

Working Paper

Der Weg zur vollelektrischen Flughafenflotte –
2. Working Paper aus dem Projekt *scale up!*

Öko-Institut Working Paper 2/2020

Dr. Winfried Bulach
Florian Hacker
Dr. Markus Haller
Lukas Minnich
Dr. Manuela Weber
Öko-Institut e. V.

Martin Hofmann
Elias Siehler
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
Borkumstraße 2
13189 Berlin
Tel.: +49 30 405085-0
Fax: +49 30 405085-388

info@oeko.de
www.oeko.de

Working Paper

Der Weg zur vollelektrischen Flughafenflotte – 2. Working Paper aus dem Projekt *scale up!*

Dr. Winfried Bulach
Florian Hacker
Dr. Markus Haller
Lukas Minnich
Dr. Manuela Weber
Öko-Institut e. V.

Martin Hofmann
Elias Siehler
Flughafen Stuttgart GmbH

Sina Salzer
Losch Airport Service Stuttgart GmbH

Working Paper 2/2020 Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

Juli 2020

Download: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-scale-up-2.pdf



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz. Öko-Institut e.V. 2020
This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0. Oeko-Institut e.V. 2020

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

Das Öko-Institut begleitete im Projekt *scale up!* die Umstellung weiter Teile der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart auf Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb.

In diesem Working Paper wird zunächst die Elektrifizierung weiterer Fahrzeuggruppen in der letzten Projektphase umrissen: Es zeigt sich, dass bei Umbrüchen zwar stets mit einzelnen Startschwierigkeiten zu rechnen ist, insgesamt aber eine zügige und von allen Beteiligten unterstützte Einführung von E-Fahrzeugen mitsamt eines funktionierenden Betriebs- und Ladeinfrastrukturkonzepts organisiert werden konnte und man hierbei von den Erfahrungen aus den früheren E-Mobilitätsanwendungen profitierte.

Darüber hinaus fokussiert dieses Papier auf die weiteren Perspektiven: Eine Roadmap zeigt ökonomische und ökologische Effekte eines möglichen Fahrplans hin zu einer weitestgehend elektrischen Flotte bis 2035 auf. Sofern es nicht zu einer deutlichen Senkung der E-Fahrzeugpreise kommt, fallen dafür weiterhin Kosten im hohen sechsstelligen Bereich jährlich an. Selbst bei Annahme eines weiteren jährlich zweiprozentigen Wachstums von Fuhrpark und Flugzeugabfertigungen ist mit einer Senkung der CO₂-Emissionen von über 50 % bis 2035 gegenüber 2014 zu rechnen. Bei gleichbleibendem Flugbetrieb sinkt der Treibhausgasausstoß sogar um zwei Drittel. Weiter verbessert werden sollte die Klimabilanz mittels eines ambitionierteren Ausbaus eigener Kapazitäten Erneuerbarer Energien und der Verwendung ökologisch hochwertiger Strombezugsoptionen. In der LCA-Betrachtung verschiedener Fahrzeuge zeigt sich, dass in fast allen untersuchten Wirkungskategorien die jeweilige elektrische Variante die beste Option darstellt. Bei den Vorfeldschleppern, in der ein Vergleich zwischen Batterietechnologien durchgeführt wurde, zeigten sich dabei Vorteile für die Lithium-Ionen-Variante. Für die Kategorien Eutrophierung und Verbrauch mineralischer Ressourcen schneidet die Dieselvariante jeweils bei den meisten Fahrzeugtypen besser ab. Dennoch lässt sich abschließend bewerten, dass eine Elektrifizierung der Flughafenvorfeldflotte überwiegend vorteilhaft ist und die Bewertung in Zukunft noch positiver sein wird, wenn der deutsche Strommix einen geringeren Anteil an Kohlestrom aufweist.

Im Energiesystem des Flughafens wird die Vorfeldflotte im Vergleich v. a. mit der Elektromobilität auf der Landseite im Jahr 2035 von eher untergeordneter Relevanz sein. Sie verstärkt jedoch vorhandene Spitzen, weshalb das Lademanagement innerhalb der Grenzen der Einsatzmuster ausgebaut werden sollte.

Zum Schluss des Papiers werden der Einfluss verschiedener Eigenschaften und Rahmenbedingungen von Flughäfen diskutiert und Handlungsempfehlungen gegeben. Ein koordiniertes Handeln der Verkehrsflughäfen könnte dazu beitragen, Einstiegshürden an bisher weniger vorangeschrittenen Airports zu verringern und v. a. die Entwicklung und Standardisierung des Fahrzeugmarkts zu beschleunigen. Verbindliche Vorgaben und Förderinstrumente der Anteilseigner und die Verpflichtung auch der Fluggesellschaften erhöhen die Planungssicherheit für die Verantwortlichen an den Flughäfen. Entgegen der bei manchen beteiligten Akteurinnen und Akteuren noch vorhandenen Vorbehalte wird eine ambitionierte Elektrifizierung der Vorfeldflotte in Hinblick auf Klimaschutz, Vermeidung von Luftschadstoffemissionen, Energieeffizienz und Wartung insgesamt als vorteilhaft gesehen.

Abstract

In the *scale up!* project, the Öko-Institut conducted research on the process of converting large parts of the apron fleet at Stuttgart Airport to electrically powered vehicles. This working paper first outlines

the electrification of further vehicle groups in the final project phase: It shows that, although individual initial difficulties can always be expected in the event of upheavals, it was possible to organise a rapid introduction of electric vehicles together with a functioning operating and charging infrastructure concept with the support of all stakeholders and to benefit from the experience gained from previous e-mobility applications. In addition, this paper focuses on further perspectives: A roadmap shows economic and ecological effects of a possible roadmap towards a largely electric fleet by 2035. Unless there is a significant reduction in electric vehicle prices, the process will continue to incur costs in the high six-figure range annually. Even assuming a further annual 2% growth in the vehicle fleet and aircraft handling, a reduction in CO₂ emissions of over 50% by 2035 compared to 2014 can be expected. If the airport activity remains constant, greenhouse gas emissions will even decrease by two thirds. The climate balance should be further improved by means of a more ambitious expansion of the company's own renewable energy capacities and the use of ecologically high-quality electricity procurement options.

The LCA of various vehicles shows that, the respective electric version is the best option in almost all impact categories examined. For apron luggage tractors a comparison between battery technologies was carried out and the lithium-ion variant showed advantages. For the categories of eutrophication and consumption of mineral resources, the diesel version showed the best results for most vehicles types. Nevertheless, it can be concluded that electrification of the airport apron fleet is advantageous, and the assessment result will be even better in the future when the German electricity mix will have a lower share of coal-fired electricity.

In the airport's energy system, the apron fleet will have a lower release in 2035 compared to electromobility on the land side. It will, however, exacerbate existing peaks, which is why charging management should be expanded within the limits of the deployment patterns. The paper concludes with a discussion of the influence of different characteristics and framework conditions of airports. Coordinated action by commercial airports could help to reduce entry barriers at less advanced airports and, above all, accelerate the development and standardisation of the vehicle market. Binding guidelines and support instruments from the shareholders and the obligation of the airlines increase planning security for those responsible at the airports. Contrary to some reservations that still exist, an ambitious electrification of the apron fleet is seen as advantageous overall in terms of climate protection, avoidance of air pollutant emissions, energy efficiency, workplace safety, and maintenance.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Abstract	5
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
1. Einführung	13
2. Elektrifizierung der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart – Status Quo	14
2.1. Klimaziele des Flughafens als Grundlage der Elektrifizierung	14
2.2. Umstellung von Fahrzeugen auf elektrischen Antrieb im Rahmen des Projekts	14
2.2.1. Zusammenfassung	14
2.2.2. Elektrische Frachtschlepper	16
2.2.3. Elektrische Fluggasttreppen	17
2.2.4. Elektrische Pkw als Ramp-Agenten-Fahrzeuge	18
2.3. Aufbau von Ladeinfrastruktur im Rahmen des Projekts	19
2.3.1. Weiterentwicklung der elektrischen Ladeinfrastruktur	19
2.3.2. „EVG-Fracht“ an der Südseite des Flughafengeländes	20
2.3.3. Verkehrsleitungsgebäude	21
2.3.4. BVD-Halle auf der Nordseite des Flughafengeländes	23
2.3.5. Frachtübergabehalle und Terminal 4	24
2.3.6. Möglicher Ladeinfrastrukturaufbau für externe Tankdienstleister am östlichen Vorfeld	24
2.3.7. Mahle chargeBIG – intelligentes Ladesystem	26
2.3.8. Fazit	27
2.4. Erkenntnisse aus dem betrieblichen Alltag, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit	27
2.4.1. Fragestellungen und Methodik	27
2.4.2. Praxiserfahrungen und Praxistauglichkeit	28
2.4.3. Anforderungen an Mensch und Technik	28
2.4.4. Veränderung der Nutzerakzeptanz über die Zeit	29
2.4.5. Erfolgsfaktoren und Hemmnisse beim Change-Management	29
2.4.6. Wirtschaftlichkeit	30
3. Roadmap zur Erreichung eines weitgehend elektrischen Fuhrparks	30

3.1.	Weitere Elektrifizierung der Vorfeldflotte bis 2035	30
3.2.	Senkung von Energiebedarfen und CO₂-Emissionen durch die Elektrifizierung	33
3.3.	Kosten der Fahrzeuganschaffung	36
3.4.	Weitere Kosten	38
3.5.	Gesamtbetrachtung der Wirtschaftlichkeit	39
3.6.	Einfluss veränderter Rahmenbedingungen auf die Roadmap	40
3.7.	Fazit zur Roadmap	43
4.	Themenschwerpunkt Umweltbewertung Ökologische Bewertung des Ladestroms	45
4.1.	Ökobilanz verschiedener Fahrzeugkategorien	45
4.2.	Ökologische Bewertung des Ladestroms	49
4.2.1.	Bewertung der CO ₂ -Intensität des Ladestroms	49
4.2.2.	Sinnvolle Strombezugsoptionen	50
4.2.2.1.	Bezug von Herkunftsnachweisen mit zusätzlichen Qualitätsanforderungen	50
4.2.2.2.	Direkte langfristige Strombezugsverträge (PPAs) aus Post-EEG-Anlagen oder Neuanlagen	50
5.	Energieseitige Umsetzung eines weitgehend elektrischen Fuhrparks bis 2035	51
5.1.	Methodik	51
5.1.1.	Simulation des Ladeverhaltens der einzelnen Fahrzeuge	51
5.1.2.	Simulation des gesamten Energiesystems des Flughafens	51
5.2.	Ergebnisse	52
5.2.1.	Übersicht: Deckung der Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen und anderen Verbrauchern am Flughafen Stuttgart	52
5.2.2.	Saisonale Schwankungen des Ladestrombedarfs	53
5.2.3.	Deckung des Ladestrombedarfs im Jahr 2035 im Tagesgang	53
5.3.	Fazit	55
6.	Übertragbarkeit und Handlungsempfehlungen	56
6.1.	Einführung	56
6.2.	Übertragung der Erkenntnisse aus <i>scale up!</i> auf andere Flughäfen und Anwendungen	56
6.3.	Herausforderungen und Handlungsempfehlungen	61
6.3.1.	Fortsetzung des Elektrifizierungsprozess geboten	61
6.3.2.	Fahrzeugverfügbarkeit und Technikentwicklung	62
6.3.3.	Umstellung des Fahrzeugbetriebs	63
6.3.4.	Wirtschaftlichkeit und Förderung	64

6.3.5.	Dilemma aus Handlungsdruck und Technologieoffenheit	66
6.3.6.	Ladeinfrastruktur, Strombereitstellung und Strombezug	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Bisherige Elektrifizierung der Vorfeldflotte und Zieljahre zur Vollelektrifizierung (Stand Ende 2019)	15
Abbildung 2-2:	Abstellung und Ladung der elektrischen Frachtschlepper	16
Abbildung 2-3:	Abstellung der elektrischen Fluggasttreppen in der BVD-Gerätehalle: blau = vorhandene Abstellpositionen, rot = geplante Abstellpositionen	18
Abbildung 2-4:	Renault ZOE als Ramp-Agenten-Fahrzeug	19
Abbildung 2-5:	Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur an der Südseite (EVG-Fracht)	20
Abbildung 2-6:	Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur am Verkehrsleitungsgebäude	22
Abbildung 2-7:	Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur an der BVD-Halle	23
Abbildung 2-8:	Vorhandene Ladeinfrastruktur an Frachtübergabehalle und Terminal	24
Abbildung 2-9:	Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur am Tanklager	25
Abbildung 2-10:	chargeBIG-Ladepunkt mit Umspanneinrichtung	26
Abbildung 3-1:	Entwicklung der Anzahl von E-Fahrzeugen nach Fahrzeuggruppen	33
Abbildung 3-2:	Entwicklung des jährlichen Energiebedarfs nach Fahrzeuggruppen	34
Abbildung 3-3:	CO ₂ -Emissionsfaktoren für Strom und Diesel	35
Abbildung 3-4:	Entwicklung des jährlichen CO ₂ -Ausstoßes nach Fahrzeuggruppen	36
Abbildung 3-5:	Angenommene Entwicklung der Batteriekosten	37
Abbildung 3-6:	Jährliche Mehrkosten der Anschaffung von elektrischen gegenüber dieselbetriebenen Fahrzeugen	38
Abbildung 3-7:	Gesamtbetrachtung der jährlichen Kosten der Elektrifizierung (jeweils Differenzbetrachtung gegenüber Dieselfahrzeugen)	40
Abbildung 3-8:	1. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der Kostenbilanz im Basisszenario (<i>links</i>) vs. Szenario „Nullwachstum“ (<i>rechts</i>)	41
Abbildung 3-9:	1. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der CO ₂ -Bilanz im Basisszenario (<i>links</i>) vs. Szenario „Nullwachstum“ (<i>rechts</i>)	41
Abbildung 3-10:	2. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der Kostenbilanz im Basisszenario (<i>oben</i>) vs. Kostenszenarien „pro“ und „kontra“ (<i>unten links und rechts</i>)	43
Abbildung 4-1:	Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Vorfeldschlepper	46
Abbildung 4-2:	Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Vorfeldbusse	47
Abbildung 4-3:	Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Förderbandwagen	48
Abbildung 4-1:	Treibhauswirkung des Ladestroms für verschiedene Bilanzierungsmethoden	49
Abbildung 5-1:	Deckung der Stromnachfrage in den Jahren 2016 und 2035	52

Abbildung 5-2:	Saisonale Verbrauchsprofile	53
Abbildung 5-3:	Charakteristischer Tagesgang des Ladestrombedarfs der Vorfeldflotte im Jahr 2035	54
Abbildung 5-4:	Profile für Stromverbrauch, Eigenerzeugung und Bezug im Jahr 2035	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Zusammenfassung der Kombinationen Anwendung / Fahrzeugkategorie in Oberkategorien für die Ergebnisdarstellung	31
Tabelle 3-2:	Sensitivitätsrechnung 2: Verwendete Szenarien mit jeweils zugrunde gelegten Kostenentwicklungen	42

1. Einführung

Um die weitreichenden Folgen des menschengemachten Klimawandels einzudämmen, soll die Erderwärmung auf unter 2° C begrenzt werden. Dieses Ziel erfordert eine nahezu vollständige Dekarbonisierung in allen Wirtschaftssektoren. Während andere Sektoren in den Jahren seit 1990 Einsparungen erzielt haben, stagnieren die Treibhausgasemissionen des deutschen Verkehrssektors und der internationale Luftverkehr wächst. Somit ist in der Luftfahrtbranche auf vielen Ebenen ein Handeln erforderlich.

Gleichzeitig hat die Corona-Krise zu einem noch nie erlebten Einbruch des weltweiten Flugverkehrs geführt und konfrontiert die Branche mit beispiellosen Einnahmeausfällen. Kurzfristig führt dies dazu, dass die Krisenbewältigung im Mittelpunkt steht und sämtliche Investitionen, auch in Zukunftstechnologien, kurzfristig auf den Prüfstand gestellt werden müssen. Jedoch wird die Reaktion der Branche und der Politik auf die Krise auch wichtige Weichen stellen: Angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise geht kein Weg daran vorbei, dass strategische Entscheidungen von Airlines, Flughafenbetreibern und weiteren Unternehmen im Umfeld sowie staatliche Rettungspakete auch den Klimaschutz in der Luftfahrtbranche beschleunigen.

Auf die Emissionen der Luftfahrt haben die Flughafenbetreiber selbst nur einen indirekten Einfluss. Jedoch besteht eine wichtige Handlungsmöglichkeit im Bodenverkehr: Die umfangreichen Fuhrparks auf dem Vorfeld eignen sich zum großen Teil sehr gut für den elektrischen Antrieb: Unter anderem wegen der vergleichsweise kurzen Einsatzwege bei oft langen Standzeiten, der Vorausplanbarkeit sowie der positiven Wirkung auf Wartung und Arbeitsschutz. Fortschritte bei der Elektromobilität in größeren Fahrzeugmärkten, v. a. im Pkw-Bereich, wirken in Form von technologischen Weiterentwicklungen, Standardisierung und sinkenden Kosten indirekt auch auf den Markt der am Flughafen eingesetzten Fahrzeuge.

Im Rahmen des Projekts *scale up!* haben die Projektpartner Flughafen Stuttgart GmbH und Losch Airport Service Stuttgart GmbH relevante Teile ihrer Flotte vom Diesel- auf den elektrischen Antrieb umgestellt und umfangreiche Praxiserfahrungen gesammelt. Das Öko-Institut begleitete diesen Prozess wissenschaftlich. Wie Abschnitt 2 dieses Papiers zeigt, konnten in der letzten Projektphase weitere Fahrzeuggruppen teilelektrifiziert werden. Dies geschah relativ reibungslos, weil umfangreiche Erfahrungen mit der Elektromobilität aus anderen Teilen des Fuhrparks genutzt werden konnten. Somit ist eine weitestgehende Umstellung der Flotte im nächsten Jahrzehnt realistisch, der in Abschnitt 3 diskutiert wird. Aus Umweltsicht ist der technologische Wandel vom Diesel- zum Elektromotor in den meisten relevanten Wirkungskategorien vorteilhaft. Eine nach ISO 10440/44 durch externe Reviewer geprüfte vergleichende Ökobilanz für drei verschiedene Fahrzeugtypen am Flughafen Stuttgart wurde durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Kapitel 4.1 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse und Annahmen sind im separaten Ökobilanzbericht dargestellt. In diesem Papier wird zudem die Klimawirkung verschiedener Strombezugsoptionen vertieft analysiert (4.2). In Kapitel 5 wird untersucht, wie die Stromnachfrage durch die E-Fahrzeuge auf dem Vorfeld zeitlich verteilt sein wird und die elektrische Energie bereitgestellt werden kann.

Nicht zuletzt sollen auch an andere Flughäfen von den Erkenntnissen aus *scale up!* profitieren. Dazu wird in Kapitel 6 diskutiert, inwieweit sich diese auf andere Standorte übertragen lassen und welche Möglichkeiten die verschiedenen beteiligten Akteure haben, die Elektrifizierung der Flughafenflotten beschleunigt voran zu bringen.

2. Elektrifizierung der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart – Status Quo

2.1. Klimaziele des Flughafens als Grundlage der Elektrifizierung

Die Flughafen Stuttgart GmbH (FSG) hat sich auf eine Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2050 auf 0 % verpflichtet. Dabei bezieht die Betreibergesellschaft den innerhalb der Grenzen des Flughafens hervorgerufenen Treibhausgasausstoß (Scope 1 gemäß dem „Greenhouse Gas Protocol“-Standard) ein, aber auch diejenigen indirekten Emissionen, die sie durch außerhalb erzeugte und eingekaufte Energieträger verursacht (Scope 2). Die weiteren indirekten Emissionen sind durch die Flughafen Stuttgart GmbH nicht direkt beeinflussbar, fallen in Scope 3 und sind im Klimaziel nicht enthalten. Somit gehört die Vorfeldmobilität mitsamt den Emissionen aus der Bereitstellung der benötigten Kraftstoffe und des Stroms zum Betrachtungsrahmen, nicht aber der Ausstoß der startenden und landenden Flugzeuge und die An- und Abreise der Passagiere.

Für den Abfertigungsbetrieb, zu dem die Vorfeldmobilität gehört, besteht das Ziel, die CO₂-Emissionen bereits bis 2030 auf null zu senken. Diese Zielmarke bezieht sich auf den Scope 1: D. h. die bei der Verbrennung von Kraftstoffen auf dem Flughafengelände entstehenden Emissionen werden berücksichtigt, nicht aber diejenigen aus der Stromgewinnung. Der Ersatz eines dieselbetriebenen durch ein E-Fahrzeug senkt in dieser Betrachtungsweise dessen Emissionen um 100 %. Parallel werden die CO₂-Emissionen der Stromgewinnung durch den Ausbau des Anteils Erneuerbarer Energien gesenkt.

Das Emissionsreduktionsziel für den Abfertigungsbetrieb erfordert eine deutliche Elektrifizierung des Fuhrparks, die im Rahmen der Projekte *efleet* und *scale up!* gefördert wurde. Die Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS), die seit 2003 eine Lizenz als Drittabfertiger am Flughafen Stuttgart besitzt, war in diesen Umstellungsprozess von vornherein eingebunden. So konnten beispielsweise beim Aufbau der Ladeinfrastruktur Synergien erzielt werden.

2.2. Umstellung von Fahrzeugen auf elektrischen Antrieb im Rahmen des Projekts

2.2.1. Zusammenfassung

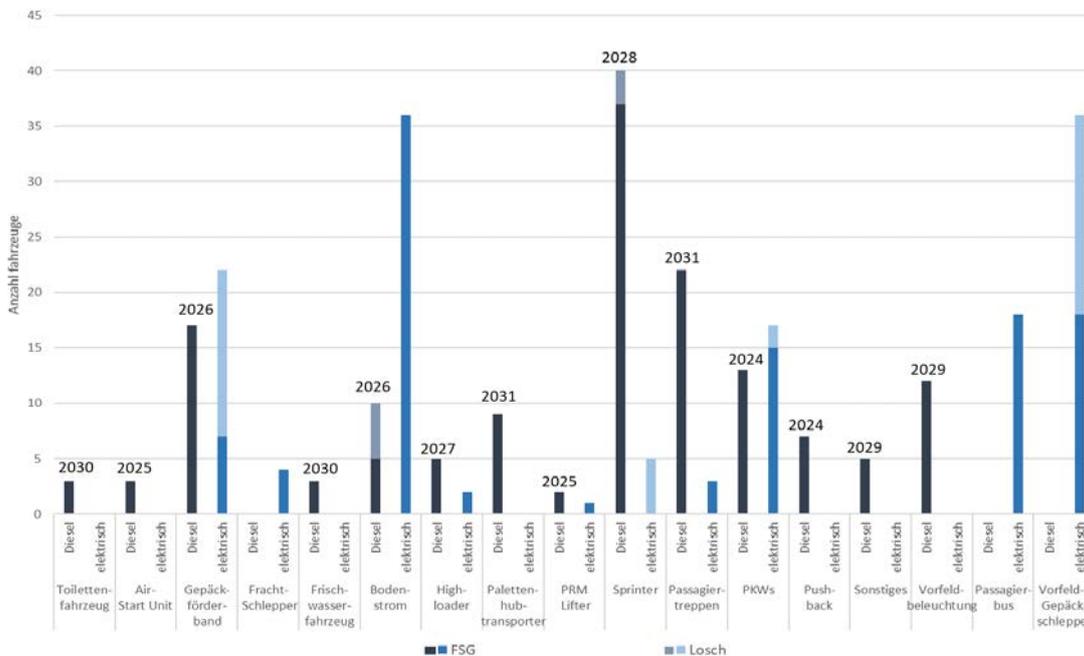
Im Rahmen des Projekts *scale up!* wurden durch die **LAS** zwölf Elektroförderbänder und vier Elektro-Vorfeldschlepper angeschafft. Insgesamt beläuft sich der Fuhrpark des Unternehmens auf 14 Elektroförderbänder, 14 Elektro-Vorfeldschlepper sowie sieben leichte Nutzfahrzeuge für die Personenbeförderung und die Flugzeugreinigung. Es befinden sich noch drei leichte Nutzfahrzeuge und 13 Ground Power Units (GPUs) mit fossilem Antrieb im Fuhrpark. Die verbleibenden leichten Nutzfahrzeuge sollen sukzessive nach Ablauf der kalkulatorischen Nutzungsdauer und unter der Voraussetzung, dass es geeignete elektrische Varianten gibt, ausgetauscht werden.

