der betrachteten Anwendungen noch sehr hoch. Angesichts der allgemeinen Marktdynamik ist jedoch davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren auch bei den hier betrachteten Anwendungen eine deutliche Kostendegression durch Skaleneffekte erzielt werden kann.

5. Status quo und Ausblick

In der bisherigen Projektlaufzeit von „scale up!“ konnten wichtige Fahrzeugkategorien der Vorfeldmobilität bereits weitgehend elektrifiziert werden und der Energiebedarf deutlich reduziert werden. Unter Berücksichtigung der steigenden Passagierzahlen sinkt aufgrund der Elektrifizierung der Energiebedarf der gesamten Vorfeldflotte einschließlich Dieseldieselkraftstoff- und Stromverbrauch um 22 % verglichen mit einer reinen Dieselflotte im Übergangsjahr 2018. Bis Ende 2018 ist die Elektrifizierung der Vorfeldbusse und -schlepper sowie Förderbänder weitestgehend vollzogen. Im Jahr 2019 kann mit einer gesamten Energieeinsparung von 26 % gerechnet werden. Der Verbrauch an Dieseldieselkraftstoff wird für 2019 damit voraussichtlich um 44 % geringer sein als bei einer reinen Dieselflotte (siehe Abbildung 5-1).

Abbildung 5-1: Energiebedarf (Strom bzw. Dieseldieselkraftstoff) der gesamten Vorfeldflotte (FSG + LAS), 2014 - 2019



Quelle: Öko-Institut, eigene Auswertung auf Basis der Fuhrparkdaten der FSG und LAS

Für weitere Fahrzeugkategorien ist im Rahmen des Projektes „scale up!“ eine Elektrifizierung geplant (dunkelgrauer Bereich in Abbildung 5-1). Dazu gehören vor allem die Frachtschlepper und Nachtluftpostschlepper sowie die Mannschaftstransporter. Der Einsatz dieser Elektrofahrzeuge ist zum aktuellen Zeitpunkt abhängig von der Verfügbarkeit an Angeboten und den Lieferzeiten. Vor allem bei leichten Nutzfahrzeugen mangelt es derzeit an verfügbaren Fahrzeugen auf dem Markt. Darüber hinaus ist es bei einem Großteil der noch dieseldieselbetriebenen Fahrzeuge der Vorfeldmobilität möglich, diese in den nächsten fünf bis zehn Jahren zu elektrifizieren. Ausgenommen sind die Spezialfahrzeuge der Feuerwehr und des Winterdienstes, die keinen Einschränkungen beim Einsatz durch mögliche Batterieladungen ausgesetzt sein dürfen (hellgrauer Bereich in Abbildung 5-1).

Vor diesem Hintergrund wird im weiteren Projektverlauf eine Roadmap für die Elektrifizierung der Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart bis 2035 entwickelt. Dabei werden verschiedene Optimierungen im Energiesystem, u. a. Lademanagement, betrachtet. Die sich daraus ergebenden Gesamtkosten der Fahrzeuge einschließlich der Kosten der Ladeinfrastruktur sowie Einsparungen an CO₂-Emissionen werden dafür ermittelt.

Die Untersuchungen am Flughafen Stuttgart zeigen, dass eine weitgehende Elektrifizierung der Vorfeldmobilität möglich ist. Inwieweit und unter welchen Rahmenbedingungen dies auf andere Flughäfen übertragbar ist, soll im Dialog mit diesen auf Basis der Roadmap für den Flughafen Stuttgart diskutiert werden.