Seitens der **FSG** wurden insgesamt 41 batterieelektrische Fahrzeuge für die Flugzeugabfertigung beschafft. Im Einzelnen wurden vier 12 m-Förderbänder, zehn Passagierbusse, sechs Gepäckschlepper, vier Frachtschlepper, eine 7-Tonnen Hubbühne, 13 Ramp-Agenten-Pkw und drei Passagiertreppen bestellt und in Betrieb genommen. Damit einhergehend hat die FSG sechs DC-Schnelllader à 60 kW, sechs 63 A-Steckdosen, vier 32 A-Steckdosen, vier 44 kW-Wallboxen und drei Standorte mit insgesamt 68 Ladeplätzen des Typs II mit je 7 kW Leistung realisiert.

Abbildung 2-1 zeigt zusammengefasst den Status Quo der Elektrifizierung: Von den hier betrachteten Fahrzeugkategorien sind die Vorfeldbusse und -schlepper vollständig elektrisch betrieben, bei Förderbändern und Pkw ist der Prozess etwa zur Hälfte fortgeschritten. Bei Kategorien wie den leichten Nutzfahrzeugen („Sprinter“), Passagiertreppen, Hubtransportern und Fahrzeugen zur

Vorfeldbeleuchtung stehen diesbezüglich noch große Umbrüche an. Zu den hier dargestellten ca. 350 Fahrzeugen kommen weitere, in dieser Abbildung nicht abgebildete, Fahrzeuggruppen (s. Abschnitt 3).

Abbildung 2-1: Bisherige Elektrifizierung der Vorfeldflotte und Zieljahre zur Vollelektrifizierung (Stand Ende 2019)



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH, Losch Airport Service Stuttgart GmbH

Bei den in Abbildung 2-1 dargestellten Fahrzeuggruppen beträgt der Anteil von Elektrofahrzeugen insgesamt 40 %. In den Anfangsjahren des Elektrifizierungsprozesses wurden einzelne Fracht- und Push-Back-Schlepper sowie Hubbühnen mit Blei-Säure-Batterien (PbSB) erprobt, dann aber wurde in diesen Fahrzeuggruppen auf Lithium-Ionen-Batterien (LIB) umgeschwenkt. Die heute im Einsatz befindlichen elektrischen Vorfeldschlepper nutzen PbSB, jedoch will man auch hier in Zukunft auf LIB setzen. Nur bei den Förderbändern (PbSB) wird zumindest mittelfristig von einer Technologie jenseits der LIB ausgegangen. Die während des Elektrifizierungsprozesses als Übergangslösung eingesetzten Dieselheizungen in elektrischen Vorfeldbussen sind mittlerweile vollständig durch rein elektrische Heizungen ersetzt.

Durch die Elektrifizierung konnte der Dieselverbrauch um 70 % gesenkt werden im Vergleich zu einem Szenario ohne Elektrifizierung bis zum heutigen Zeitpunkt. Die letzte Phase im Projekt *scale up!* erbrachte insbesondere Erkenntnisse zu elektrischen Frachtschleppern, Fluggasttreppen und Pkw als Ramp-Agenten-Fahrzeugen, die im Folgenden dargestellt werden.

Ein weiteres großes Potenzial wird in der Elektrifizierung der Fahrzeuge externer Tankdienstleister gesehen. Im Rahmen des Projekts wurden Eignung des Einsatzprofils, benötigte Ladeinfrastruktur, erzielbare Verbrauchseinsparungen und die wirtschaftliche Perspektive detailliert untersucht. Auf Basis der Analysen wird aktuell diskutiert, wie eine Umsetzung erfolgen kann.

2.2.2. Elektrische Frachtschlepper

Seit Ende Oktober 2019 sind am Flughafen Stuttgart vier batterieelektrisch betriebene Frachtschlepper (Sherpa E) als Ersatz für die bisher eingesetzten Dieselfahrzeuge im Einsatz. Das Modell Sherpa E wurde von der Goldhofer AG zusammen mit der Suncar HK AG entwickelt. Die Frachtschlepper wickeln den Frachtguttransport auf dem Flughafen emissionsfrei ab. Sie transportieren die Fracht zu den Frachtflugzeugen oder als Beifracht zu den Passagierflugzeugen. Durch die neuen Fahrzeuge wird nun auch der Frachttransport batteriebetrieben und abgasfrei ermöglicht.

Abbildung 2-2: Abstellung und Ladung der elektrischen Frachtschlepper



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Die Energieeinsparung durch den Einsatz der E-Frachtschlepper liegt bei 84 % gegenüber dieselbetriebenen Frachtschleppern. Statt durchschnittlich 59,95 kWh je Betriebsstunde (Bh) werden mit der Elektrovariante nur noch 9,54 kWh / Bh verbraucht. Die Sherpa E-Schlepper sorgen außerdem für Emissionssenkungen und Lärmreduzierungen auf dem Vorfeld. Durch den Elektroantrieb wird der CO₂-Ausstoß gegenüber den Dieselschleppern auf dem Vorfeld um ca. 95 Tonnen reduziert.

Die Sherpas verfügen über eine Schleppkapazität von 80 Tonnen und werden von einem PEM-synchron-Motor mit einer Leistung von 67 kW angetrieben. Die maximale Ladeleistung beträgt 44 kW. Geladen werden die Fahrzeuge mit einem Typ 2-Stecker auf Wechselstrombasis über die vier 44 kW-Wallboxen der Schweizer Firma „crOhm“. Diese wurden in der Frachtübergabehalle auf der Südseite des Flughafens installiert (s. Abbildung 2-2). Durch ein intelligentes Ladesystem kann die 44 kW-Ladeleistung (63 A / 400 V) des Verteilerkastens flexibel über jede Wallbox einzeln abgerufen werden. So wird es beispielsweise ermöglicht, ein Fahrzeug mit 44 kW Ladeleistung aufzuladen. Wenn alle vier Schlepper gleichzeitig laden, wird die verfügbare Leistung dementsprechend aufgeteilt und jedes Fahrzeug wird mit 11 kW versorgt. Damit verlängert sich zwar auch die Ladedauer. Da aber in der Regel nur über Nacht bei langer Standzeit alle Schlepper gleichzeitig geladen werden, wird über Tag ein schnelles Zwischenladen mit 22 kW oder 44 kW ermöglicht. Damit ist eine leere Batterie in ein bis zwei Stunden wieder zu 100 % aufgeladen.

Der Sherpa E nutzt eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 62 kWh. Da in der Frachtübergabehalle nur ein 63 Ampere-Verteilerkasten zur Verfügung steht, würde ein zuverlässiger Betrieb mit Blei-Säure-Batterien aufgrund der zu langen Ladezeiten nicht möglich sein. Erst durch die Lithium-Ionen-Batterien wird ein schnelles Zwischenladen ermöglicht. Als Speichermaterialien für die Lithium-Ionen werden Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (Li-NMC 18650) verwendet. Entwickelt wurde die Batterie von der Kreisler Electric GmbH & Co KG. Der Hersteller gewährt fünf Jahre Garantie auf die Batterie.

Wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert, gab das Fahrpersonal in den ersten Monaten des Einsatzes umfangreiche Rückmeldungen aus der Nutzerperspektive. Aufgrund anfänglicher Probleme wurden Verbesserungen in Kühlkreislauf und Fahrerkabinenheizung, bei Rückfahreinrichtungen und Beschleunigungsverhalten, bei der Regeltechnik an den Wallboxen sowie in der Kommunikation zwischen Wallbox und Fahrzeug vorgenommen. Es bestehen und bestanden in der Anfangsphase der Nutzung darüber hinaus weitere Herausforderungen, z. B. im Geräuschverhalten, die ebenfalls zu Ausfallzeiten und geringer Akzeptanz durch das Fahrpersonal führten. Aufgrund enger Kooperation mit dem Fahrzeughersteller konnten die meisten Probleme inzwischen beseitigt werden, die E-Schlepper kommen zuverlässig zum Einsatz und die Zufriedenheit der Anwender ist deutlich gestiegen.

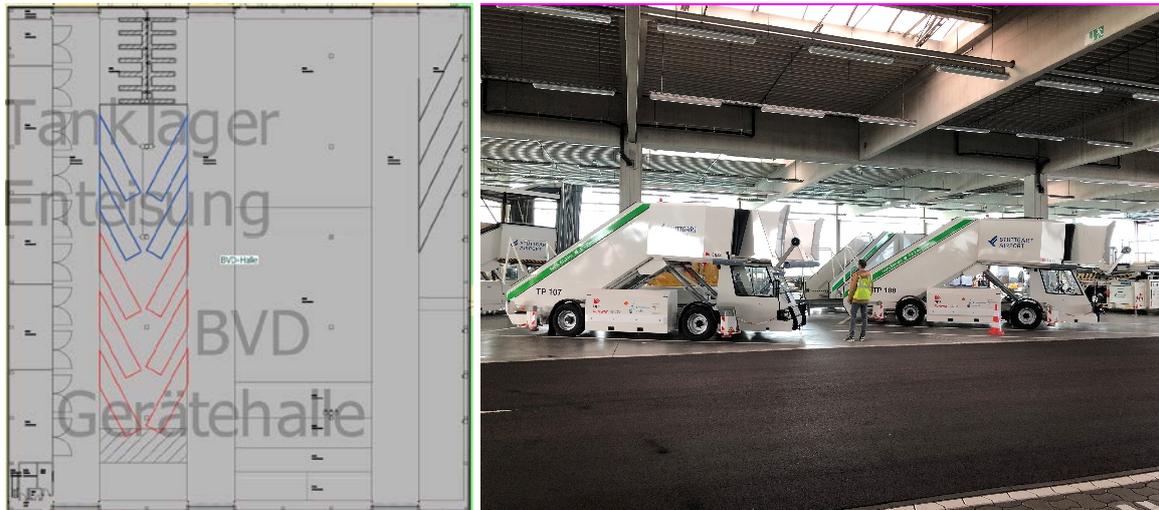
2.2.3. Elektrische Fluggasttreppen

Seit November 2019 sind am Flughafen Stuttgart drei elektrische Fluggasttreppen des Modells „Runway 1842Ce“ im Einsatz. Entwickelt wurden die Treppen von der slowenischen Firma „TiPS“. Eine Fluggasttreppe ist eine Zugangstreppe zum Besteigen oder Verlassen eines Flugzeuges. Die neuen Treppen ermöglichen das Ein- und Aussteigen von Flugzeugen bis zu einer Boeing 757. Bisher sind die Fahrerrückmeldungen bezüglich der Fahreigenschaften und des Komforts gut, was sich auch an den steigenden Betriebsstunden der Fahrzeuge widerspiegelt.

Eine Herausforderung bestand anfangs darin, ein geeignetes Abstellkonzept zu finden. Während die dieselmotorbetriebenen Treppen in der Vergangenheit ohne feste Regeln in der Bodenverkehrsdienste- (BVD-) Gerätehalle abgestellt wurden, musste für die elektrischen Pendants ein Abstellkonzept in Anhängigkeit von den Lademöglichkeiten erarbeitet werden. Da der Platz beschränkt ist, wurden sämtliche Abstellmöglichkeiten getestet, bis eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte. Die Fahrer der elektrischen Treppen können nun mithilfe der eingebauten Rückfahrkamera unkompliziert und exakt eine platzsparende Abstellposition einnehmen. Dafür werden die Treppen jeweils schräg zueinander eingeparkt (s. Abbildung 2-3). Eine spezielle Markierung auf dem Rückfahrkamera-Display zeigt den Fahrern an, bis zu welcher Stelle sie zurückfahren müssen. Dies erleichtert das Einparken der großen Fahrzeuge ungemein.

Da in den nächsten Jahren im Rahmen des internen Programms „Entwicklung einer Roadmap für eine 100 % elektromobile Vorfeldmobilität am Flughafen Stuttgart“ einige neue Treppen angeschafft werden, sollte langfristig ein neues Abstellkonzept entwickelt werden, ggf. außerhalb der BVD-Gerätehalle. Mit dem aktuellen Abstellkonzept passen etwa sechs weitere elektrische Treppen in der Gerätehalle nebeneinander.

Abbildung 2-3: Abstellung der elektrischen Fluggasttreppen in der BVD-Gerätehalle: blau = vorhandene Abstellpositionen, rot = geplante Abstellpositionen



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Die elektrische Ladeinfrastruktur wurde für die Abstellpositionen in der BVD-Gerätehalle ausgebaut, um eine ausreichende Stromversorgung der E-Treppen zu gewährleisten. Stand Februar 2020 sind die neuen elektrischen Fluggasttreppen durchschnittlich etwa 80 Kilometer gefahren. Dabei wurde ein Verbrauch von 3,26 kWh / Betriebsstunde ermittelt. Das entspricht einer Energieeffizienzsteigerung von 81 % gegenüber dieselbetriebenen Treppen, welche im Durchschnitt etwa 17 kWh / Bh benötigen.

Die elektrischen Fluggasttreppen benötigen ein Lademanagementsystem, damit die Batterien zu den Einsatzzeiten ausreichend geladen sind, kritische Ladestände während des Betriebes erkannt und Ladeaufträge angewiesen werden können. Das System funktioniert teils per automatisierter Meldung des Ladestands an den Server, teils durch aktive Kommunikation zwischen Leitstelle und Schichtleitung. Grundsätzlich werden die E-Treppen überwiegend nachts geladen, wenn weniger Einsätze stattfinden.

2.2.4. Elektrische Pkw als Ramp-Agenten-Fahrzeuge

Als Ansprechpartner für Cockpit- und Kabinenbesatzung sowie Schnittstelle zwischen OPS (Operations Office, Einsatzzentrale der Fluggesellschaft), Gatepersonal, Technik und Vorfelddarkeitemern überwacht und koordiniert der Ramp Agent alle Dienstleistungen, die an einem Flugzeug während dessen Bodenzeit geleistet werden. Dazu gehören unter anderem die Beladung, das Tanken, die Innenreinigung, das Catering, Versorgung mit Frischwasser und Abtransport des Abwassers sowie die Überwachung des Boardings der Passagiere. Um schnell zu den verschiedenen Flugzeugabstellpositionen zu gelangen, benötigt ein Ramp Agent ein Fahrzeug.

Seit 2018 fahren auch die Pkw der Ramp Agents elektrisch. Zum Einsatz kommen Fahrzeuge des Modells Renault ZOE mit einer 41 kWh-Lithium-Ionen-Batterie und einem 80 kW (108 PS) starken Motor (s. Abbildung 2-4). Der Flughafen Stuttgart hat für diesen Zweck 15 elektrische Renault ZOE angeschafft. Zusätzlich ist ein Renault ZOE als Abteilungsfahrzeug für die Abteilung „Commercial Management (AC)“ im Einsatz. Das Abteilungsfahrzeug wird unter anderem für außerhalb stattfindende Fortbildungen, Messebesuche oder Kontrollvorgänge auf dem Vorfeld genutzt.

Abbildung 2-4: Renault ZOE als Ramp-Agenten-Fahrzeug



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Die Akzeptanz seitens der Nutzerinnen und Nutzer ist bisher sehr hoch. Es gab bisher keine Probleme oder größere Ausfälle der ZOE, lediglich planmäßige Inspektionen wurden durchgeführt. Es wird eine Bereitstellungsquote von nahezu 100 % erreicht. Die Fahrzeuge haben ihre Abstellpositionen auf der Nord- und Südseite des Verkehrsleitungsgebäudes. Aufgeladen werden sie mit dem intelligenten Ladesystem „chargeBIG“ von MAHLE mit einer Ladeleistung bis zu 7,2 kW.

Stand Februar 2020 sind die Renault ZOE durchschnittlich etwa 5.000 km auf dem Vorfeld gefahren. Die Effizienzsteigerung gegenüber einem dieselbetriebenen VW Polo beträgt 75 %. Statt 13.782 kWh wurden mit dem Renault ZOE durchschnittlich nur noch 3.452 kWh benötigt. Die Effizienzsteigerung ist vor allem auf den hohen Wirkungsgrad des Elektromotors, die Bremsenergie-rückgewinnung und die Wärmerückgewinnung durch die eingebaute Wärmepumpe zurückzuführen.

2.3. Aufbau von Ladeinfrastruktur im Rahmen des Projekts

2.3.1. Weiterentwicklung der elektrischen Ladeinfrastruktur

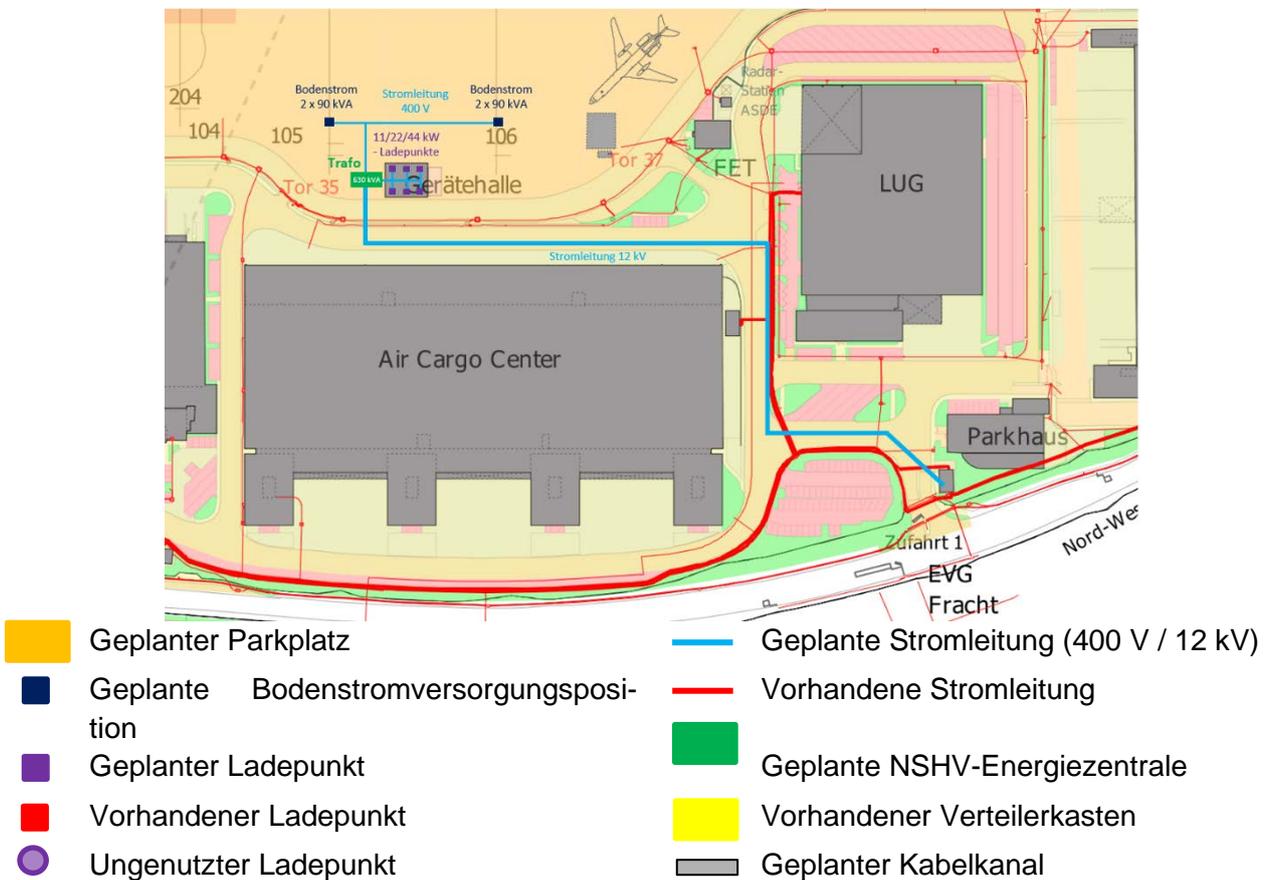
Der grundsätzliche Ansatz und Praxiserfahrungen bei Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur im Rahmen von *scale up!* sind im [ersten Working Paper](#) beschrieben. Durch den Drittabfertiger Losch Airport Service Stuttgart GmbH (LAS) wurden in den vergangenen Jahren, außerhalb des Projektkontexts, darüber hinaus Ladestationen für Vorfeldschlepper und Förderbänder sowie Wallboxen für LNF installiert. Aufgrund der guten Zusammenarbeit zwischen Flughafen und Drittabfertiger konnte in Übergangsphasen Ladeinfrastruktur der FSG mitgenutzt werden.

Mit der Anschaffung zusätzlicher elektrischer Fahrzeuge seitens der FSG musste und muss nun auch die Ladeinfrastruktur weiter ausgebaut werden. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den verschiedenen Erschließungsmöglichkeiten auf dem Vorfeld, welche in naher Zukunft umgesetzt werden könnten, um eine Grundlage für die weitere Anschaffung von elektrischen Fahrzeugen zu schaffen. Hierfür müssen neue Stromleitungen gelegt und weitere Energiezentralen (Niederspannungshauptverteilung, NSHV) installiert werden. Die folgenden Abschnitte stellen die Erschließungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur sowie frei verfügbare Stromkapazitäten an den jeweiligen Positionen dar.

2.3.2. „EVG-Fracht“ an der Südseite des Flughafengeländes

Wie in Abbildung 2-5 erkennbar, könnten auf der Südseite des Flughafens im Bereich des Energieversorgungsgebäudes für den Luftfrachtbetrieb („EVG-Fracht“) sechs neue Lademöglichkeiten für Flugzeugabfertigungsequipment sowie Bodenstromversorgung mit 400 Hz an den Flugzeugabstellpositionen 105 und 106 entstehen. Für die Lademöglichkeiten würde sich die südliche Bodenverkehrsdiensste-(BVD-)Gerätehalle anbieten, da die Fahrzeuge dort nachts abgestellt werden und in dieser Zeit die Fahrzeugbatterien wieder vollständig aufgeladen werden könnten. Die Ladepunkte würden beispielsweise zwei Hubbühnen mit 44 kW (400 V / 63 A), zwei Palettentransporter mit 22 kW (400 V / 32 A) und zwei Förderbänder mit 11 kW (400 V / 16 A) mit Strom versorgen. Zwei stationäre Bodenstromversorgungspositionen könnten je Position mit einer Leistung von 2x 90 kVA ertüchtigt werden und so die Stromversorgung von Flugzeugen bis zu der Größe einer Boeing 747 ermöglichen.

Abbildung 2-5: Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur an der Südseite (EVG-Fracht)



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

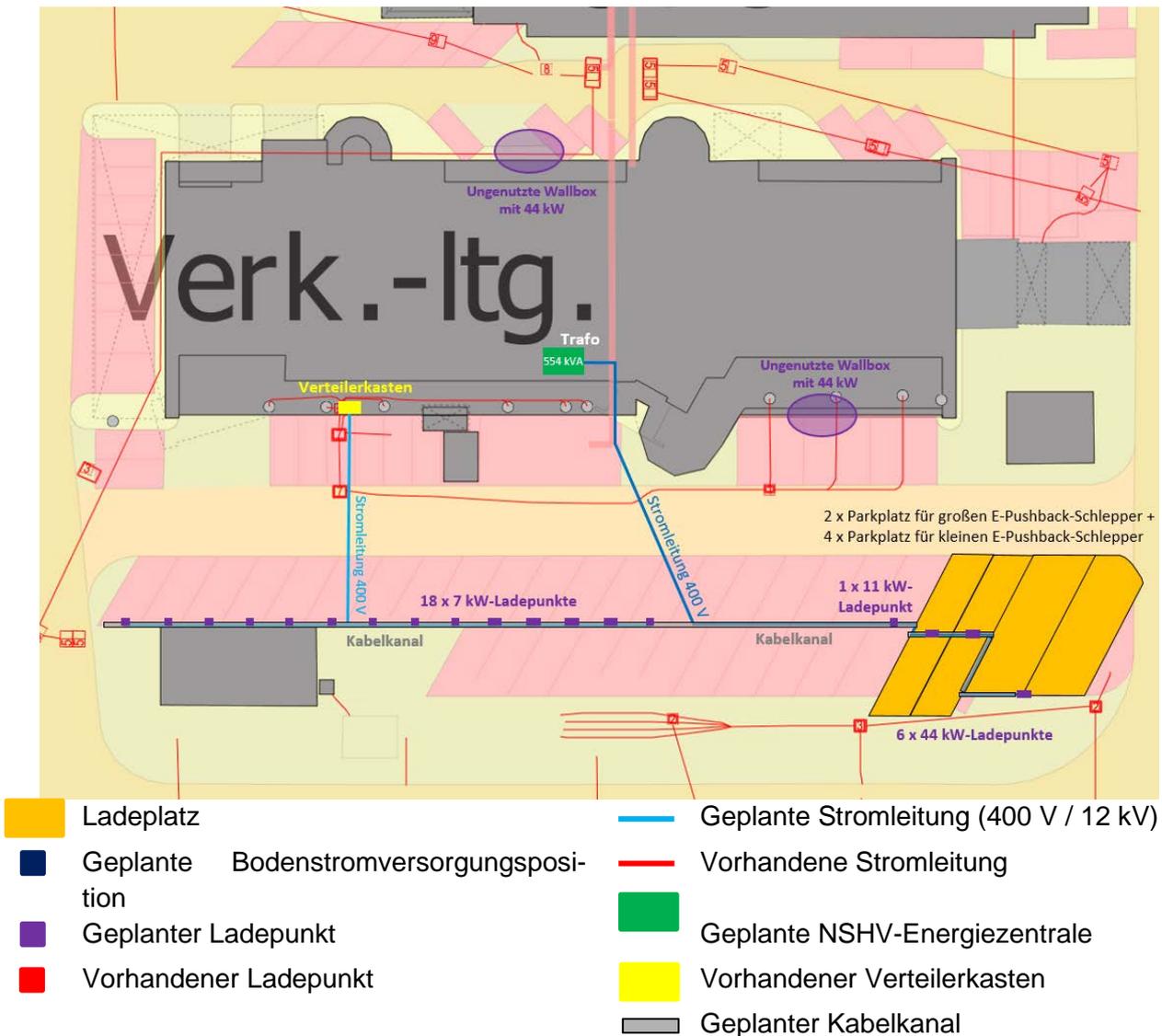
Da bisher noch keine Stromleitung in diesem Bereich verlegt wurde, könnte dies von der vorhandenen Energiezentrale bei Zufahrt 1 aus geschehen. Zusätzlich empfiehlt sich die Installation einer neuen NSHV-Energiezentrale mit 630 kVA Leistung direkt neben der BVD-Gerätehalle. Die neu verlegten Stromleitungen transportieren den Mittelspannungsstrom von der bestehenden MSHV-(Mittelspannungshauptverteilung-)Energierstation bei Zufahrt 1 zu der neuen 630 kVA-Energiezentrale. Diese wandelt den Strom anschließend auf Niederspannung um. Mit dem Niederspannungsstrom könnten nun die sechs neuen Ladestationen in der BVD-Halle und die zwei neuen

Bodenstromversorgungspositionen 105 und 106 versorgt werden. Übrig bleibt eine Transformationsleistung von 115 kW (400 V / 166 A), welche für die Ladeinfrastruktur von anderen elektrischen Betriebsfahrzeugen genutzt werden könnte. Damit wäre die Ladeinfrastruktur auf der Frachtsüdseite ausreichend ausgebaut, um die Flugzeugabfertigung und die Frachttransportprozesse auch in Zukunft zu bewältigen.

2.3.3. Verkehrsleitungsgebäude

Wie Abbildung 2-6 zeigt, bestehen weitere Erschließungspotenziale für die Ladeinfrastruktur im Bereich des Verkehrsleitungsgebäudes (VL). Im Untergeschoss des VL-Gebäudes befindet sich bereits eine NSHV-Energiezentrale (554 kVA) mit einer freien Kapazität von 277 kVA (400 V / 400 A). Es sind bereits 126 kW für 18 7 kW-Ladestationen mit dem intelligenten Ladesystem chargeBIG der Firma Mahle über den Verteilkasten auf der Südseite des Gebäudes erschlossen. Die übrigen 428 kVA bieten sich für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur auf den südlichen Parkplätzen an. Über den Verteilerkasten können maximal 36 Ladepunkte mit je 7 kW Leistung versorgt werden. Hierfür müssten zunächst neue Stromleitungen verlegt werden. Eine Möglichkeit wäre es, die Stromleitungen oberirdisch ohne Tiefbau in einem betonierten Kabelkanal direkt an den Parkpositionen entlang zu verlegen. Ein Kabelkanal stellt eine gute Maßnahme gegen die Beschädigung der Stromleitung dar.

Abbildung 2-6: Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur am Verkehrsleitungsgebäude



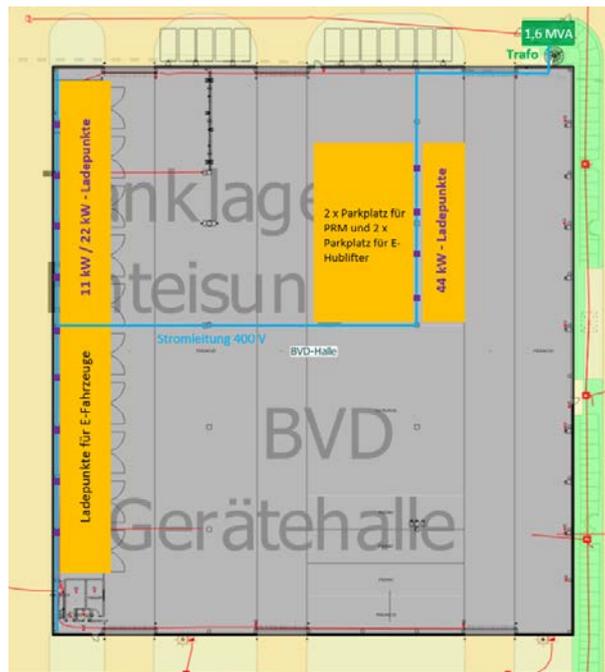
Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Auf der rechten Seite der Parkplätze (siehe gelbe Markierung) gibt es Erschließungspotenzial für sechs Ladestationen mit je 44 kW (400 V / 63 A) für E-Pushback-Schlepper und einen Ladepunkt mit 11 kW (400 V / 16 A) für andere elektrische Betriebsfahrzeuge. Diese Ladepunkte könnten über die vorhandene NSHV-Energiezentrale mit Strom versorgt werden. Die restliche Transformationsleistung würde über den Verteilerkasten auf die 18 neuen Ladepunkte auf der westlichen Parkplatzseite mit je 7 kW verteilt werden. Durch eine Verlegung der Stromleitung gibt es zusätzlich die Möglichkeit, die 2x 44 kW (400 V / 63 A) der ungenutzten Wallboxen am VL-Gebäude für die Ladeinfrastruktur auf dem südlichen Parkplatz zu nutzen. Die vorhandene Transformationsleistung sollte durchaus genügen, um auf nahezu allen Parkplätzen in diesem Bereich Lademöglichkeiten zu installieren.

2.3.4. BVD-Halle auf der Nordseite des Flughafengeländes

Um den Ausbau der Ladeinfrastruktur in der BVD-Halle (Abbildung 2-7) voranzutreiben, sollte zunächst die nordwestlich liegende 1,6 MVA-Energiezentrale mit einem NSHV-Abgangsfeld erweitert werden. Dadurch würde die Transformationsleistung um zusätzliche 346 kW (400 V / 500 A) erhöht werden. Durch die gewonnene Leistung könnte der mittlere Strang mit vier 44 kW-Ladepunkten (400 V / 63 A) ausgestattet werden. Die vier Ladepositionen würden beispielsweise zwei PRM-Fahrzeuge und zwei Hublifter mit Strom versorgen. Auf der Westseite der BVD-Halle gibt es die Möglichkeit, acht Ladepunkte mit je 2x 11 kW (400 V / 16 A), bzw. 2x 22 kW (400 V / 32 A) zu erschließen. Da hierfür die zusätzlich gewonnene Transformationsleistung nicht ausreichen würde, aber noch ein ungenutztes Stromkabel mit 88 kW (400 V / 125 A) und ein Stromkabel mit 66 kW (400 V / 93 A) freier Leistung in der BVD-Halle zur Verfügung steht, könnten durch Umverlegung der Stromleitung die neuen Ladestationen mit ausreichend Strom versorgt werden. Es würde sich anbieten, diese Ladepositionen für das Aufladen von GPUs zu nutzen, da diese in etwa die Größe der Abstellplätze haben. Für den Ausbau der Stromleitungen in der BVD-Halle müssten neue Kabeltrassen verlegt werden. Durch Einführung von intelligentem Ladeverhalten mithilfe von Lastmanagementmaßnahmen würden sich mehr elektrische Fahrzeuge mit der gleichen Anzahl an Lademöglichkeiten in der BVD-Halle aufladen lassen.

Abbildung 2-7: Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur an der BVD-Halle



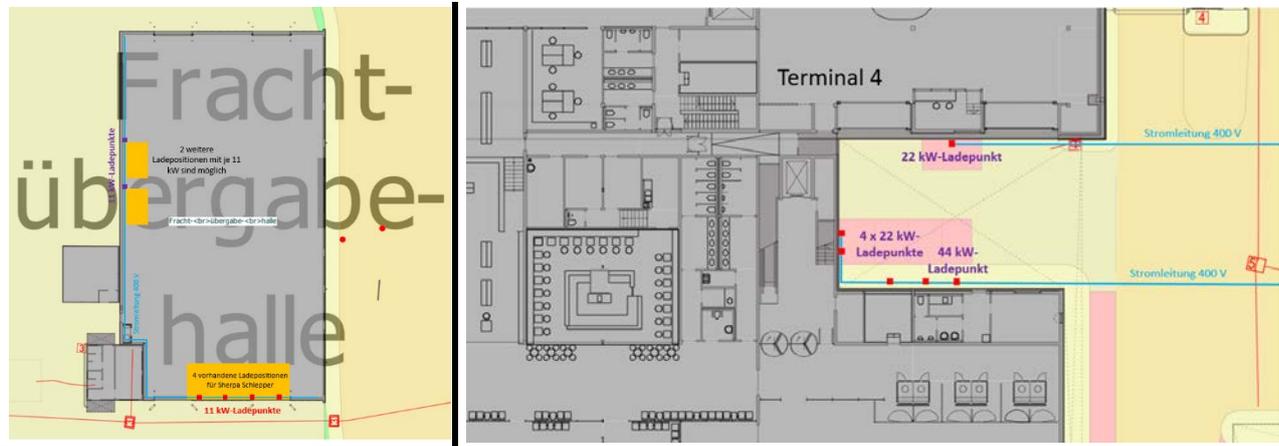
- | | | |
|--|---|---|
| Ladeplatz | Geplante Bodenstromversorgungsposition | Geplante NSHV-Energiezentrale |
| Geplanter Ladepunkt | Vorhandene Stromleitung | Vorhandener Verteilerkasten |
| Vorhandener Ladepunkt | Geplanter Kabelkanal | |
| Ungenutzter Ladepunkt | | |

Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

2.3.5. Frachtübergabehalle und Terminal 4

Wie Abbildung 2-8 zeigt, sind in der Frachtübergabehalle sowie an Terminal 4 momentan keine weiteren Ladepositionen geplant.

Abbildung 2-8: Vorhandene Ladeinfrastruktur an Frachtübergabehalle und Terminal 4



- | | | | |
|---|--|---|---------------------------------------|
|  | Ladeplatz |  | Geplante Stromleitung (400 V / 12 kV) |
|  | Geplante Bodenstromversorgungsposition |  | Vorhandene Stromleitung |
|  | Geplanter Ladepunkt |  | Geplante NSHV-Energiezentrale |
|  | Vorhandener Ladepunkt |  | Vorhandener Verteilerkasten |
|  | Ungenutzter Ladepunkt |  | Geplanter Kabelkanal |

Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Auf der Südseite der Frachtübergabehalle sind bereits vier Wallboxen mit je 11 kW (400 V / 16 A) für die batterieelektrischen Sherpa-Frachtschlepper installiert. Es stehen noch weitere 31 kW (400 V / 45 A) zur Verfügung, die bei Bedarf erschlossen werden könnten. Eine Erweiterung um beispielsweise zwei Ladepositionen mit je 11 kW (400 V / 16 A) Ladeleistung wäre durch den Ausbau der Stromleitung möglich. Eventuell müsste der Verteilerkasten mit einem breiteren Abgang nachgerüstet werden.

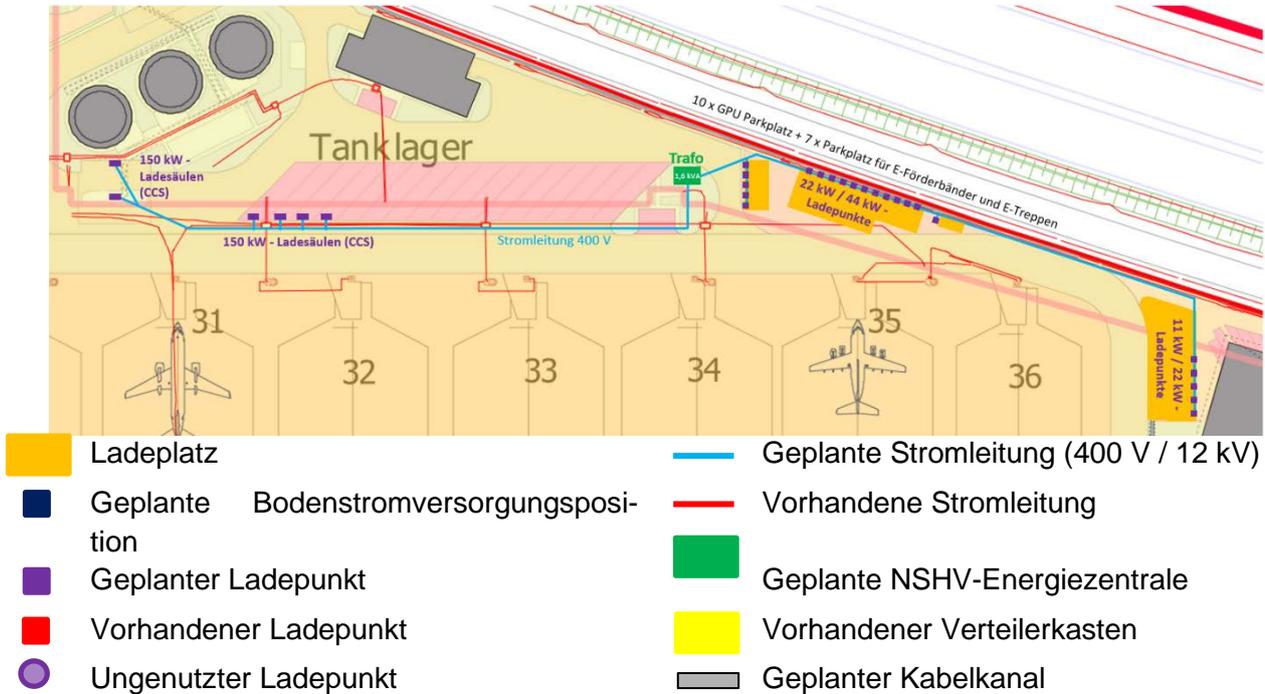
Im Terminal 4 befinden sich bereits sechs verfügbare CEE-Steckdosen für batterieelektrische Fahrzeuge. Fünf davon haben bei dem Gleichzeitigkeitsfaktor 1 eine Leistung von je 22 kW (400 V / 32 A). Zusätzlich gibt es eine 44 kW CEE-Steckdose (400 V / 63 A) für größere E-Fahrzeuge. Das ergibt zusammen eine frei verfügbare Reserve von 154 kW (400 V / 107 A).

2.3.6. Möglicher Ladeinfrastrukturaufbau für externe Tankdienstleister am östlichen Vorfeld

Wie in Abschnitt 2.2.1 erwähnt, wurde das Potenzial für eine 100 %-Elektrifizierung der Tankdienste betrachtet. Um eine Elektrifizierung der Flugfeldbetankungsfahrzeuge zu ermöglichen, muss auch hier zunächst eine Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Dieser Bereich (siehe Abbildung 2-9) bietet zudem die Möglichkeit für 22 neue Abstell- und Ladepositionen für E-Fahrzeuge der FSG (siehe gelbe Markierungen). Da dort keine ausreichende NSHV vorhanden ist, würde eine Investition in

eine 1,6 MVA große Energiezentrale gleich mehreren Abfertigungsprozessen zugutekommen und gleichzeitig für Skaleneffekte sorgen. Des Weiteren müssten neue Stromleitungen zu den Ladestationen und zur Energiezentrale verlegt werden.

Abbildung 2-9: Vorhandene und geplante Ladeinfrastruktur am Tanklager



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Um eine 100 %-Elektrifizierung der Tankfahrzeugflotte zu ermöglichen, sollten insgesamt sechs High-Power-Charging (HPC)-Ladestationen mit 150 kW CCS-Ladeleistung integriert werden. Zwei davon würden sich unmittelbar bei der Kerosin-Abfüllstation befinden, um die 20-minütige Befüllungszeit für Zwischenladungen zu nutzen. Die entscheidende Herausforderung beim Aufbau von Ladepunkten in unmittelbarer Nähe der Betankungsanlagen wird der Explosionsschutz sein. Alle Komponenten, die sich in einem gefährdeten Bereich befinden, benötigen ein EX-Zertifikat. Da noch keine genauen Informationen über die explosionsschutztechnische, rechtliche und wirtschaftliche Umsetzbarkeit vorliegen, muss dies in den weiteren Schritten genauer betrachtet werden. Falls sich herausstellen sollte, dass aus Sicherheitsgründen ein Aufbau der Ladesäulen am geplanten Ort nicht realisierbar ist, könnten alle CCS-Ladestationen bei den Abstellflächen der Flugfeldbetankungsfahrzeuge installiert werden und die Fahrzeugbatterien in Phasen mit geringem Auftragsvolumen zwischenladen.

Die restlichen vier CCS-Ladestationen könnten bei den Abstellplätzen der Flugfeldbetankungsfahrzeuge stehen. Somit hätten die Tankdienstleister einen Bedarf von 900 kW Ladeleistung. Die restlichen 700 kW Transformationsleistung könnte die FSG für die Abstellplätze mit integrierten Ladepunkten nutzen. Diese 700 kW sind ausreichend, um 10 Ladepunkte mit je 44 kW (400 V / 63 A) für batterieelektrische GPUs sowie sieben Ladepunkte mit je 22 kW (440 V / 32 A) für E-Fluggasttreppen und E-Förderbänder mit Strom zu versorgen. Links neben dem östlichen Hangar befinden sich weitere nicht erschlossene Abstellflächen für Equipment für die Flugzeugabfertigung. Diese Fläche bietet Platz für etwa zehn weitere Fahrzeugabstellpositionen. Da noch 105 kW

Transformationsleistung zur Verfügung stehen, könnten in diesem Bereich vier 22 kW-(400 V / 32 A) Ladestationen und ein 11 kW-Ladepunkt (400 V / 16 A) installiert werden.

2.3.7. Mahle chargeBIG – intelligentes Ladesystem

Mit der Anschaffung des chargeBIG-Ladesystems setzt der Stuttgarter Flughafen bei der Elektrifizierung von Mitarbeiter- und Flottenparkplätzen auf eine kostengünstige Lösung und nutzt seine bestehende Infrastruktur optimal aus, statt großflächig in den Netzausbau investieren zu müssen. ChargeBIG ist ein Corporate Start-up der Firma Mahle, das darauf abzielt, Leistungsengpässe im Stromnetz zu verringern und einen schnellen Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur zu ermöglichen.

Abbildung 2-10: chargeBIG-Ladepunkt mit Umspanneinrichtung



Quelle: Flughafen Stuttgart GmbH

Das chargeBIG-Ladekonzept für einphasiges „AC Destination Charging“ ermöglicht Ladeleistungen zwischen 2,3 und 7,2 kW und setzt sich aus einer intelligenten zentralen Steuereinheit mit fest angeschlagenen Kabeln und Steckern anstelle von klassischen Ladesäulen zusammen. Mittels intelligenter Steuerung der Ladevorgänge und des Design-to-Cost-Ansatzes können Investitionen in den Ausbau des Netzes vermieden werden, was zu Kosten- und Zeiteinsparungen beim Aufbau der Ladeinfrastruktur führt.

Über ein dynamisches, phasenindividuelles Lastmanagement wird die verfügbare Ladeleistung durch eine zentrale Steuereinheit auf die parkenden Fahrzeuge verteilt. So werden Schiefasten im Stromnetz vermieden. Das Ladesystem reagiert dabei flexibel auf andere Verbraucher im Netz und nutzt die Elektrofahrzeuge als regelbare Last. Dies ermöglicht eine optimale Nutzung des verfügbaren Stromnetzes. Das „chargeBIG“-System setzt auf eine zentrale Elektronik aller Ladepunkte, so dass diese sehr einfach gehalten werden können, und erzielt so Kostenvorteile bei Installation und Wartung. Weitere Entscheidungsgründe für das chargeBIG-System waren erhöhte elektrische Sicherheit, Komfort für den Endkunden, reduzierte Kosten bei Unfällen und Vandalismus,

Kosteneinsparungen durch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Stromtarifen sowie die Möglichkeit, das Ladesystem mit Batteriespeicher und PV zu kombinieren.

Auf dem Vorfeld kommt das Ladesystem jeweils auf der Nord- und Südseite des Verkehrsleitungsgebäudes zum Einsatz. Des Weiteren wurden Abstellpositionen für Betriebs- und Werkstattfahrzeuge auf dem Betriebswerkstattgelände mit dem intelligenten Ladesystem erschlossen. Die Erfahrungen mit dem System von Mahle am Flughafen Stuttgart sind bisher durchweg positiv. Es gab lediglich zu Beginn ein kleineres Softwareproblem, welches schnell behoben werden konnte.

2.3.8. Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der Anschaffung von neuen elektrischen Betriebsfahrzeugen in den nächsten Jahren die Ladeinfrastruktur weiter angepasst werden muss. Da hierfür einige Bereiche gute Ausgangsbedingungen bieten, sollte zumindest mittelfristig die Kapazität an Lademöglichkeiten durch ein Umsetzen der oben vorgestellten Maßnahmen, ausreichend sein. Um die Ladeinfrastruktur flexibel nutzen zu können, sollten langfristig die Ladepunkte mit CCS-Technologie (Combined Charging System) ertüchtigt werden. Durch das deutlich schnellere Aufladen der Batterie und den einheitlichen Ladesteckertyp wird keine 1:1-Beziehung zwischen Lademöglichkeit und E-Fahrzeug nötig sein, wie es heute noch bei den meisten elektrifizierten Fahrzeugkategorien der Fall ist.

2.4. Erkenntnisse aus dem betrieblichen Alltag, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit

2.4.1. Fragestellungen und Methodik

Im Rahmen einer Befragung von Mitarbeitern aus dem Management und dem operativen Betrieb am Flughafen Stuttgart wurde untersucht, welche Erfahrungen die Mitarbeiter bei der Elektrifizierung der Vorfeldflotte im betrieblichen Alltag gemacht haben und inwieweit diese Transformation auch in der Mitarbeiterschaft auf Akzeptanz gestoßen ist. Die Forschungsfragen, welche im Rahmen von Einzel- bzw. Gruppengesprächen an alle relevanten Akteursgruppen gestellt wurden, bewegten sich innerhalb des folgenden Themenfelds:

- **Praxiserfahrung / Praxistauglichkeit:** Welche Praxiserfahrungen wurden gemacht? Gibt es Unterschiede zwischen den konventionellen Fahrzeugen und damit konkrete Auswirkungen auf die Arbeit und die Prozessabläufe? Welche (neuen) Anforderungen an Mensch und Technik bestehen?
- **Change-Management bei Umweltinnovationen:** Wie kann eine erfolgreiche Einführung und Etablierung von Umweltinnovationen (hier: elektromotorische Fahrzeuge in der Vorfeld-Mobilität) gelingen? Welche technischen und organisatorischen Innovationen sind dafür notwendig?
- **Akzeptanz von Umweltinnovationen:** Wie werden die E-Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeitpunkten von den verschiedenen Akteursgruppen bewertet?
- **Innovationshemmnisse und -potenziale:** Wird der Einsatz von E-Fahrzeugen auf dem Vorfeld durch interne oder externe Faktoren gehemmt? Wo finden sich Erfolgspotenziale?
- **Skalierbarkeit und Übertragbarkeit:** Unter welchen Rahmenbedingungen sind die Umweltinnovationen (und der Einführungsprozess) intern skalierbar bzw. extern übertragbar?

Die Themenfelder beziehen sich dabei gleichermaßen auf die Akzeptanz bei Mitarbeitern als auch auf die technische Umsetzbarkeit. So muss die Elektromobilität ihre Praxistauglichkeit sowohl bzgl.

der Anforderungen an den **Menschen als auch** an die **Technik** und Infrastruktur unter Beweis stellen. Auch das Change-Management betrifft sowohl den organisatorischen Rahmen wie auch die technische Umsetzung als solche. Zuletzt können Innovationspotenziale gleichermaßen in einer hohen Akzeptanz der neuen Technologie begründet sein, als auch in einem hohen CO₂-Einsparungspotenzial durch den technologischen Fortschritt.

Zudem wurden durch die Flughafengesellschaft interne Feedbackmöglichkeiten zur Bewertung der E-Fahrzeuge eingesetzt. Um die Fahrzeuge kontinuierlich zu verbessern und an die Fahrerwünsche anzupassen, gab es auch bei den Fahrzeugen der letzten Projektphase (s. Abschnitte 2.2.2 bis 2.2.4) während der ersten Monaten nach Inbetriebnahme Rückmeldebögen, die nach jeder Schicht von den Fahrern ausgefüllt werden. Mit diesen konnten Schäden gemeldet und Verbesserungsvorschläge geäußert werden. Außerdem wurden der Batteriestand und die Betriebsstundenzahl zu Schichtbeginn und Schichtende festgehalten. Dies ermöglicht die Kontrolle über die Richtigkeit der Tachoangaben in den Einführungsmonaten. Die Daten wurden regelmäßig in eine Datenbank eingepflegt und an den Fahrzeughersteller weitergeleitet, um Probleme zu beheben und Verbesserungsvorschläge umzusetzen.

2.4.2. Praxiserfahrungen und Praxistauglichkeit

Bei der Nutzung der E-Fahrzeuge (hier v. a. Vorfeldschlepper und -busse) sowie den E-Förderbändern konnte bei der Nutzung kein merklicher Unterschied zu Dieselfahrzeugen festgestellt werden. Die Veränderung gegenüber den bisher im Einsatz befindlichen Dieselfahrzeugen wurde vor allem beim nun notwendigen Laden wahrgenommen. Die insgesamt zur Verfügung stehende Anzahl an Fahrzeugen wurde als ausreichend beschrieben.

Bzgl. der Ladevorgänge erwies sich das Nachtflugverbot als vorteilhaft, da es dadurch möglich ist, die Fahrzeuge vor allem über Nacht zu laden. Bei Bussen werden zudem auch Zwischenladungen in den Pausen der Mitarbeiter gemacht, was ebenfalls auf hohe Akzeptanz bei den Mitarbeitern stieß, da die zusätzlichen Pausen in diesem Zuge klar definiert wurden und nicht mehr im Fahrzeug verbracht werden müssen.

Es ist hinsichtlich der Praxistauglichkeit von E-Fahrzeugen in der Vorfeldmobilität auch darauf hinzuweisen, dass durch den höheren Reifenabrieb und die bisher vorwiegend verwendeten Blei-Säure-Batterien¹ zusätzliche Wartungs- und Reparaturvorgänge entstehen. Der Wartungs- und Reparaturaufwand am sonstigen Antriebsstrang wird durch die Elektrifizierung jedoch als geringer eingeschätzt. Laut Aussage der Befragten zeigte sich bereits während der Erprobungsphase insgesamt ein Rückgang des Wartungsaufwands. Mit dem Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien entfällt zudem perspektivisch die bisher erforderliche Batteriewartung.

2.4.3. Anforderungen an Mensch und Technik

Insgesamt kann als Ergebnis der Befragung festhalten werden, dass sich die Arbeitsabläufe nur im geringen Umfang (z. B. Laden der Fahrzeuge statt Betankung) verändert haben. So bleibt auch der personelle Mehraufwand durch die technologische Innovation weitgehend aus. Bei Einführung bestand ein Schulungsaufwand in Form von Einweisungen. Da diese Einweisungen sich auf wenige Geräte und Personengruppen beschränkten, war dieser personelle Aufwand insgesamt jedoch überschaubar. Bei Bussen gestaltete sich die Einweisung hingegen etwas aufwändiger. Zudem besteht in der Werkstatt ein Bedarf an Zusatzqualifikationen, wie etwa Elektrofachkenntnisse für

¹ V.a. in Verbindung mit dem regelmäßigen Nachfüllen des Elektrolyts (destilliertes Wasser)

Hochvoltssysteme. Dagegen wird die geringere Belastung an Luftschadstoffemissionen und Lärm, die lokal durch den Einsatz der E-Fahrzeuge reduziert werden konnten, als sehr positiv wahrgenommen.

2.4.4. Veränderung der Nutzerakzeptanz über die Zeit

Zu Beginn waren viele Mitarbeiter in der Erprobungsphase der neuen Technologie gegenüber skeptisch eingestellt. Zweifel bestanden hierbei vor allem hinsichtlich der Reichweite der Fahrzeuge. Mit der steigenden Anzahl an verfügbaren E-Fahrzeugen und einer regelmäßigeren Nutzung stieg jedoch auch die Akzeptanz der Mitarbeiter. Bei Roll-out konnten bereits hohe Akzeptanzwerte erreicht werden, so dass die Fahrer auf dem Vorfeld letztendlich die E-Fahrzeuge sogar bevorzugt wählten. Sicherlich ist hierbei auch die oben erwähnte signifikante Verbesserung der Arbeitsbedingungen (weniger Luftschadstoff- und Lärmbelastung) ein ausschlaggebender Aspekt hinter der hohen Nutzerzufriedenheit.

2.4.5. Erfolgsfaktoren und Hemmnisse beim Change-Management

Aus den Aussagen zur Praxistauglichkeit und Akzeptanz der E-Fahrzeuge in der Vorfeldflotte lassen sich weitere Erfolgsfaktoren und Hemmnisse beim Change-Management ableiten.

Auf der Ebene der **Akteure und der Kommunikation** zeigt sich, dass vor allem Akteure auf der Managementebene das Change-Management maßgeblich vorantreiben können. Hierbei können neu gebildete Fach-Teams, die sich dem Thema Elektromobilität widmen, eine wertvolle Unterstützung sein. Um eine unternehmensübergreifende Akzeptanz zu schaffen, müssen aber auch die Mitarbeiter aus dem operativen Geschäft entsprechend eingebunden werden. Zuletzt hilft auch der Austausch mit externen Unternehmen aus Wirtschaft und Wissenschaft (z. B. über Förderprojekte), um die Elektrifizierung der Vorfeldflotte voranzubringen.

Organisatorisch erwies sich vor allem eine frühzeitige Planung und Installation der Ladeinfrastruktur als zielführend. Neben der Möglichkeit des Ladens der Fahrzeuge in den Pausen erwies sich auch die Tatsache, dass auch bei den neuen Fahrzeugtypen keine Unterbrechung der Schicht notwendig war, als hilfreich. Ein Punkt, welcher die Organisation einer Fahrzeugumstellung erschwert, ist die Fördermittelbeschaffung. Unterstützung dabei kann die verantwortlichen Personen entlasten und damit den Prozess insgesamt vorantreiben.

Für die Umstellung auf E-Fahrzeuge in der Vorfeldmobilität ist neben organisatorischen Aspekten eine funktionierende Ladeinfrastruktur zwingende Voraussetzung. Ein intelligentes Lademanagement kann hier vor allem bei Bussen für Entlastung sorgen. Auch muss die fehlende Flexibilität, welche die Errichtung einer Ladeinfrastruktureinrichtung mit sich bringt, nicht zwingend als Nachteil gegenüber der flexibleren Handhabung bei der Dieseltankung gewertet werden. So wird die Ordnung bei der Fahrzeugabstellung, die durch die Ladeinfrastruktur am Flughafen Stuttgart vorgegeben ist, gerne angenommen. Zwar kam es bei manchen Fahrzeugtypen zu einem Mehrbedarf an Flächen aufgrund des Ladeinfrastrukturbedarfs. In anderen Fällen hat aber die Elektrifizierung auch einen Impuls zu einer genaueren Betrachtung der Abstellung geführt. In der Folge konnte das vorher bei den Dieselfahrzeugen übliche „unsystematische“ Abstellen unterbunden und durch die Elektrifizierung sogar eine bessere Flächenausnutzung erzielt werden.

Als Hemmnisse bei der Transformation der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart wurden von den Befragten vor allem die folgenden Aspekte hervorgehoben: Zunächst besteht seitens der Hersteller aktuell noch eine zu geringe Auswahl an Fahrzeugmodellen. Gleichzeitig sind die Anschaffungskosten der Fahrzeuge, die oftmals Spezialfahrzeuge darstellen, noch zu hoch und nur in Kombination

mit Fördermitteln tragbar. Auch das Interesse der Airlines ist aktuell noch zu gering; die höheren Materialkosten können nicht an die Airlines in Form von höheren Abfertigungspreisen weitergegeben werden. Neben dem hohen Kostendruck bei der Beschaffung der Fahrzeuge, sind bei einer derartigen Umstellung auch die Kosten und der Platz für Ladesäulen auf dem Vorfeld zu berücksichtigen.

2.4.6. Wirtschaftlichkeit

Elektrische Vorfeldfahrzeuge können bereits teilweise wirtschaftlich betrieben werden. Jedoch ist weiterhin bei den meisten elektrischen Vorfeldfahrzeugen von höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu dieselbetriebenen auszugehen. Neben den höheren Kosten für Lithium-Ionen-Batterien sind es auch die batterie-unabhängigen Fahrzeugkosten, die durch eine bislang noch geringe Stückzahl in der Produktion die Gesamtinvestitionen der Fahrzeuge in die Höhe treiben. Dagegen kompensieren sich die Zusatzkosten in der Anschaffung zum Teil über die geringeren Betriebskosten über die Nutzungsdauer. Auch die Kosten für Ladeinfrastruktur fallen trotz hoher Anfangsinvestitionen auf der Ebene der Einzelfahrzeuge langfristig wenig ins Gewicht. Eine Schwierigkeit bzgl. der Wirtschaftlichkeit von E-Fahrzeugen im Vorfeldeinsatz stellen nach wie vor Spezialfahrzeuge dar: durch kleine Produktionsvolumina im Anwendungskontext Flughafen sind diese weiterhin mit hohen Zusatzkosten verbunden. Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen finden sich im [ersten Working Paper](#) aus dem Projekt *scale up!*.

3. Roadmap zur Erreichung eines weitgehend elektrischen Fuhrparks

3.1. Weitere Elektrifizierung der Vorfeldflotte bis 2035

Aufgrund der gesteckten Klimaziele (u. a. 100 % elektrische BVD-Flotte bis 2030) und der sehr guten Erfahrungen mit den E-Fahrzeugen (s. Abschnitte 2.2 und 2.4) ist für die kommenden Jahre eine weitere Elektrifizierung der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart vorgesehen. Die Projektpartner haben hierzu eine Roadmap erstellt, die den Prozess der mittelfristigen Umstellung fast aller Fahrzeugkategorien skizziert. Sie dient dazu, aus der Entwicklung der Zahl elektrischer Fahrzeuge (3.1) die Entwicklung von Energiebedarfen und CO₂-Emissionen abzuleiten (3.2). Weiterhin werden mit Hilfe einer Projektion von Fahrzeuganschaffungskosten (3.3) und weiteren Kostenparametern (3.4) die Folgen der Elektrifizierung für die Fuhrparkkosten insgesamt beleuchtet (3.5). Basierend darauf werden Implikationen für die Energieversorgung bzw. Wechselwirkungen analysiert (Kapitel 5).

Ziel der Roadmap ist nicht, möglichst genau den weiteren Prozess am Flughafen Stuttgart zu antizipieren oder zu planen. Vielmehr sollen am konkreten Beispiel Erkenntnisse gewonnen werden, die sich auch auf andere Standorte übertragen lassen (s. Abschnitt 6.2). Zudem werden aus den Erkenntnissen Handlungsempfehlungen abgeleitet (s. Abschnitt 6.3). Als Grundlage dafür dienen auch die Sensitivitätsbetrachtungen in Abschnitt 3.6.

Der Betrachtungsrahmen der Vorfeldmobilität wird in der Roadmap noch weiter gefasst: Anders als etwa in Abbildung 3-1 sind auch die Fahrzeuge von Feuerwehr und Winterdienst sowie Tank- und Cleaningfahrzeuge berücksichtigt, sodass sich eine Gesamtzahl von 439 Fahrzeugen ergibt. In der hier verwendeten Systematik werden diese Fahrzeuge in 19 Fahrzeugkategorien (z. B. Pkw, Vorfeldbus, GPU selbstfahrend, Hubtransporter) in 20 Anwendungen (z. B. Mannschaftstransport, Be-tankung, Follow-me, Winterdienst) eingeteilt. Eine Fahrzeugkategorie kann dabei für mehrere unterschiedliche Anwendungen genutzt werden und ebenso eine Anwendung von mehreren unterschiedlichen Fahrzeugkategorien erbracht werden. Für jede der resultierenden 32 Kombinationen aus Fahrzeugkategorie und Anwendung wurden Kosten, Energiebedarfe, Elektrifizierungszeitpunkt etc.

individuell betrachtet. Im Interesse der Übersichtlichkeit wurden die 32 Kombinationen in den Abbildungen zu 12 Oberkategorien zusammengefasst, die in Tabelle 3-1 aufgeführt sind.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Kombinationen Anwendung / Fahrzeugkategorie in Oberkategorien für die Ergebnisdarstellung

Oberkategorie	Anwendung	Fahrzeugkategorie
Fluggasttreppe etc.	Ein-/Aussteigen/-laden	Fluggasttreppe
Fluggasttreppe etc.	Ein-/Aussteigen/-laden	Medical Highloader
Förderband	Be- und Entladung Gepäck	Förderband
Frachtschlepper	Gepäck- und Frachttransport	Frachtschlepper
GPU	Stromversorgung Flugzeug am Boden	GPU selbstfahrend
GPU	Stromversorgung Flugzeug am Boden	GPU gezogen
GPU	Stromversorgung Flugzeug am Boden	E-Vorfeldposition
Hubbühne etc.	Ein-/Aussteigen/-laden	Hubbühne (= „Highloader“)
Hubbühne etc.	Ein-/Aussteigen/-laden	Hubtransporter
Hubbühne etc.	Gepäck- und Frachttransport	Palettentransporter
Lkw / Sonder-Lkw	Abwasser	Lkw 7,5t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Beleuchtung Vorfeld (selbstfahrend)	Lkw 7,5t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Betankung	Lkw 20t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Betankung (Skytanking)	Lkw 20t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Feuerwehr	Lkw 20t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Frischwasser	Lkw 7,5t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Werkstatt	Lkw 7,5t / Sonder-Lkw
Lkw / Sonder-Lkw	Winterdienst	Lkw 20t / Sonder-Lkw
LNF	Cleaning	LNF
LNF	Feuerwehr	LNF
LNF	Mannschaftstransport	LNF
LNF	Sonstiges Bodenverkehrsdienste	LNF
LNF	Werkstatt	LNF
Pkw	Feuerwehr	Pkw
Pkw	Follow-me	Pkw
Pkw	Sonstiges Bodenverkehrsdienste	Pkw
Pkw	Werkstatt	Pkw
Push-Back-Schlepper	Push-Back	Push-Back-Schlepper
Sonstiges	Air Start Unit	Air Start Unit
Sonstiges	Feuerwehr	Bus

Oberkategorie	Anwendung	Fahrzeugkategorie
Vorfeldbus	Passagiertransport	Vorfeldbus
Vorfeldschlepper	Beförderung von Gepäckwagen (& Treppen & GPUs)	Vorfeldschlepper (=“Gepäckschlepper“)

Quelle: Öko-Institut

Für jede Kombination Anwendung / Fahrzeugkategorie wurde eine Entwicklung der Anzahl von Fahrzeugen mit elektrischem und mit Dieselantrieb für den Zeitraum von 2014 bis 2035 in Jahres-schritten aufgestellt. Diese Elektrifizierungs-Zeitreihen entsprechen für die Jahre 2014 bis 2018 den realen Fuhrparkzahlen bzw. für 2019 und 2020 den konkreten Beschaffungsplänen. Für die Jahre 2021 bis 2035 wurde eine wahrscheinliche Entwicklung über folgende Parameter hergeleitet:

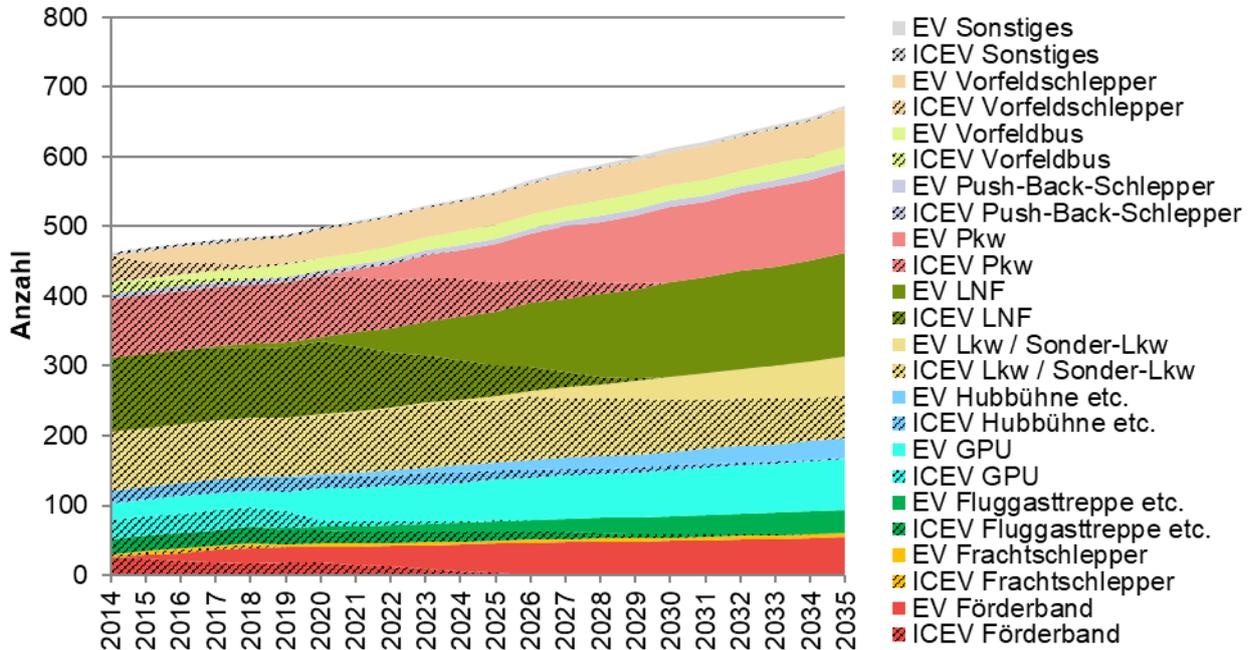
- Wachstum des **Gesamtbestandes** an Fahrzeugen aufgrund zunehmender Abfertigungszahlen. Dazu wurde das durchschnittliche Wachstum der Flugbewegungen zwischen 2014 und 2017 von 2 % zugrunde gelegt. Der Fahrzeugbedarf wurde angesichts von hohen Unsicherheiten in Prognosen zum Flugverkehr und der komplexen Zusammenhänge zwischen der Zahl von Flugzeug-abfertigungen, Passagierzahlen, Flugplan und Gerätebedarf vereinfacht abgebildet: Das Wachstum des benötigten Fahrzeugbestands bis 2035 wurde mit jährlich +2 % fortgeschrieben. Der bei Aufstellung der Roadmap noch nicht abzusehende Einbruch der Flugabfertigungen infolge der Corona-Krise ist dementsprechend nicht berücksichtigt.
- **Elektrifizierungsbeginn** der Fahrzeugkategorie, d. h. erwarteter Zeitpunkt des ersten regulären Einsatzes eines E-Fahrzeugs in der Kategorie. Grundlagen sind hier Ankündigungen der Fahrzeughersteller, Einschätzungen der Projektpartner, Ergebnisse der beiden Projektworkshops im Jahr 2019 sowie von Hintergrundgesprächen mit Teilnehmenden der Workshops.
- Übliche **Nutzungsdauer** der jeweiligen Fahrzeugkategorie in der jeweiligen Anwendung (zwischen zehn und 15 Jahren)

Grundsätzlich wurde angenommen, dass nach 2020 ab dem Zeitpunkt des Elektrifizierungsbeginns in der jeweiligen Fahrzeuggruppe zusätzliche Geräte aufgrund des Fuhrparkwachstums sowie solche, die aufgrund der Fuhrpark-Erneuerungsrate als Ersatz beschafft werden, ausschließlich über einen elektrischen Antrieb verfügen. Im Übrigen – dies ist für die folgenden wirtschaftlichen Betrachtungen relevant – wird auch angesetzt, dass die elektrischen Geräte in jeder Fahrzeuggruppe über eine einheitliche Batterietechnologie verfügen: Blei-Säure-Batterien bei Förderbändern, Nickel-Cadmium-Batterien bei Hubtransportern und Lithium-Ionen-Batterien in allen anderen Kategorien. Dass teils in den vergangenen Jahren Fahrzeuge mit davon abweichender Batterieausstattung angeschafft wurden, wurde in der Roadmap nicht berücksichtigt. Auch wird vereinfacht angesetzt, dass alle Fahrzeuge von Beginn an über rein elektrische Nebenverbraucher verfügen, nicht etwa über diesel- oder heizölbasierte Heizungen, wie anfangs bei den Bussen geschehen.

In einzelnen Gruppen bestehen darüber hinaus seitens der Betreiber Ziele, die Elektrifizierung bis zu einem bestimmten Zieljahr abgeschlossen zu haben, die in der Roadmap ebenfalls abgebildet sind – beispielsweise Push-Back-Schlepper bis 2024, Förderbänder bis 2026, Hubbühnen bis 2027 und Werkstatt-LNF bis 2028. In diesen Fällen wurde angenommen, dass ein Ersatz von Diesel durch Elektrofahrzeuge teils vor Ende der üblichen Lebensdauer stattfindet. Darüber hinaus bilden die Bodenstromaggregate, sogenannte GPUs (Ground Power Units), die die Flugzeuge während des Aufenthalts mit Strom versorgen, einen Sonderfall: Hier ist in Stuttgart einerseits bis 2020 ein deutlicher Ausbau der elektrifizierten Vorfeldpositionen geplant – diese stationäre Versorgung mittels Kabel am Ort der Abfertigung ersetzt den Einsatz von mobilen GPUs und wird daher zur

Bilanzierung auch wie ein Elektrofahrzeug gezählt. Zudem sollen ab demselben Jahr schrittweise die verbleibenden mobilen (d. h. selbstfahrenden oder gezogenen) Geräte mit Dieselantrieb durch solche mit E-Antrieb ersetzt werden.

Abbildung 3-1: Entwicklung der Anzahl von E-Fahrzeugen nach Fahrzeuggruppen



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

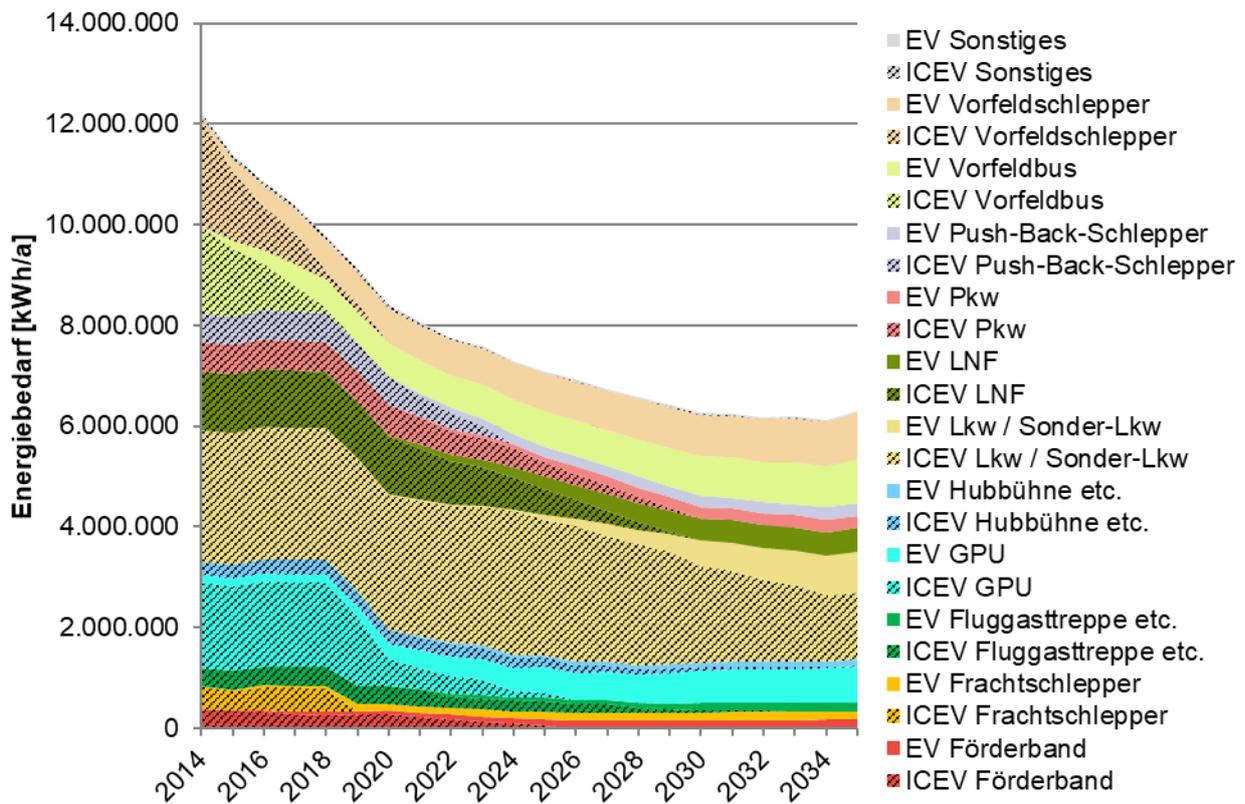
Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, wächst aufgrund der Grundannahme eines jährlich 2-prozentigen Wachstums der Gesamtfuhrpark im Betrachtungszeitraum von 463 auf 674 Fahrzeuge (+46 %). Darunter befinden sich schon im Jahr 2018 22 % E-Fahrzeuge. Dieser Anteil wächst bis 2025 auf 62 % an, bis 2030 auf 86 % und bis 2035 auf 91 %. Nachdem wichtige Gruppen wie die Vorfeldbusse und -schlepper, in denen ein entsprechendes Fahrzeugangebot verfügbar war, schon bis heute umgestellt sind, wird der zahlenmäßige Schwerpunkt bis 2030 auf den Gruppen Pkw und LNF liegen. Erst ab 2025 wird von einer substanziellen Elektrifizierung der Lkw ausgegangen.

Die im Jahr 2035 verbleibenden ca. 60 dieselbetriebenen Geräte stellen fast ausschließlich die Winterdienstfahrzeuge dar, bei denen nicht von einer Elektrifizierung ausgegangen wird, sowie knapp die Hälfte der Feuerwehr-Lkw, bei denen ein Einsatz von E-Fahrzeugen erst in den 2030er-Jahren erwartet wird.

3.2. Senkung von Energiebedarfen und CO₂-Emissionen durch die Elektrifizierung

Trotz des Fuhrparkwachstums verringert sich bis 2035 durch den Ersatz von Diesel- durch Elektrofahrzeuge der jährliche Energiebedarf des Fuhrparks um 49 %, wie in Abbildung 3-2 ersichtlich.

Abbildung 3-2: Entwicklung des jährlichen Energiebedarfs nach Fahrzeuggruppen



Quelle Öko-Institut, eigene Darstellung

Hintergrund ist v. a. der geringere spezifische Energiebedarf pro zurückgelegte Strecke von batteriebetriebenen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen. Darüber hinaus sind E-Fahrzeuge im Start-Stopp-Betrieb sparsamer. Der Einspareffekt ist bei den bisher schon serienmäßig verfügbaren Fahrzeugkategorien herstellereitig bekannt bzw. kann bei den schon über längere Zeit erprobten Fahrzeugen (vgl. Abschnitt 2.3.6) aus Betriebsdaten abgeleitet werden. Für die weiteren Fahrzeugkategorien wurde die prozentuale Energieeinsparung durch das Projektteam abgeschätzt. Grundlage waren dabei Erkenntnisse aus Piloteinsätzen am Flughafen, Realdaten vergleichbarer Geräte und Charakteristika der jeweiligen Fahrzeuggruppen und v. a. der Einsatzprofile (z. B. Anteil von Standzeiten, Geschwindigkeiten). Der Einspareffekt variiert je nach Fahrzeugkategorie und Anwendung zwischen 60 und 80 %.

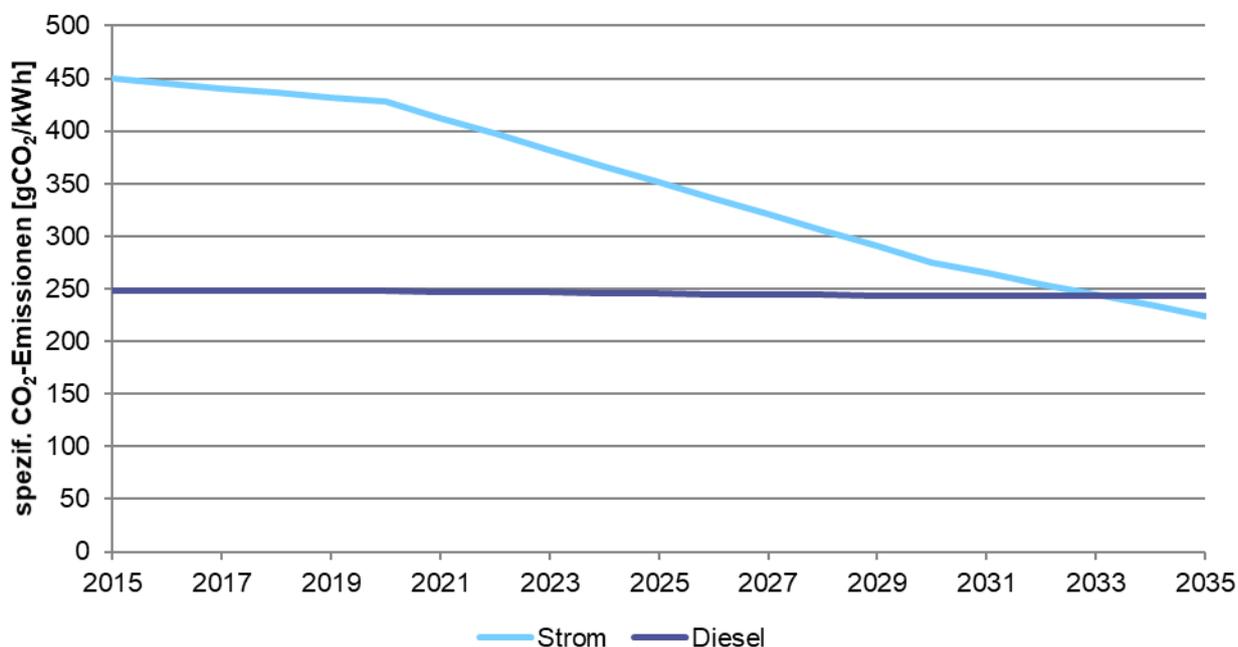
Der Rückgang des Energiebedarfs wurde bisher durch die schon erfolgte Umstellung der Vorfeldbusse und -schlepper getrieben und erhält Anfang der 2020er-Jahre insbesondere im Bereich GPUs / elektrifizierten Vorfeldpositionen sowie der Frachtschlepper einen Schub. Die Energiebedarfe pro Fahrzeug sind bei den Pkw und LNF deutlich geringer, sodass die Umstellung dieser Gruppen in den 2020er Jahren weniger deutlich wirkt. In den 2030er-Jahren steigert das Fuhrparkwachstum bei gleichzeitig in vielen Gruppen abgeschlossener Elektrifizierung die Energienachfrage wieder leicht.

Bei der Betrachtung des mit dem Energiebedarf der Fahrzeuge verbundenen Ausstoßes von Treibhausgasen während der Nutzungsphase wird eine Well-to-Wheel-Betrachtung zugrunde gelegt. Zur Abbildung der Vorkette dienen Emissionsfaktoren. Dabei wird rein CO₂ betrachtet, weil bei den betrachteten Energieträgern Diesel und Strom die weiteren Treibhausgase eine untergeordnete Rolle

spielen. Es wird zudem der deutschlandweite Strommix angesetzt und nicht der standortbezogene (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Die Entwicklung beim Strom basiert auf dem Ziel, die deutschen CO₂-Emissionen bis 2050 um 95 % gegenüber 1990 zu senken. Die auf Basis dieses Ziels fortzuführende Energiewende im Stromsektor führt dazu, dass bis 2035 die CO₂-Intensität elektrischer Energie etwa halbiert wird. Gleichzeitig bleibt die Klimawirkung des Diesels fast unverändert. Der Rückgang um ca. 2 % zwischen 2014 und 2035 rührt aus einer leicht erhöhten Beimischungsquote von Kraftstoffen auf Basis erneuerbarer Rohstoffe auf dem Gesamtmarkt her. Der am Flughafen Stuttgart teils praktizierte Einsatz von CARE- (auf Basis von biogenen Reststoffen) oder GtL-Diesel (auf Basis von Erdgas) wurde aufgrund der kontroversen Klimawirksamkeit und im Interesse der Übertragbarkeit auf andere Flughäfen nicht berücksichtigt.

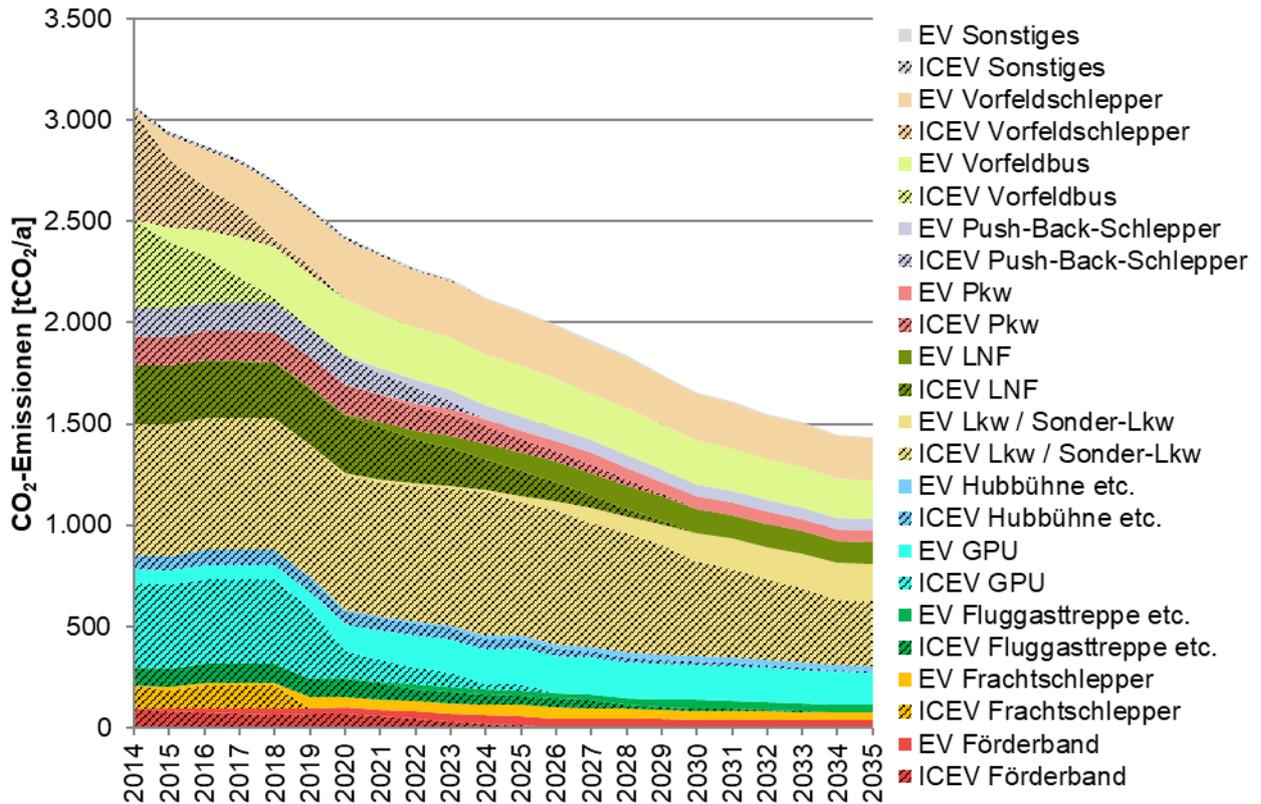
Abbildung 3-3: CO₂-Emissionsfaktoren für Strom und Diesel



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Die in Abbildung 3-3 gezeigte Entwicklung der Emissionsfaktoren zeigt, dass der CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde Strom nach 2030 unter den spezifischen Wert beim Diesel sinkt. Diese zusätzliche Verringerung des CO₂-Emissionsfaktors beim Strom führt dazu, dass die CO₂-Einsparung durch die Elektrifizierung des Fuhrparks zwischen 2014 und 2035 mit 53 % sogar noch höher ist als bei der Betrachtung des Energiebedarfs (s. Abbildung 3-4).

Abbildung 3-4: Entwicklung des jährlichen CO₂-Ausstoßes nach Fahrzeuggruppen



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

3.3. Kosten der Fahrzeuganschaffung

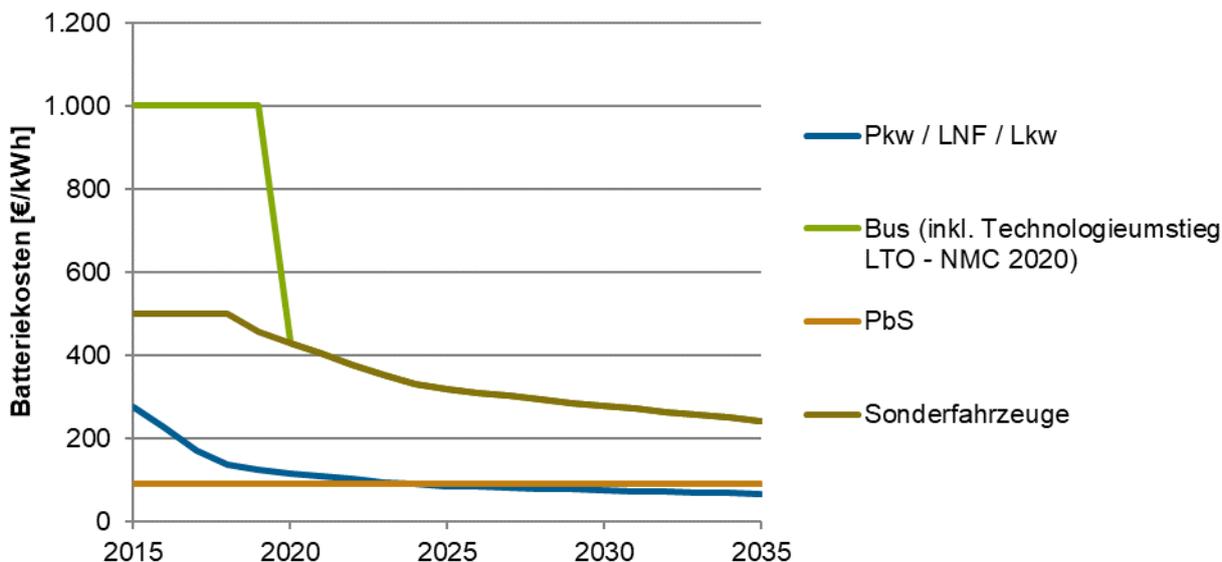
In der betriebswirtschaftlichen Betrachtung werden zunächst die Mehrkosten der Anschaffung batterieelektrischer anstelle dieselbetriebener Fahrzeuge dargestellt. Ziel der Kostenbetrachtung insgesamt ist nicht die Abbildung von Investitionsentscheidungen, sondern eine überblicksartige Darstellung der zeitlichen Verteilung von Mehrkosten. Daher werden keine Finanzierungskosten und kein Kalkulationszinsfuß berücksichtigt. Etwaige öffentliche Förderungen fließen nicht ein. Die Mehrkosten einer Neubeschaffung werden gleichmäßig über die Nutzungsjahre verteilt, um das Ergebnis nicht durch Einzelbeschaffungen zu verzerren und so die Übertragbarkeit zu sichern.

Ähnlich wie in Abschnitt 3.2 bei den Verbräuchen kann nicht für alle Fahrzeuggruppen auf reale Angebotspreise zurückgegriffen werden. Stattdessen erfolgte für die bisher auf dem Markt noch nicht ausreichend verfügbaren Geräte eine Abschätzung auf Basis vergleichbarer Fahrzeuggruppen. Bei den heute in elektrischer Variante angebotenen Fahrzeugkategorien werden heutige Marktpreise als Ausgangspunkt verwendet, ggf. mit vereinheitlichten Batteriekosten (s. u.).

Die Kostenentwicklung bis 2035 gliedert sich in eine Projektion der Batteriekosten auf Basis wissenschaftlicher Studien zur Batteriekostenentwicklung und eine Abschätzung der Basisfahrzeugkosten unter Berücksichtigung von Einschätzungen der Workshop Teilnehmerinnen und -teilnehmer. Abbildung 3-5 zeigt die für die Berechnungen angenommenen Verläufe der Batterie(system)kosten. Vereinfacht wurden dazu jeder Fahrzeugkategorie eine von vier Kostenkurven zugeordnet. Die Entwicklung der Kosten für Lithium-Ionen-Batterien bei Pkw und LNF basiert auf der in Thielmann et al. (2017) vorgenommenen Auswertung von Batteriezellkosten. Da die prognostizierten Werte jedoch

in den vergangenen Jahren in der Realität bereits unterboten wurden (Statista 2020), wurde eine weitere Korrektur vorgenommen. Es wurde angenommen, dass auch im Bereich batterieelektrischer Lkw mit ihrem potenziell relativ großen Marktvolumen zukünftig ähnliche Kosten pro Kilowattstunde abgerufen werden. Dagegen ist auf Basis der aktuellen Marktbeobachtung davon auszugehen, dass bei den am Flughafen eingesetzten Sonderfahrzeugen wegen der geringeren Skaleneffekte die Degression der Batteriekosten deutlich verzögert eintritt. Bei den am Flughafen eingesetzten Bussen wird zusätzlich ein technologischer Umstieg (Wechsel von Lithium-Titanat auf Lithium-NMC) berücksichtigt.

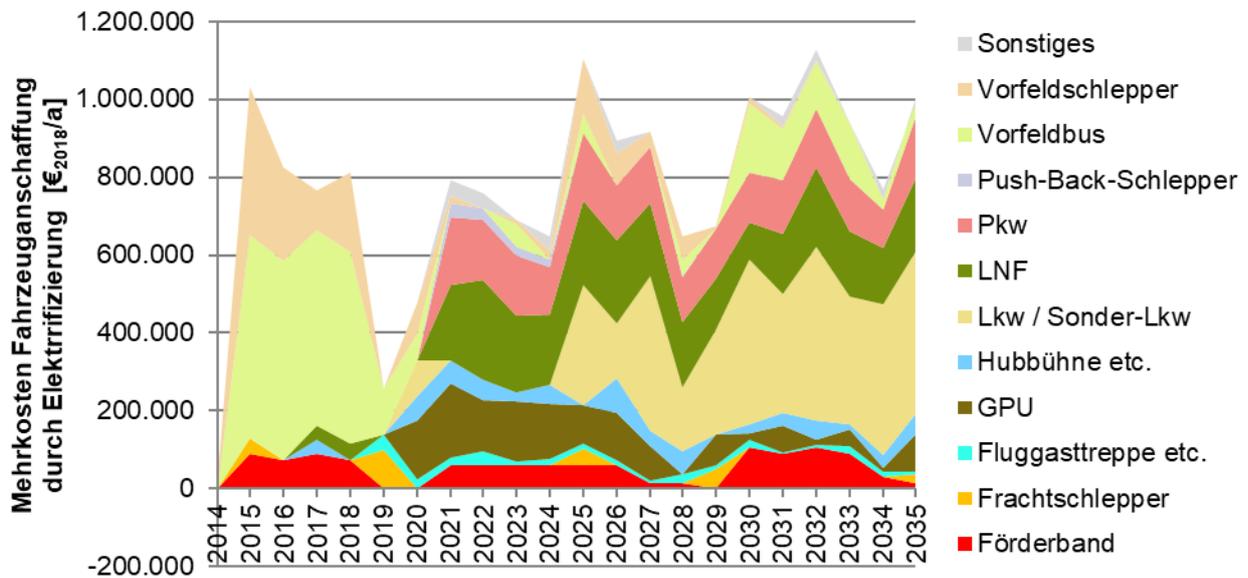
Abbildung 3-5: Angenommene Entwicklung der Batteriekosten



Quelle: Eigene Einschätzung auf Basis von Statista (2020), Thielmann et al. (2017) und Experteneinschätzungen im Rahmen von *scale up!*

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass aufgrund von Skaleneffekten in der Produktion von E-Fahrzeugen insgesamt auch das jeweilige Basisfahrzeug, also das batterieelektrische Fahrzeug abzgl. der Batteriekosten, eine Kostendegression erfährt. Diese liegt im Grundszenario bei 2 %/a. Gleichzeitig wird ein Anstieg bei den Dieselfahrzeugpreisen, v. a. wegen erhöhter Anforderungen an die Abgasreinigung, um 0,5 % erwartet. Auch bei Berücksichtigung dieser drei dem E-Fahrzeug zugutekommenden Kostenentwicklungen wird nur in 11 von 32 Fahrzeuggruppen bis 2035 eine Kostenparität zwischen Diesel- und E-Fahrzeug erreicht.

Abbildung 3-6: Jährliche Mehrkosten der Anschaffung von elektrischen gegenüber dieselbetriebenen Fahrzeugen



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Betrachtet man die Kosten für die Beschaffung von batterieelektrischen anstelle von dieselbetriebenen Fahrzeugen in Summe (Abbildung 3-6), zeigen sich zunächst über den gesamten Elektrifizierungsprozess Werte über Null: Das heißt, dass trotz der bei einigen Fahrzeuggruppen im Laufe der Zeit entstehenden *Kostenvorteile* in der Anschaffung dennoch in jedem Jahr die *Mehrkosten* für die E-Fahrzeugbeschaffung überwiegen. Sie liegen im Mittel bei etwa 750.000 bis 800.000 € jährlich. Ein Abwärtstrend ist nicht zu erkennen. Zwar wird bei allen Fahrzeuggruppen über die Jahre mit sinkenden Kosten gerechnet. Gleichzeitig werden aber beim Fortschreiten des Elektrifizierungsprozesses vermehrt die „schwierigen“, d. h. oft auch mit hohen Aufpreisen versehenen Kategorien umgestellt. Insgesamt ist der Verlauf, trotz der genannten Vereinfachung, dass Anschaffungskosten gleichmäßig über die Nutzungsjahre verteilt werden, durch starke Schwankungen geprägt. Ausschläge nach oben treten auf, wenn Kategorien in die Umstellung gehen, bei denen noch hohe fahrzeugspezifische Aufpreise auftreten. In der Anfangszeit der Elektrifizierung sind dies v. a. die Vorfeldbusse, in der Zukunft Sonderfahrzeuge wie etwa Lkw zur Flugzeugbetankung. Hier wird deutlich, dass in der Roadmap die jeweiligen Zeitpunkte des Elektrifizierungsbeginns nicht einfach dadurch festgelegt werden, dass in einer Fahrzeuggruppe Kostenparität erreicht ist, sondern diese einem durch Emissionsziele und praktische Realisierbarkeit im Fuhrpark bestimmten strategischen Fahrplan folgen.

3.4. Weitere Kosten

Perspektivisch sind spürbar geringere Wartungs- und Instandhaltungskosten der elektrisch betriebenen gegenüber Dieselfahrzeugen zu erwarten, da der elektrische Antriebsstrang grundsätzlich verschleißärmer ist. Die bisherigen Erfahrungen am Flughafen Stuttgart zeigen teilweise einen Vorteil von bis zu ca. 25 %. In manchen Anwendungen sind jedoch die jährlichen Aufwendungen für Wartung und Instandhaltung auf dem gleichen Niveau, z. B. weil in Wartungsverträgen Risikoaufschläge bei neuen Technologien angesetzt werden oder weil Reifen noch nicht auf das hohe Beschleunigungsvermögen des elektrischen Antriebs ausgelegt und somit stärker beansprucht sind.

Für die Roadmap wird eine Progression des Wartungskostenvorteils von heute 15 % bis zu 25 % im Jahr 2035 angesetzt.

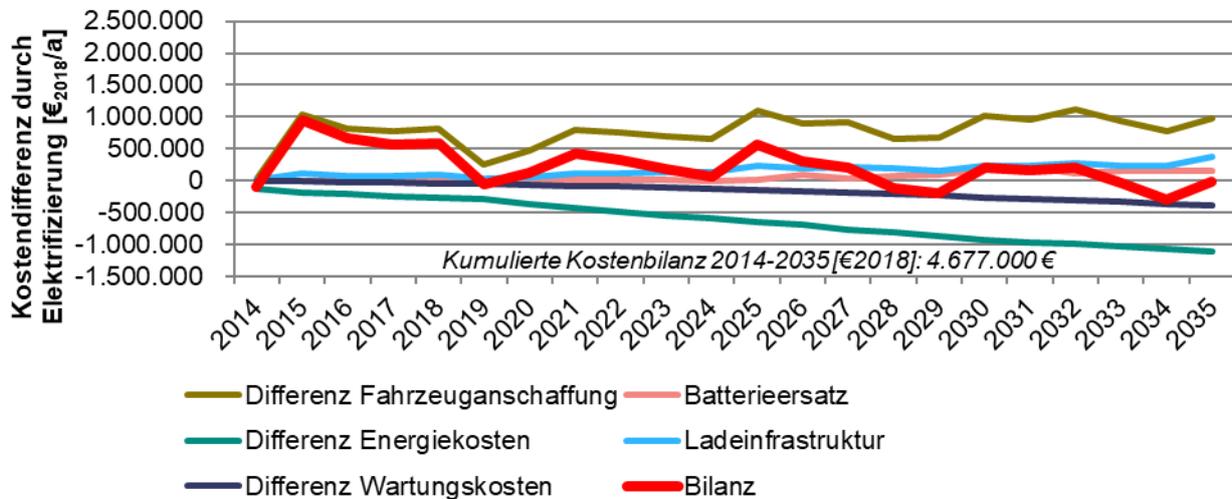
Die Ladeinfrastrukturkosten für zukünftig zu elektrifizierende Fahrzeuggruppen wurden ebenfalls aus den bisherigen Investitionskosten abgeleitet und pauschal pro kW Ladeleistung angesetzt. Es sind Beschaffung und Installation berücksichtigt. Bei Neubeschaffung von Fahrzeugen wird auch ein Ersatz der Ladeinfrastruktur angenommen.

Bei den Energiekosten wird die Elektromobilität am Flughafen künftig voraussichtlich von zwei Trends profitieren können: Einem moderaten Rückgang der Stromkosten aufgrund der deutlich gesunkenen Kosten der erneuerbaren Energietechnologien und einem geringen Anstieg der Dieselpreise, z. B. aufgrund des Langfristrends beim Ölpreis und erhöhter Beimischungsquoten für biogene Kraftstoffe. Jeweils leicht verstärkt werden diese Trends durch Maßnahmen aus dem beschlossenen Klimapaket der Bundesregierung: Der CO₂-Preis erhöht den Dieselpreis und die Senkung der EEG-Umlage senkt den Strompreis. Auch im Jahr 2035 ist eine kWh Strom fast doppelt so teuer wie eine kWh Diesel; dies wird jedoch durch die erheblich höhere Effizienz des elektrischen Antriebs mehr als überkompensiert. Der Verbrauchsvorteil der heute noch nicht elektrisch verfügbaren Fahrzeuggruppen wurde aus den von anderen Fahrzeugtypen vorhandenen Erfahrungen abgeleitet. Im Resultat dämpft die Umstellung auf den elektrischen Antrieb erheblich den Anstieg der Energiekosten, der ansonsten durch das Flugaufkommenswachstum eingetreten wäre.

3.5. Gesamtbetrachtung der Wirtschaftlichkeit

Abbildung 3-7 zeigt für alle relevanten Kostenkategorien jeweils die Differenz zwischen der fortschreitenden Elektrifizierung und dem Referenzfall eines weiterhin reinen Dieselfuhrparks. Zudem ist eine Bilanz dargestellt. Der über lange Zeit größte Posten sind die Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung. Hinzu kommen als neue Posten Ladeinfrastrukturaufbau und in einigen Fahrzeuggruppen Batterieersatz, deren jährliche Kosten jeweils bis in die 2030er Jahre hin ansteigen. Diesen Mehrkosten gegenüber stehen Einsparungen bei der Wartung und Instandhaltung sowie bei der Energie. Etwa ab Ende der 2020er Jahre kann die Einsparung an Energiekosten die Anschaffungsmehrkosten der E-Fahrzeuge meist kompensieren. Die Bilanz aller jährlichen Kostenparameter liegt etwa zu dieser Zeit um 0 €/ Jahr, wenn auch mit Schwankungen, v. a. aufgrund der in Abschnitt 3.3 beschriebenen „Kostenwellen“. Deutlich erkennbar ist trotzdem der klare Abwärtstrend in der jährlichen Kostenbilanz. Die Mehrkosten der Elektrifizierung summieren sich bis zum Jahr 2035 zu einem Betrag zwischen 4,5 und 5 Mio. € bzw. gut 210.000 € jährlich auf.

Abbildung 3-7: Gesamtbetrachtung der jährlichen Kosten der Elektrifizierung (jeweils Differenzbetrachtung gegenüber Dieselfahrzeugen)



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

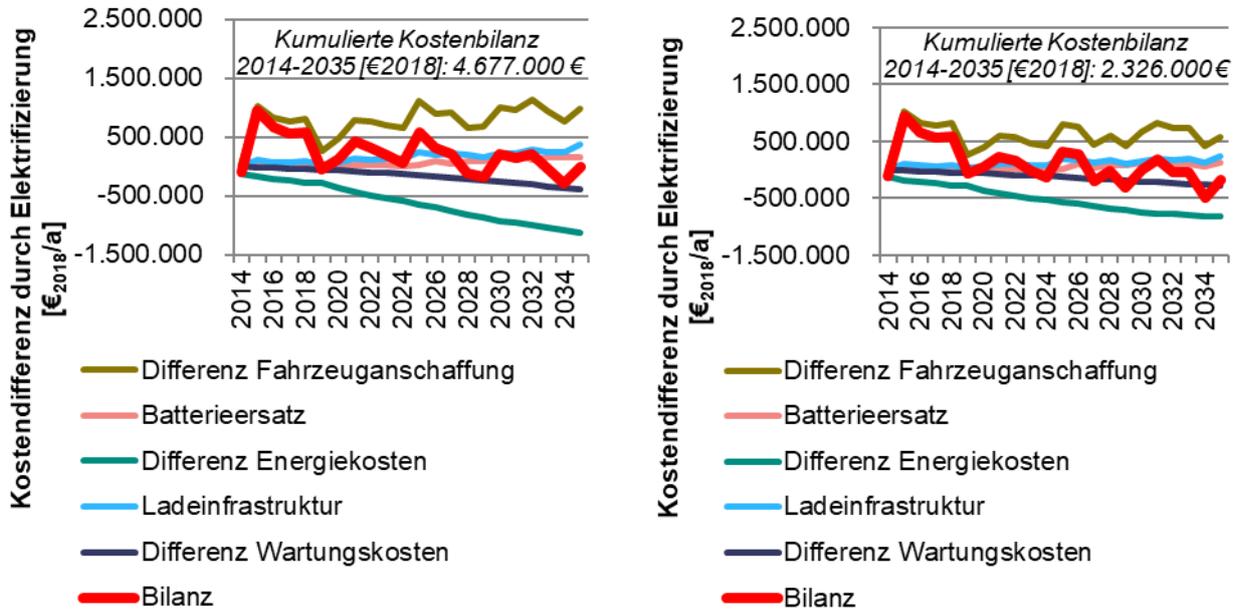
3.6. Einfluss veränderter Rahmenbedingungen auf die Roadmap

Die Kostenbilanz in einem mittleren Fall, der im Folgenden als „Basisszenario“ bezeichnet wird, wurde in Abschnitt 3.5 dargestellt. Wie in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 erläutert wurde, mussten dafür diverse Annahmen für zukünftige Entwicklungen getroffen werden. Eine Variation dieser Trends hat einen signifikanten Einfluss auf die Kosten- und teils auch auf die Emissionsbilanz.

Ein äußerst schwer prognostizierbarer Faktor ist die Entwicklung der Passagierzahlen und der mit der Zahl der Flugbewegungen einhergehende Bedarf an Fahrzeugen. Dies zeigt sich momentan in dem in keiner Weise vorhersehbaren Einbruch der Fluggastzahlen aufgrund der Corona-Pandemie. Aus dem Grund wird in Abbildung 3-8 dargestellt, welche Bedeutung es für die Kostenbilanz hat, wenn anstelle des jährlichen zweiprozentigen Anstiegs der Fahrzeugzahlen (linke Grafik) die Fuhrparkgröße stagniert (rechte Grafik). Die dargestellten Werte beinhalten, dass auch der als Referenz zugrundeliegende reine Dieselfuhrpark in seiner Größe stagniert. Trotz dieser Differenzbetrachtung führt ein Nullwachstum zu deutlichen Einsparungen: Die Mehrkosten für Zusatzbeschaffungen von E-Fahrzeugen und der dazugehörigen Ladeinfrastruktur fallen in diesem Szenario weg. Gleichzeitig ist in einem kleineren Fuhrpark der Bedarf, Fahrzeuge am Ende ihrer Lebensdauer zu ersetzen, geringer und dadurch die fallen weniger Differenzkosten durch die E-Mobilität an. Im Resultat liegen die jährlichen Mehrkosten durch die Elektrifizierung insgesamt auf niedrigerem Niveau, kumuliert ergeben sich etwa die halben Kosten.

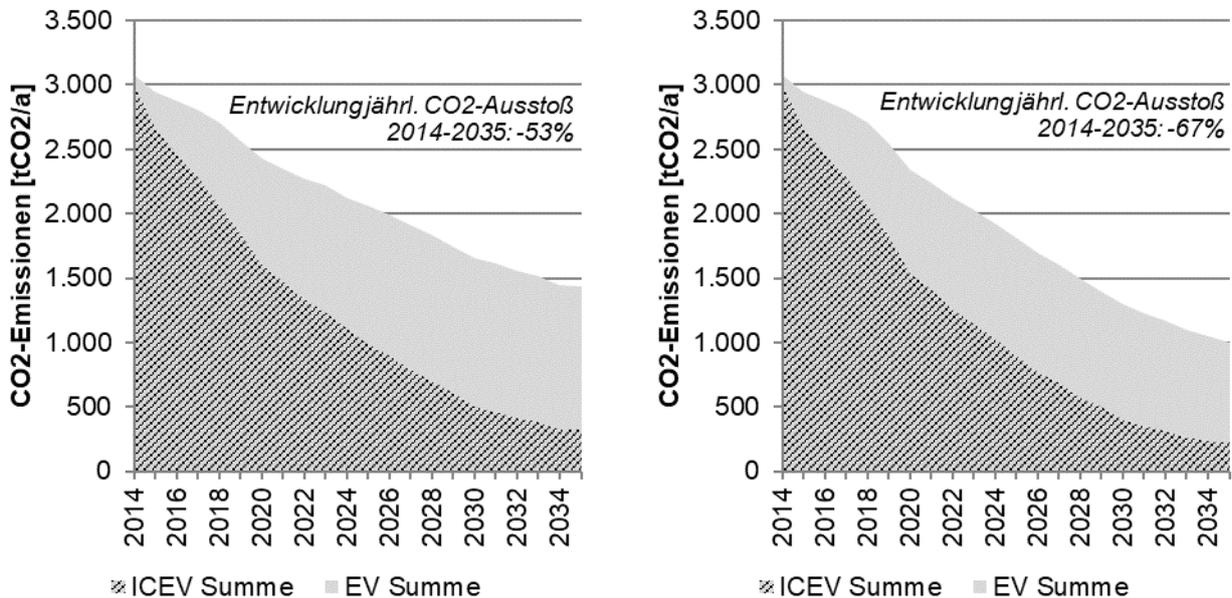
Deutlich ist auch der Effekt auf die Treibhausgasbilanz: Die Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb sinken in einem Nullwachstumsszenario zwischen 2014 und 2035 um zwei Drittel (s. Abbildung 3-9, rechte Grafik), während das Wachstum von Fuhrpark und Fahrzeugeinsatz den Einspareffekt auf gut 50 % dämpft (linke Grafik).

Abbildung 3-8: 1. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der Kostenbilanz im Basisszenario (links) vs. Szenario „Nullwachstum“ (rechts)



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Abbildung 3-9: 1. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der CO₂-Bilanz im Basisszenario (links) vs. Szenario „Nullwachstum“ (rechts)



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Es soll zudem gezeigt werden, welchen Einfluss veränderte Kostenentwicklungen auf die finanzielle Bilanz der Elektrifizierung haben können. Diese Trends können von außen politisch, technologisch und marktseitig gesteuert werden. Hier zeigt sich also, welche Bedeutung weitere externe

Rahmenbedingungen für die Flughafenbetreiber haben bzw. inwieweit der Erfolg der Elektrifizierung von außen gesteuert werden kann.

Tabelle 3-2 zeigt, wie in zwei alternativen Szenarien mögliche Kostenentwicklungen in eine für die Elektrifizierung vorteilhafte Richtung („pro“) kombiniert bzw. eventuelle unvorteilhafte Trends in einem Szenario „kontra“ zusammengestellt wurden.

Tabelle 3-2: Sensitivitätsrechnung 2: Verwendete Szenarien mit jeweils zugrunde gelegten Kostenentwicklungen

Kostenentwicklung	Basisszenario	Szenario "pro"	Szenario "kontra"
Kostenentw. Basisfahrzeug EV pro Jahr	-2 %	-3 %	0 %
Kostenentw. Basisfahrzeug EV 2018-2035	-29 %	-40 %	0 %
Kostenentw. Dieselfahrzeug pro Jahr	0,5 %	1 %	0 %
Kostenentw. Dieselfahrzeug 2018-2035	9 %	18 %	0 %
CO ₂ -Bepreisung Diesel	laut Klimapaket	Maßnahme Klimapaket x2	keine
Absenkung EEG-Umlage	laut Klimapaket	Maßnahme laut Klimapaket x2	keine
Wartungskosten	Wartungskostenvorteil: 2014 -15 %; jährlich Abnahme um 0,7 %	s. Basisszenario	gleiche Wartungskosten wie bei Dieselfahrzeugen über gesamte Betrachtungsdauer
Ladeinfrastrukturkosten	bei Wiederbeschaffung Fahrzeug Ersatz der LI zu gleichen Kosten	bei Wiederbeschaffung Fahrzeug fallen 20 % der LI-Kosten an	s. Basisszenario

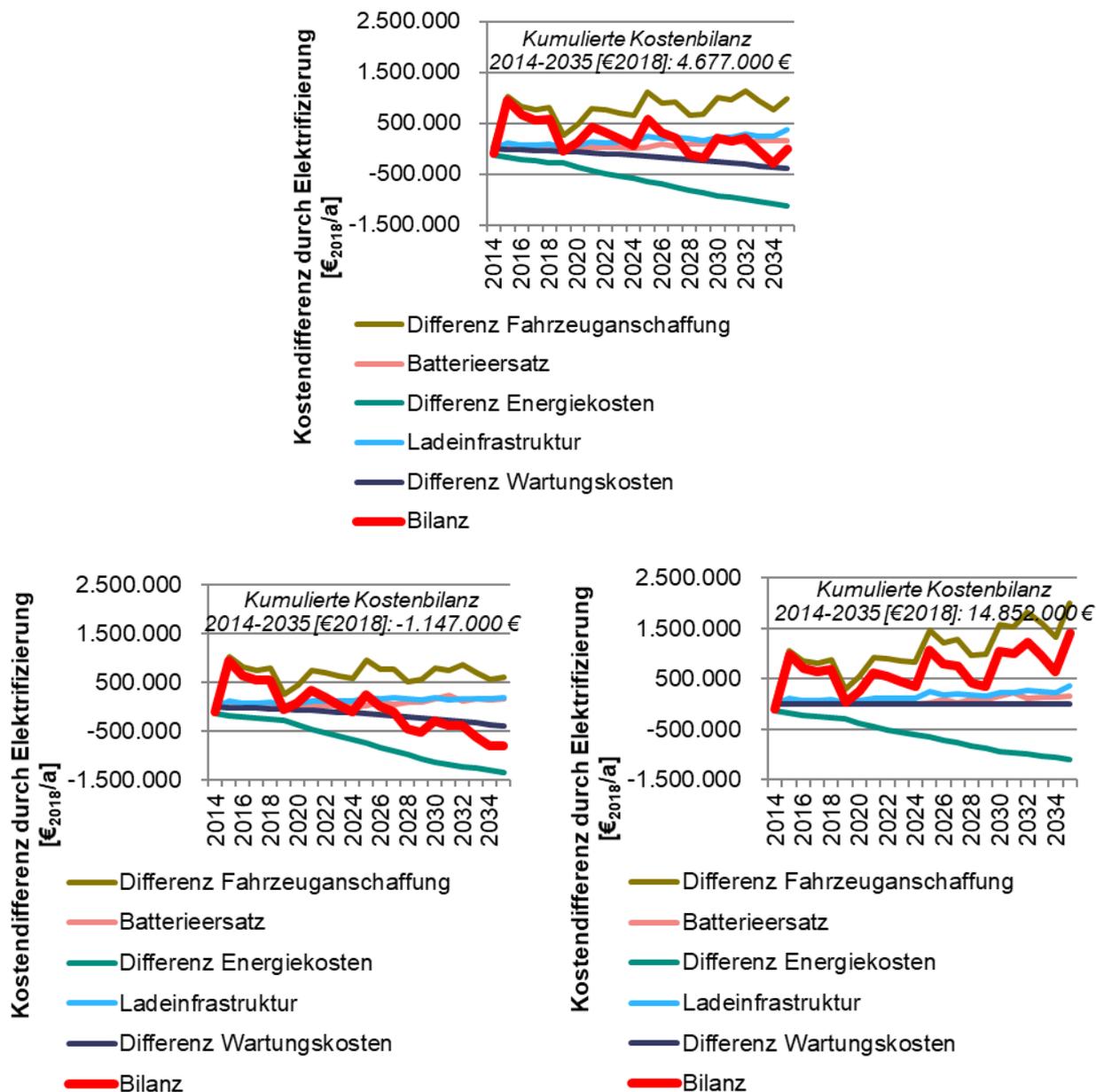
Quelle: Öko-Institut

Abbildung 3-10 zeigt beim Szenario „pro“ (Grafik unten links), wie durch verstärkte finanzielle Anreize zur Nutzung von Strom anstelle von fossilem Flüssigkraftstoff die Energiekostenbilanz der Elektrifizierung deutlich verbessert und gleichzeitig noch deutlichere Kostenentwicklungen zugunsten der Elektromobilität, beispielsweise aufgrund von Skaleneffekten bei der E-Fahrzeugproduktion und verschärften Umweltauflagen für Verbrenner, wirksam werden könnten. Zudem wird hier davon ausgegangen, dass die Ladeinfrastrukturkosten bei der Wiederbeschaffung deutlich geringer sind als bei der Erstinstallation. In diesem Szenario ist bereits ab Mitte der 2020er Jahre mit jährlichen Einsparungen durch die Elektrifizierung zu rechnen, sodass am Ende bis 2035 sogar eine positive Kostenbilanz des Gesamtprozesses steht.

Umgekehrt ist jedoch auch eine Kombination ungünstiger Kostenentwicklungen im Bereich des Möglichen: Im Szenario „kontra“ (Grafik unten rechts) wird angenommen, dass die bereits auf den Weg gebrachten Maßnahmen des Klimapakets der Bundesregierung nicht umgesetzt werden. Gleichzeitig stagnieren die Fahrzeugpreise, beispielsweise weil die Produktion nicht ausreichend mit der Nachfrage wächst und daher eine Knappheit entsteht. An diesem Szenario zeigt sich, dass die Frage, inwieweit Skaleneffekte zu geringeren Fahrzeugpreisen führen, entscheidend zumindest für die finanzielle Perspektive der Elektromobilität auf dem Flughafenvorfeld ist: Obwohl in dieser Betrachtung dieselbe Degression der Batteriekosten wie im Basisszenario angenommen wird, entstehen durch die höheren Basisfahrzeugpreise bis in die 2030er Jahre hinein deutliche Mehrkosten für die Anschaffung elektrischer Fahrzeuge. Diese steigen sogar noch an, weil die Fahrzeuggruppen

mit besonders hohen Aufpreisen elektrifiziert werden. Die Aufpreise bei der Beschaffung dominieren die Kostenbilanz und führen in Summe zu mehr als dreifachen Kosten des Gesamtprozesses gegenüber dem Basisszenario.

Abbildung 3-10: 2. Sensitivitätsrechnung: Vergleich der Kostenbilanz im Basisszenario (oben) vs. Kostenszenarien „pro“ und „kontra“ (unten links und rechts)



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

3.7. Fazit zur Roadmap

Die hier präsentierte Roadmap zeigt auf, wie der Fuhrpark am Flughafen Stuttgart bis 2035 mit der Ausnahme von Winterdienst und Teilen der Feuerwehrflotte vollständig elektrifiziert werden könnte. Es konnte gezeigt werden, dass dies weitgehend im Rahmen der üblichen Wiederbeschaffungszyklen umgesetzt werden kann, wenn die heutige Strategie der schrittweisen konsequenten Umstellung

der vielfältigen Fahrzeuggruppen mit ihren jeweiligen individuellen Herausforderungen weiterverfolgt wird. Klare Zielbilder, die von allen Beteiligten mitgetragen werden, sind dabei hilfreich. Monitoring und systematische Auswertung der Erfahrungen aus bereits elektrifizierten Fahrzeuggruppen helfen dabei, in weiteren Kategorien auf den elektrischen Antrieb zu wechseln und so auch unter den Nutzerinnen und Nutzern eine positive Einstellung zu erreichen.

Der dargestellte Fahrplan bedeutet jedoch, dass teils Dieselgeräte „vorgezogen“, sprich vor Ende der Lebensdauer, ausrangiert und durch elektrisch betriebene Pendants ersetzt werden. Insgesamt wird vorausgesetzt, dass CO₂-Ziele über die monetäre Perspektive gestellt werden. Deshalb werden auch diejenigen Sonderfahrzeuge elektrifiziert, bei denen zum Zeitpunkt der Umstellung aufgrund der hohen Mehrkosten in der Anschaffung das Dieselfahrzeug in der betriebswirtschaftlichen Betrachtung noch vorne liegt oder die heute noch gar nicht in vergleichbarer elektrischer Variante zur Verfügung stehen. Ein Umstellungszeitplan bis 2030 bzw. 2035 ist aus Klimaschutzsicht absolut geboten, erfordert aber sehr zeitnahes Handeln in allen Segmenten des Fuhrparks. Schließlich folgt die Elektrifizierung eines Fahrzeugtyps meist weitgehend den Beschaffungszyklen und zu Beginn sind stets Vorlaufzeiten für Fahrzeugmarktanalyse, Schaffung von Abstellmöglichkeiten, Aufbau von Ladeinfrastruktur, Erstellung von Betriebskonzepten, Ausfällen zu Beginn der Erprobung usw. einzuplanen.

Wenn diese Herausforderungen bewältigt werden können, kann dies den Energiebedarf bis zum Jahr 2035 aus dem Vorfeldbetrieb um 49 % gegenüber dem reinen Dieselfuhrpark im Jahr 2014 senken. Diese Einsparung ergibt sich trotz des angenommen jährlichen zweiprozentigen Wachstums des Flugbetriebs. Dadurch sinken die CO₂-Emissionen im gleichen Zeitraum sogar um 53 %. Das Wachstum im Aufkommen an Flugzeugabfertigungen konterkariert die Einsparbemühungen deutlich – tritt dieses nicht ein, können bis 2035 zwei Drittel des Treibhausgasausstoßes gegenüber 2014 eingespart werden.

In Zukunft werden die Mehrkosten der Anschaffung von elektrisch betriebenen anstelle von Dieselfahrzeugen dadurch kompensiert, dass Energie- und Wartungskosten eingespart werden. Somit kann ab Ende der 2020er Jahre mit einer etwa ausgeglichenen jährlichen Kostenbilanz gerechnet werden und die Kosten der Elektrifizierung des Fuhrparks insgesamt auf einen mittleren einstelligen Millionenbetrag begrenzt werden. Dies setzt jedoch voraus, dass der angenommene Rückgang der Fahrzeugpreise eintritt. Die Batteriekosten alleine erklären nicht die Höhe des Aufpreises der angebotenen E-Fahrzeuge gegenüber vergleichbaren Dieselfahrzeugen. In den kommenden Jahren müssen nicht nur die zurückgehenden Batteriekosten an die Käufer weitergegeben werden, sondern auch darüber hinaus die Fahrzeugpreise sinken. Ansonsten könnten die Gesamtkosten der Elektrifizierung, bei gleichzeitigem Auftreten weiterer ungünstiger Kostenentwicklungen, auch um ein Mehrfaches über dem Basisszenario liegen.

Politisch kann die zügige Elektrifizierung der Vorfeldfuhrparks jenseits von Förderprogrammen zur Fahrzeugbeschaffung auch durch Anreize im Bereich der Energiekosten unterstützt werden.

4. Themenschwerpunkt Umweltbewertung Ökologische Bewertung des Ladestroms

4.1. Ökobilanz verschiedener Fahrzeugkategorien

Erstmals wurde in diesem Projekt für die Fahrzeugkategorien Vorfeldschlepper, Vorfeldbus und Förderbandwagen ein ökobilanzieller Vergleich nach DIN EN ISO 14040/44 zwischen den fossil und den elektrisch angetriebenen Varianten durchgeführt, welche vorher noch nicht bilanziert wurden. Die Bilanzierung wurde für die Herstellungsphase weitgehend auf Basis von Primärdaten durchgeführt. Im Fall der Vorfeldschlepper wurden ein Dieselfahrzeug, ein Hybridfahrzeug sowie zwei Elektrofahrzeuge, eines mit Blei-Säure-Batterie und eines mit Lithium-Ionen-Batterie, verglichen. Bei den Vorfeldbussen wurde ein Dieselfahrzeug mit einem Elektrofahrzeug mit Lithium-Ionen-Batterie und bei den Förderbandwagen ein Dieselfahrzeug mit einem Elektrofahrzeug mit Blei-Säure-Batterie verglichen.

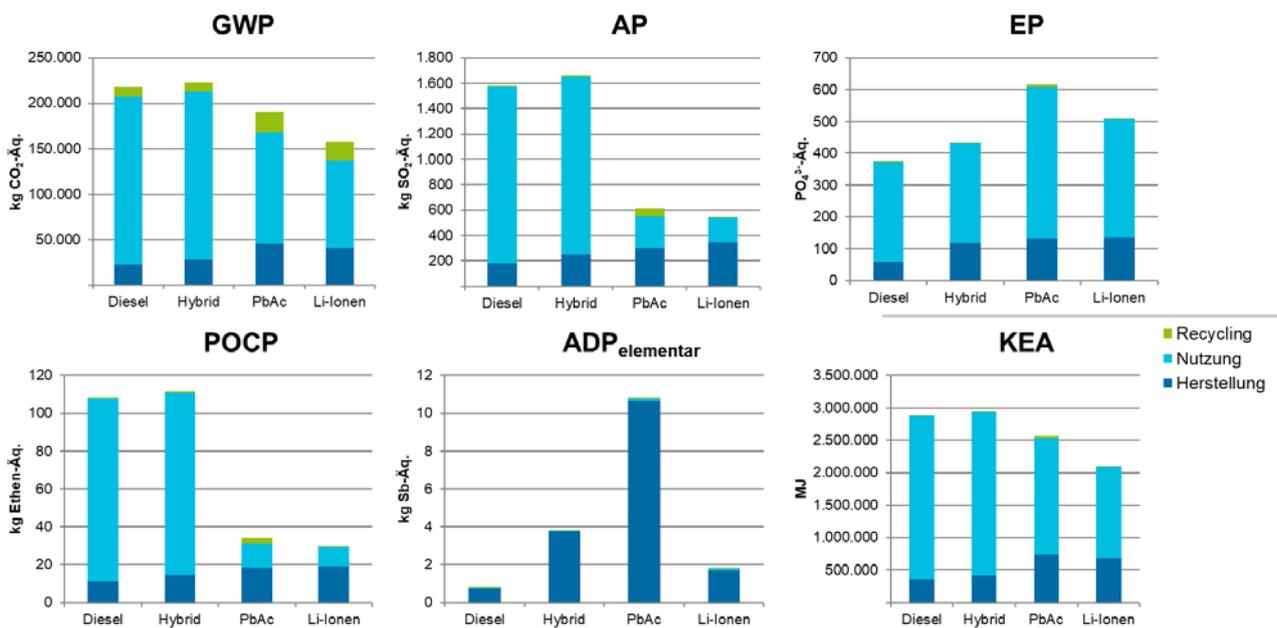
Der Untersuchungsrahmen für die Ökobilanz enthält die Herstellung, die Nutzung und das Recycling der Fahrzeuge über den gesamten Lebensweg, schließt aber die Tank- und Ladeinfrastruktur aus. Die Lebensdauer ist für alle Fahrzeugvarianten einer Kategorie gleich. Für Vorfeldschlepper wurden 10 Jahre, für Vorfeldbusse und Förderbandwagen 15 Jahre angenommen. Die Daten für den Verbrauch wurden am Flughafen über ein Jahr für jeden Fahrzeugtyp erhoben, um alle saisonalen Effekte (vermehrte Flugbewegungen, Witterungsänderungen) zu berücksichtigen. Die Daten zur Herstellung der Fahrzeuge wurden bei den Fahrzeugherstellern erhoben und mit Literaturdaten zur Batterieherstellung ergänzt. Als Berechnungswerkzeug wurde openLCA 1.7.4 mit der Datenbank ecoinvent 3.4 verwendet. Als Wirkungsabschätzungsmethode wurde CML mit den Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP), Photooxidantienbildungspotenzial (POCP), Verbrauch mineralischer Ressourcen ($ADP_{elem.}$) eingesetzt, sowie als separate Methode der kumulierte Energieaufwand (KEA).

Die Wirkungskategorien werden im Folgenden erläutert:

- **Treibhauspotenzial (GWP):** Das Treibhauspotenzial beschreibt den Beitrag anthropogener Emissionen an der Wärmeabsorption in der Atmosphäre und ist damit ein Indikator zur Messung des so genannten Treibhauseffekts. Luftemissionen, die zum Treibhauseffekt beitragen (z. B. CO_2 , Methan, Lachgas), werden bilanziert und entsprechend ihres spezifischen Treibhauspotenzials zum gesamten Treibhauspotenzial charakterisiert. Grundlage hierfür bildet IPCC (2013). Das spezifische Treibhauspotenzial beschreibt den Treibhauseffekt von chemischen Substanzen im Verhältnis zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) mit Hilfe von CO_2 -Äquivalenten.
- **Versauerungspotenzial (AP):** Das Versauerungspotenzial fasst Emissionen zusammen, die Säuren sind oder zur Versauerung in der Luft, im Wasser oder im Boden beitragen. Diese Substanzen werden entsprechend ihres spezifischen Versauerungspotenzials relativ zu SO_2 mit Hilfe von SO_2 -Äquivalenten zusammengefasst. Die Hauptverursacher des Versauerungspotenzials sind Schwefeldioxid (SO_2), Ammoniak und Stickstoffoxide. Die versauernde Wirkung von Ammoniak beruht darauf, dass es in Böden durch Mikroorganismen zu Nitrat oxidiert wird, wobei Protonen freigesetzt werden (verborgene Säure).
- **Eutrophierungspotenzial (EP):** Die Wirkungskategorie Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß in Gewässern (Überdüngung). Die Anreicherung von Nährstoffen kann eine Verschiebung der Artenzusammensetzung und eine erhöhte Biomasseproduktion in aquatischen Ökosystemen bewirken. Das Süßwasser-Eutrophierungspotenzial von Nährstoffemissionen in Luft, Gewässer und Boden wird mit Hilfe von kg P-Äquivalenten zu einer Maßzahl aggregiert.

- Photooxidantienbildungspotenzial (POCP): Bei der Photooxidantienbildung bildet sich bodennah Ozon durch die Wechselwirkung von UV-Strahlung und bestimmten Spurengasen wie Stickstoffoxide oder Kohlenwasserstoffe. Eine zu hohe Konzentration von Ozon (Sommersmog) in Bodennähe ist schädlich für Tier und Mensch. Die relevanten Emissionen werden in Ethenäquivalenten aggregiert.
- Verbrauch mineralischer Ressourcen (ADP_{elem.}): Mineralische Ressourcen sind nur in begrenztem Maß auf der Erde verfügbar und erneuern sich nicht. Der Abbau und die Nutzung der Ressourcen können zu einer Ressourcenknappheit führen, welche zu Versorgungsengpässen und allen damit verbundenen negativen Folgen wie z. B. Konflikten führen kann. Jedes Mineral hat hierbei basierend auf seiner Verfügbarkeit einen bestimmten Charakterisierungsfaktor, über den alle Verbräuche zu Antimonäquivalenten aggregiert werden.
- Kumulierter Energieaufwand (KEA): Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung benötigt werden. Darüber hinaus wird mit dem KEA auch der Energiegehalt bilanziert, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist alle energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. Zu seiner Berechnung wird der obere Heizwert (in MJ) der verschiedenen Energieträger angesetzt.

Abbildung 4-1: Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Vorfeldschlepper

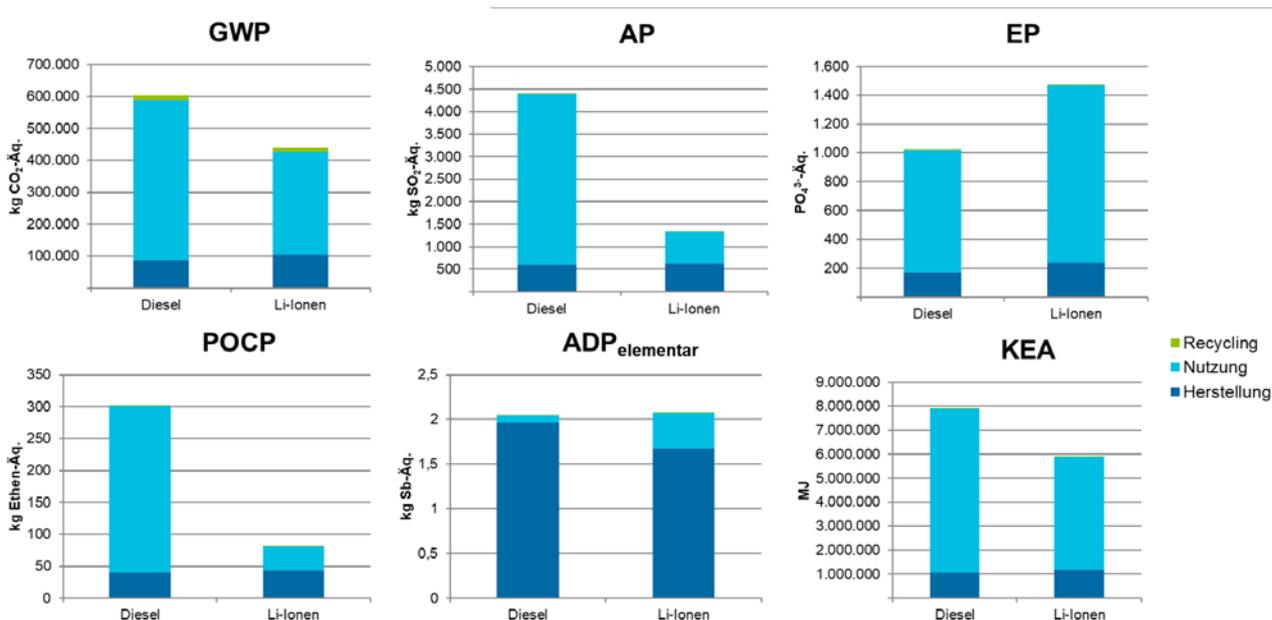


Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

In Abbildung 4-1 sind die Ergebnisse der Vorfeldschlepper dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Elektrovarianten (Blei-Säure- und Li-Ionen-Batterie) in den Kategorien AP und POCP um den Faktor 3 besser abschneiden. Auch in den Kategorien GWP und KEA sind die Elektrofahrzeuge besser, aber nur rund 15 (Blei-Säure) bzw. 30 % (Li-Ionen). In der Kategorie EP schneiden die fossilen Fahrzeuge rund 30 bis 40 % besser ab als die elektrisch betriebenen Varianten. In der Kategorie ADP_{elem.} zeigt sich ein diffuses Ergebnis. Die Blei-Säure-Variante hat mit Abstand die größten Wirkungen. Die Wirkungen sind fast drei Mal so groß wie die der Hybridvariante, die immer noch doppelt so hohe Wirkungen wie die Li-Ionen-Variante aufweist. Die Dieselve variante hat nur rund 40 %

der Wirkungen der Li-Ionen-Variante und ist damit in dieser Kategorie der Spitzenreiter. Die Ergebnisse für die Vorfeldschlepper zeigen zudem, dass die Nutzungsphase in den Kategorien GWP, EP und KEA über alle Antriebsarten hinweg mit 61 bis 88 % den größten Anteil der Gesamtwirkung ausmacht. Bei der Wirkungskategorie AP und POCP dominiert die Nutzungsphase nur die Ergebnisse der fossil betriebenen Varianten (84 bis 90 %), während bei den Elektrovarianten hier die Herstellungsphase die größte Wirkung verursacht (49 bis 65 %). Die Kategorie $ADP_{elem.}$ wird von der Herstellung bestimmt (93 bis 99 %). Die Recyclingphase spielt mit 0 bis 13 % über alle Kategorien eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass bestimmte Bauteile bzw. Rohstoffe in der Kategorie $ADP_{elem.}$ den Hauptbeitrag leisten. Dies sind elektronische Bauteile (Dieselschlepper), Batterie (Hybrid- und Blei-Säure-Schlepper) und synthetisches Gummi (Li-Ionen-Schlepper).

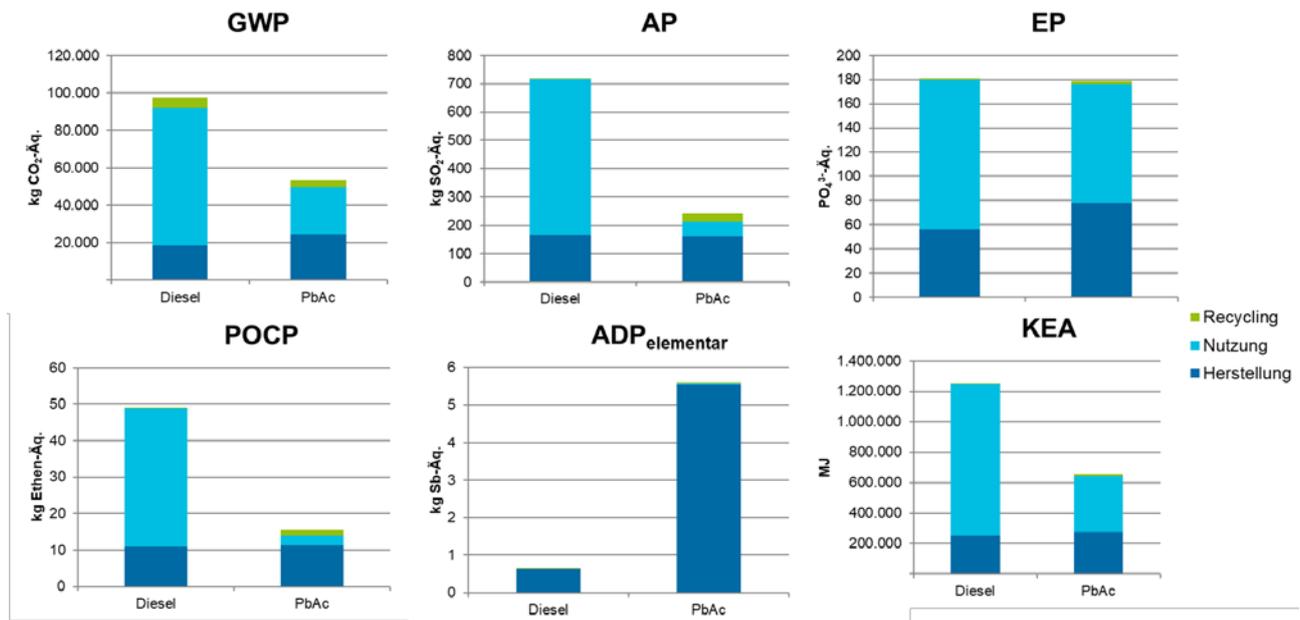
Abbildung 4-2: Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Vorfeldbusse



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

In Abbildung 4-2 sind die Ergebnisse der Berechnungen für die Vorfeldbusse dargestellt. Diese zeigen, dass der Elektrobus in den Kategorien AP und POCP nur ein Drittel so hohe Wirkungen verursacht wie die Dieselvariante. In den Kategorien GWP und KEA ist der Abstand nicht so deutlich, aber die Elektrovariante ist immer noch rund ein Viertel besser als der fossil angetriebene Bus. In der Kategorie $ADP_{elem.}$ sind beide Varianten vergleichbar was die Umweltwirkungen angeht, mit geringfügig besserem Ergebnis für die Dieselvariante. In der Kategorie EP schneidet der Dieseldbus mit rund 30 % geringeren Emission besser ab als die Elektrovariante. Die Ergebnisse für die beiden Vorfeldbusvarianten zeigen zudem, dass die Nutzungsphase in den Kategorien GWP, AP, EP und KEA mit 53 bis 87 % Beitrag zu den Gesamtwirkungen dominant ist. In der Kategorie POCP trägt die Nutzungsphase nur für die Dieselvariante mit 87 % den größten Anteil, während beim Elektrobus die Herstellungsphase mit 53 % knapp höhere Beiträge generiert als die Nutzungsphase. In der Kategorie $ADP_{elem.}$ kommen die größten Beiträge aus der Herstellungsphase (80 bzw. 96 % bei der Elektro- bzw. Dieselvariante). Die Recyclingphase spielt mit 0 bis 3 % Anteil keine Rolle. In der Kategorie $ADP_{elem.}$ haben bestimmte Bauteile/Rohstoffe die größten Umweltwirkungen. Dies sind im Dieseldbus die Aluminiumgusslegierung und im Elektrobus die elektronischen Bauteile.

Abbildung 4-3: Ergebnisse der betrachteten Wirkungskategorien für die Förderbandwagen



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

In Abbildung 4-3 sind die Ergebnisse aus der Ökobilanz der Förderbandwagen dargestellt. Diese zeigen, dass die Dieselve Variante in den Kategorien AP und POCP drei Mal mehr Umweltwirkungen verursacht als die Elektrovariante. In den Kategorien GWP und KEA ist die Elektrovariante rund 40 % besser als die Dieselve Variante. In der Kategorie EP sind beide Versionen vergleichbar mit geringem Vorteil für die Elektroversion. In der Kategorie ADP_{elem.} schneidet die Dieselve Variante deutlich besser ab, da die Elektroversion fast 9-mal mehr Wirkungen verursacht. Die Ergebnisse für die beiden Förderbandwagenvarianten zeigen zudem, dass die Nutzungsphase nur in den Kategorien EP und KEA für beide Antriebsarten dominiert (55 bis 80 %). In der Kategorie GWP hat die Nutzungsphase für die Elektrovariante einen Anteil von 47 % und damit nur 1 % mehr als die Herstellungsphase, während die Dieselve Variante auch hier auf 75 % Anteil der Nutzungsphase kommt. In den Kategorien AP und POCP sind deutliche Unterschiede zwischen beiden Varianten zu sehen. Während der fossil angetriebene Förderbandwagen in diesen Kategorien den größten Wirkungsbeitrag in der Nutzungsphase generiert (75 bis 78 %), kommt der größte Beitrag bei der Elektrovariante aus der Herstellungsphase (66 bis 73 %). Die Kategorie ADP_{elem.} wird mit 98 bzw. 99 % (Diesel- bzw. Elektrovariante) nur über die Herstellungsphase bestimmt. Die Recyclingphase hat in allen Kategorien mit 0 bis 13 % nur geringen Einfluss. In der Kategorie ADP_{elem.} bewirkt der Einsatz bestimmter Bauteile/Rohstoffe die größten Umweltlasten. Bei den Förderbandwagen sind dies die elektronischen Bauteile in der Dieselve Variante und die Batterie in der Elektrovariante.

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse zeigt, dass in fast allen untersuchten Wirkungskategorien die jeweilige Elektroversion (bei den Schleppern die Li-Ionen-Version) die beste Option darstellt. Für die Kategorien der Eutrophierung sind die Dieselve Varianten die beste Option, außer im Fall der Förderbandwagen, hier sind beide Optionen gleichwertig. Für die Kategorie Verbrauch mineralische Ressourcen ist die Dieselve Variante die beste Option, außer im Fall der Busse, auch hier sind beide Optionen gleichwertig.

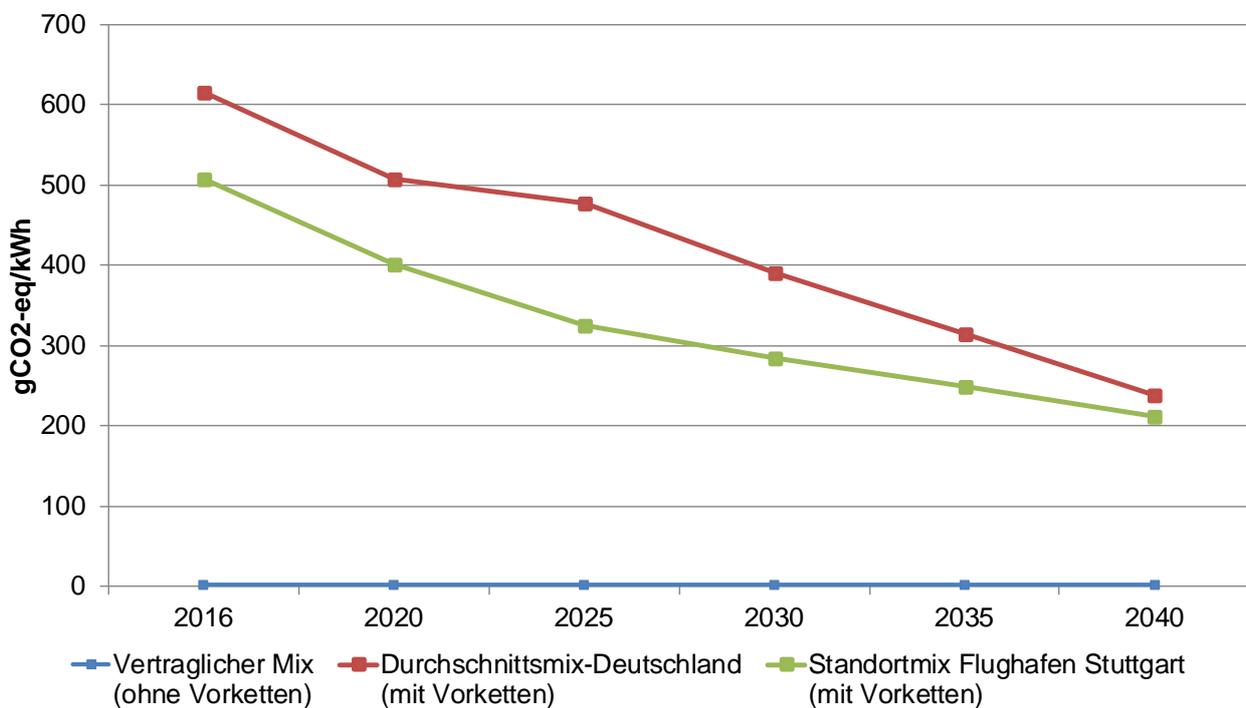
Dies lässt eindeutig die Bewertung zu, dass eine Elektrifizierung des Flughafenvorfeld in der Mehrzahl der betrachteten Kategorien vorteilhaft ist und in Zukunft noch besser wird, wenn der deutsche Strommix einen geringeren Anteil an Kohlestrom aufweist.

4.2. Ökologische Bewertung des Ladestroms

4.2.1. Bewertung der CO₂-Intensität des Ladestroms

Bei der Umweltbewertung von Elektrofahrzeugen hat der Erzeugungsmix des Ladestroms einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der CO₂-Emissionen in der Gesamtbilanz der Fahrzeuge. Für die Emissionsbilanzierung eines Stromverbrauchs existiert keine einheitliche Methodik, und verschiedene bestehenden Bilanzierungsansätze können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Im [ersten Working Paper](#) aus dem Projekt *scale up!* wird auf die verschiedenen Bilanzierungsansätze eingegangen. Abbildung 4-1 zeigt, welche Treibhauswirkung sich bei Anwendung der verschiedenen Methoden ergibt und wie sich diese über den Zeitverlauf ändert.

Abbildung 4-4: Treibhauswirkung des Ladestroms für verschiedene Bilanzierungsmethoden



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen im Projekt *scale up!*

Im Wesentlichen sind folgende Maßnahmen erforderlich, um eine dauerhaft positive Umweltwirkung zu gewährleisten:

- Aus Sicht des Gesamtsystems: Der Ausbau erneuerbarer Energien (EE) und die Stilllegung von Kohle- und Gaskraftwerken
- Aus Sicht des Flughafens: Der Ausbau erneuerbarer Eigenerzeugung und der Bezug von hochwertigem Ökostrom.

Die Bundesregierung hat ehrgeizige nationale Klimaschutzziele definiert und sich auf internationaler Ebene zu den Pariser Klimaschutzziele bekannt. Langfristig ist also davon auszugehen, dass der Anteil erneuerbarer Energien steigen und die CO₂-Intensität des aus dem Netz bezogenen Stroms sinken wird. Angesichts der aktuellen politischen Entwicklungen ist es allerdings unsicher, wie

schnell dieser Prozess voranschreiten wird. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird bis zum Jahr 2035 das Stromsystem in Deutschland vom Ziel der Klimaneutralität noch weit entfernt sein.

Die FSG plant, die Eigenerzeugung von erneuerbarem Strom deutlich auszuweiten. Insbesondere die Photovoltaik-Leistung soll bis 2035 auf ca. 17 MW erhöht werden. Trotzdem wird im Jahr 2035 noch etwa 75 % des am Standort verbrauchten Stroms aus dem übergeordneten Netz bezogen werden. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass durch den Ausbau der Elektromobilität die Stromnachfrage deutlich steigt.

4.2.2. Sinnvolle Strombezugsoptionen

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, eine Strombezugsoption zu wählen, die möglichst große Anreizwirkung für den Ausbau zusätzlicher erneuerbarer Energien entfaltet. Die Zusätzlichkeitswirkung von „klassischen“ Herkunftsnachweisen (HKN) ist sehr gering, da die für die Erzeuger resultierenden Erlöse zu niedrig sind, um Investitionen in neue Erzeugungsanlagen anzureizen. Der Bezug von klassischen HKN führt daher in der Regel nur zu zusätzlichen Profiten („windfall profits“) für Betreiber existierender Anlagen. Es existieren verschiedene Bezugsoptionen mit größerer Zusätzlichkeitswirkung, die im Folgenden erläutert werden.²

4.2.2.1. Bezug von Herkunftsnachweisen mit zusätzlichen Qualitätsanforderungen

Im Wesentlichen bestehen die zusätzlichen Anforderungen darin, dass Herkunftsnachweise nur ausgestellt werden für Strom aus Anlagen, die jung sind (z. B. nicht älter als sechs Jahre) und die nicht öffentlich gefördert werden. So wird gewährleistet, dass die zusätzlichen Einnahmen, die durch den Vertrieb der Herkunftsnachweise entstehen, nur solchen Anlagenbetreibern zugutekommen, welche aktuell in neue EE-Erzeugungsanlagen investiert haben, deren Wirtschaftlichkeit nicht durch eine feste Vergütung über das EEG gewährleistet ist und die somit den EE-Ausbau zusätzlich zum EEG vorantreiben. Zahlreiche Anbieter bieten Strombezugsverträge an, die diesen Gütekriterien entsprechen. Die Einhaltung dieser Kriterien wird z. B. durch das ok-power-Gütesiegel gekennzeichnet.³

4.2.2.2. Direkte langfristige Strombezugsverträge (PPAs) aus Post-EEG-Anlagen oder Neuanlagen

Mit einem Anlagenbetreiber oder einem zwischengeschalteten Dienstleister bzw. Vermarkter wird ein mehrjähriger Bezugsvertrag (Power Purchase Agreement, PPA) für den Strom einer bestimmten Anlage oder eines Anlagenportfolios geschlossen. Dabei kann es sich entweder um Neuanlagen handeln oder um Altanlagen, deren EEG-Förderung nach Ablauf der 20 Jahre andauernden Förderperiode endet. Ab dem Jahr 2020 werden in zunehmendem Maß Anlagen aus der EEG-Förderung ausscheiden, die durch eine Anschlussfinanzierung über PPAs am Markt gehalten werden können.

Der Abschluss direkter Strombezugsverträge für entsprechende Anlagen ist aus Nachhaltigkeitsaspekten die beste Strombezugsoption. In der Umsetzung ist sie für den Verbraucher allerdings mit dem größten Aufwand verbunden. Dies liegt vor allem daran, dass der Markt für PPA in Deutschland noch im Aufbau, die Anzahl der Anbieter sehr gering und eine zentrale Handelsplattform nicht vorhanden ist.

² Im Rahmen des Projekts wurde zu diesem Thema durch das Öko-Institut ein detaillierteres, bisher unveröffentlichtes Arbeitspapier erstellt, um den Akteuren am Flughafen Stuttgart eine Argumentation für ambitionierte Ökostrom-Bezugsoptionen jenseits klassischer Herkunftsnachweise zur Verfügung zu stellen (Seebach 2019).

³ www.ok-power.de

5. Energieseitige Umsetzung eines weitgehend elektrischen Fuhrparks bis 2035

Der aktuelle Stand der Elektrifizierung der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart wurde in Abschnitt 2 dargestellt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die zusätzliche Stromnachfrage durch elektrische Vorfeldfahrzeuge im Verhältnis zum Gesamtstrombedarf sehr klein. Die Elektrofahrzeuge verursachen aber bereits heute zusätzliche Lastspitzen. Insbesondere kann dies durch das Zwischenladen der schnellladefähigen Vorfeldbusse tagsüber geschehen. Es werden bereits Flexibilitätspotenziale im Bereich anderer Stromverbraucher genutzt, um durch Lastverschiebung diese Spitzen zu glätten. Ein Lademanagement bei den E-Fahrzeugen ist zurzeit noch nicht etabliert.

In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie die weitgehende Elektrifizierung des Fuhrparks bis zum Jahr 2035 energieseitig umgesetzt werden kann. Folgende Leitfragen werden untersucht:

- Wie entwickelt sich der Ladestrombedarf?
- Wann werden die Fahrzeuge geladen?
- Entstehen neue Lastspitzen?
- Wie wird der zusätzliche Strombedarf gedeckt?

5.1. Methodik

5.1.1. Simulation des Ladeverhaltens der einzelnen Fahrzeuge

Betrachtet wird das Jahr 2035. Zu diesem Zeitpunkt ist die Elektrifizierung der Vorfeldflotte weitestgehend abgeschlossen. Die Annahmen zur Elektrifizierung der verschiedenen Fahrzeugtypen und zum Energiebedarf der Fahrzeuge sind in Abschnitt 3 dokumentiert. Zusätzlich wurden auf Grundlage der Verbrauchsdaten für die im Zeitraum von 2016 bis 2019 am Flughafen betriebenen E-Fahrzeuge saisonale Verbrauchsprofile erstellt. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2035 nahezu ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz kommen. Diese zeichnen sich – im Gegensatz zu den aktuell häufig verwendeten Blei-Säure-Batterien – durch höhere Ladeleistungen aus. Bei vielen Fahrzeugtypen reicht die Speicherkapazität der Batterie nicht aus, um den Betrieb über einen ganzen Tag hinweg zu gewährleisten, sodass ein Zwischenladen im Tagesverlauf notwendig ist. Für alle Fahrzeuge wurden daher Annahmen zur Verteilung der Betriebs- und Pausenzeiten gemacht. Diese orientieren sich an der gemessenen Verteilung der Pausenzeiten für verschiedene Fahrzeugtypen des Fuhrparks der FSG über einen Zeitraum von 18 Monaten hinweg. Je nach Fahrzeugtyp wird von zwei bis vier Pausen pro Tag ausgegangen. Es kommt kein Lademanagement zum Einsatz. Fahrzeuge laden, wenn sie nicht in Betrieb sind, mit maximaler Ladeleistung, bis die Batterie vollständig gefüllt ist. Ausgehend von dieser Datengrundlage werden die Ladeprofile für die gesamte Fahrzeugflotte für jeden Tag des Jahres in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten berechnet.

5.1.2. Simulation des gesamten Energiesystems des Flughafens

Für das Jahr 2035 wurde im Rahmen der Studie „Masterplan Energieeinsparung 2050“ unter Verwendung der Software *TopEnergy* eine Simulation des gesamten Energiesystems am Flughafen Stuttgart durchgeführt (Siehler et al. 2020). Ziel der Simulation ist eine CO₂-minimale Deckung des Strombedarfs aller Verbraucher durch Nutzung von eigenerzeugtem Strom (Solaranlagen und gasbetriebene Blockheizkraftwerke) sowie Strombezug aus dem übergeordneten Netz. Die Annahmen zur Entwicklung des Strombedarfs und der Eigenerzeugung folgen dem „Masterplan Energieeinsparung 2050“ des Flughafens Stuttgart. Neben dem Ladestrombedarf der Vorfeldflotte wurde auch der öffentliche Ladestrombedarf berücksichtigt, also der Bedarf, der durch privat genutzte

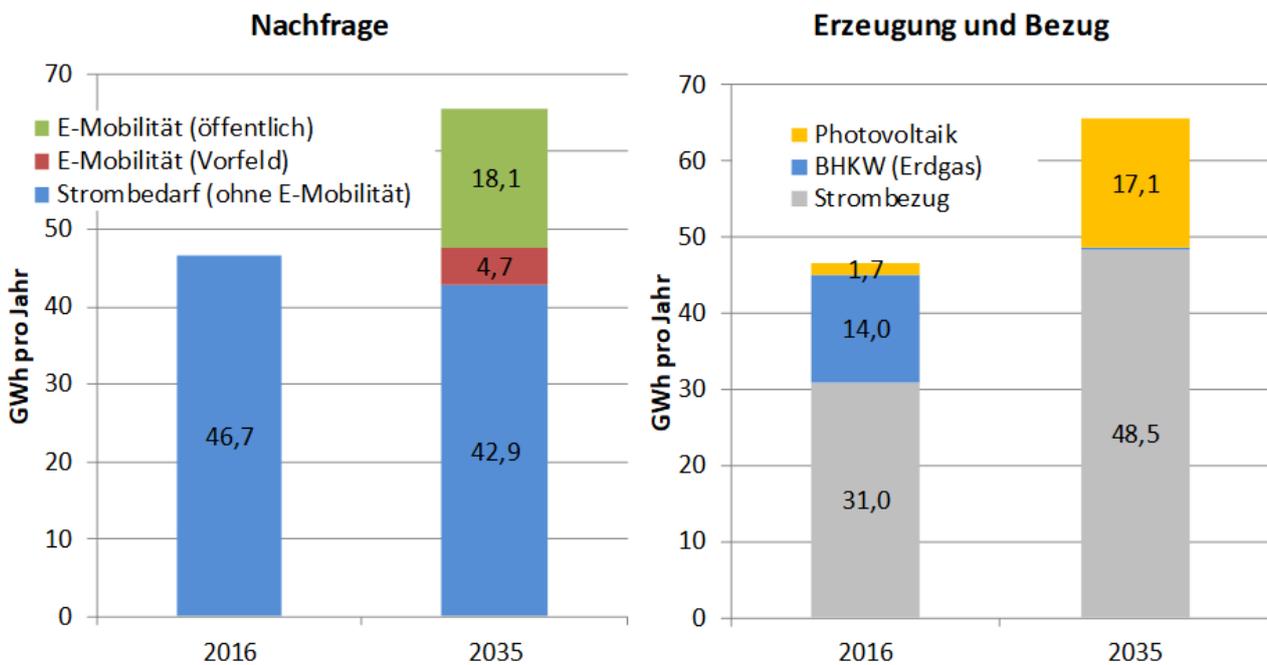
Elektrofahrzeuge verursacht wird, die nicht Teil der Fahrzeugflotte der FSG sind. Die Annahmen zum öffentlichen Ladestrombedarf orientieren sich an der prognostizierten Verkehrsentwicklung (Intraplan Studie 2016) und dem prognostizierten Hochlauf für E-Mobilität (Siehler et al. 2020 auf Grundlage von Agora Verkehrswende et al. 2019).

5.2. Ergebnisse

5.2.1. Übersicht: Deckung der Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen und anderen Verbrauchern am Flughafen Stuttgart

Abbildung 5-1 zeigt den Strombedarf von Elektrofahrzeugen und anderen Verbrauchern sowie die Deckung dieses Strombedarfs durch Eigenerzeugung und Bezug aus dem übergeordneten Netz. Gezeigt sind sowohl die Situation im Jahr 2016 (vor Beginn des Elektrifizierungsprozesses) als auch der Zustand im Jahr 2035, bei nahezu vollständiger Elektrifizierung der Vorfeldflotte.

Abbildung 5-1: Deckung der Stromnachfrage in den Jahren 2016 und 2035



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen im Projekt *scale up!*

Im Jahr 2016 lag der jährliche Strombedarf aller Verbraucher am Flughafen Stuttgart bei ca. 47 GWh. Zur Deckung des Strombedarfs wurden ca. zwei Drittel des benötigten Stroms durch einen Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt (Anschluss auf 12-kV-Ebene). Der verbleibende Strombedarf wurde durch Eigenerzeugung gedeckt. Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) auf Erdgas-Basis mit knapp 2 MW Leistung erzeugte ca. 14 GWh pro Jahr. Das Kraftwerk erzeugt Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung) und wird wärmegeführt betrieben. Neben dem BHKW erzeugten drei PV-Anlagen auf dem Flughafengelände mit einer Gesamtleistung von 2,1 MW_{peak} ca. 1,7 GWh pro Jahr.

Auf Grund von Effizienzsteigerungen wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2035 trotz des prognostizierten Anstiegs der Fluggastzahlen der Strombedarf ohne Elektromobilität im Vergleich zu 2016 um 10 % sinkt. Diese Entwicklung wird jedoch deutlich überkompensiert durch den steigenden

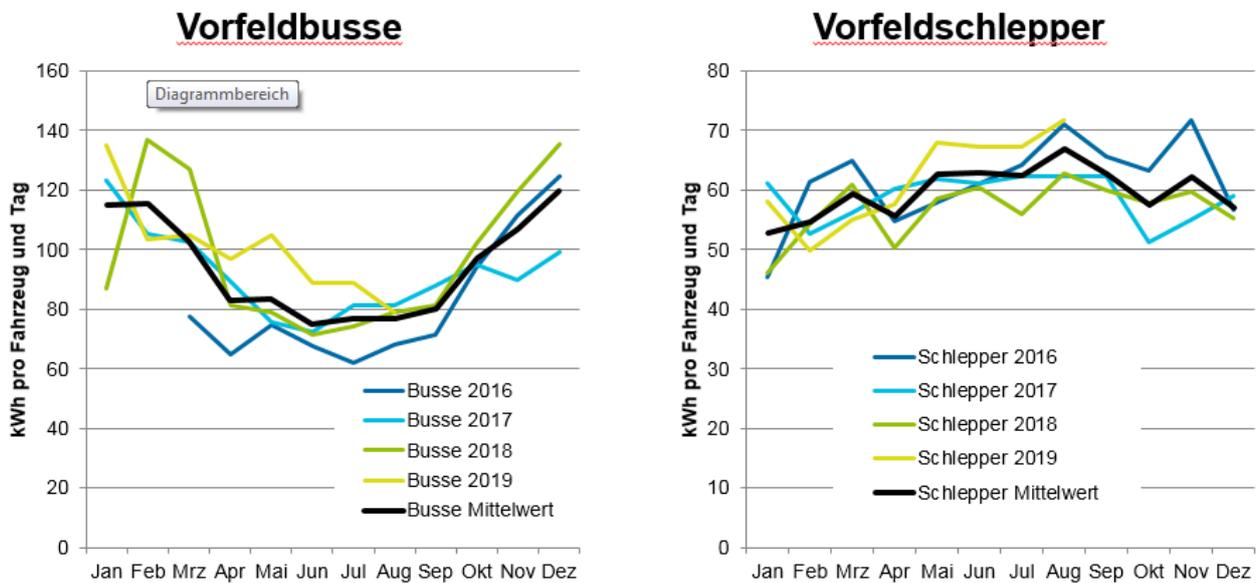
Ladestrombedarf der Elektrofahrzeuge. Auf diese fallen im Jahr 2035 mit 23 GWh pro Jahr ca. 30 % des gesamten Strombedarfs. Der weitaus größte Anteil entfällt hierbei mit ca. 18 GWh pro Jahr auf die öffentlichen Elektrofahrzeuge.

Der Flughafen plant bis zum Jahr 2035 einen deutlichen Ausbau der solaren Erzeugungskapazitäten. Die von Solaranlagen erzeugten Strommengen verzehnfachen sich bis zum Jahr 2035 auf ca. 17 GWh pro Jahr. Gleichzeitig ist geplant, den Einsatz des Blockheizkraftwerks zu reduzieren, so dass dieses nur noch zur Spitzenlastdeckung eingesetzt wird. Insgesamt führt dies im Jahr 2035 (gegenüber 2016) zu einem leichten Rückgang der Eigenerzeugung und zu einer Zunahme des Netzbezugs auf ca. 49 GWh pro Jahr.

5.2.2. Saisonale Schwankungen des Ladestrombedarfs

Abbildung 5-2 zeigt die in den Jahren 2016 bis 2019 gemessenen saisonalen Verbrauchsprofile für Vorfeldschlepper und Vorfeldbusse. Der Verbrauch der Vorfeldschlepper ist im Jahresgang mehr oder weniger konstant – lediglich in der Hauptreisesaison im Sommer ist ein leichter Anstieg des Verbrauchs gegenüber dem Jahresmittel zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu ist bei den Vorfeldbussen ein deutlicher Anstieg des Verbrauchs in den Wintermonaten zu erkennen. Die Ursache hierfür ist der Strombedarf der Heizungen, durch den in Monaten mit niedrigen Außentemperaturen der Strombedarf der Fahrzeuge um bis zu 50 % ansteigen kann.

Abbildung 5-2: Saisonale Verbrauchsprofile



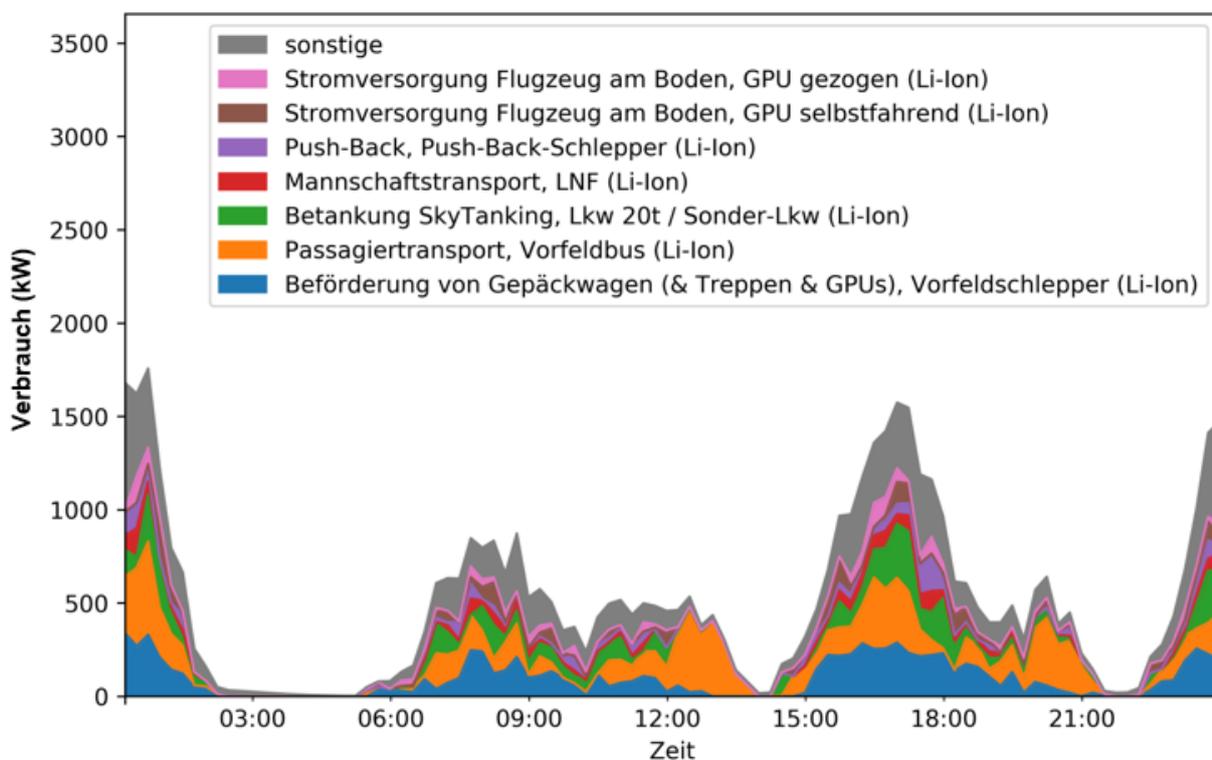
Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen im Projekt *scale up!*

5.2.3. Deckung des Ladestrombedarfs im Jahr 2035 im Tagesgang

Abbildung 5-3 zeigt als Ergebnis der Simulation ein charakteristisches Ladeprofil für die gesamte Vorfeldflotte im Jahr 2035 über einen Zeitraum von 24 Stunden hinweg. Die maximale Ladeleistung beträgt ca. 1,8 MW und liegt damit deutlich unter der Summe der maximalen Ladeleistungen aller Fahrzeuge (ca. 18,1 MW). Das Flottenladeprofil wird wesentlich vom Ladeverhalten der Gepäck- und Vorfeldschlepper, der Vorfeldbusse sowie der Skytanking-Lkw geprägt. Dies sind die Fahrzeugkategorien mit den größten Fahrzeugzahlen. Die Kernbetriebszeiten sind zwischen 5 Uhr morgens

und 24 Uhr. Da am Flughafen Stuttgart ein Nachtflugverbot herrscht, ist eine auffällige Lastspitze nach dem Ende des Flugbetriebs, gegen 24 Uhr, zu erkennen. Die übrigen Lastspitzen im Tagesverlauf entstehen durch opportunistisches Zwischenladen der einzelnen Fahrzeuge zu den jeweiligen Pausenzeiten. Bei der Simulation wird kein Steuerungsalgorithmus eingesetzt, um die Ladevorgänge systemdienlich zu verteilen, d. h. jedes Fahrzeug lädt bei Netzanschluss mit maximaler Ladeleistung, bis die Batterie vollständig aufgeladen ist. Da die durchschnittliche tägliche Ladedauer bei maximaler Ladeleistung für die meisten Fahrzeuge weniger als zwei Stunden beträgt und für den größten Teil der Fahrzeuge weniger als 50 % der Batteriekapazität benötigt wird, um den täglichen Ladestrombedarf zu decken, besteht zumindest aus technischer Sicht ein erhebliches Potenzial zur Flexibilisierung des Ladeverhaltens.

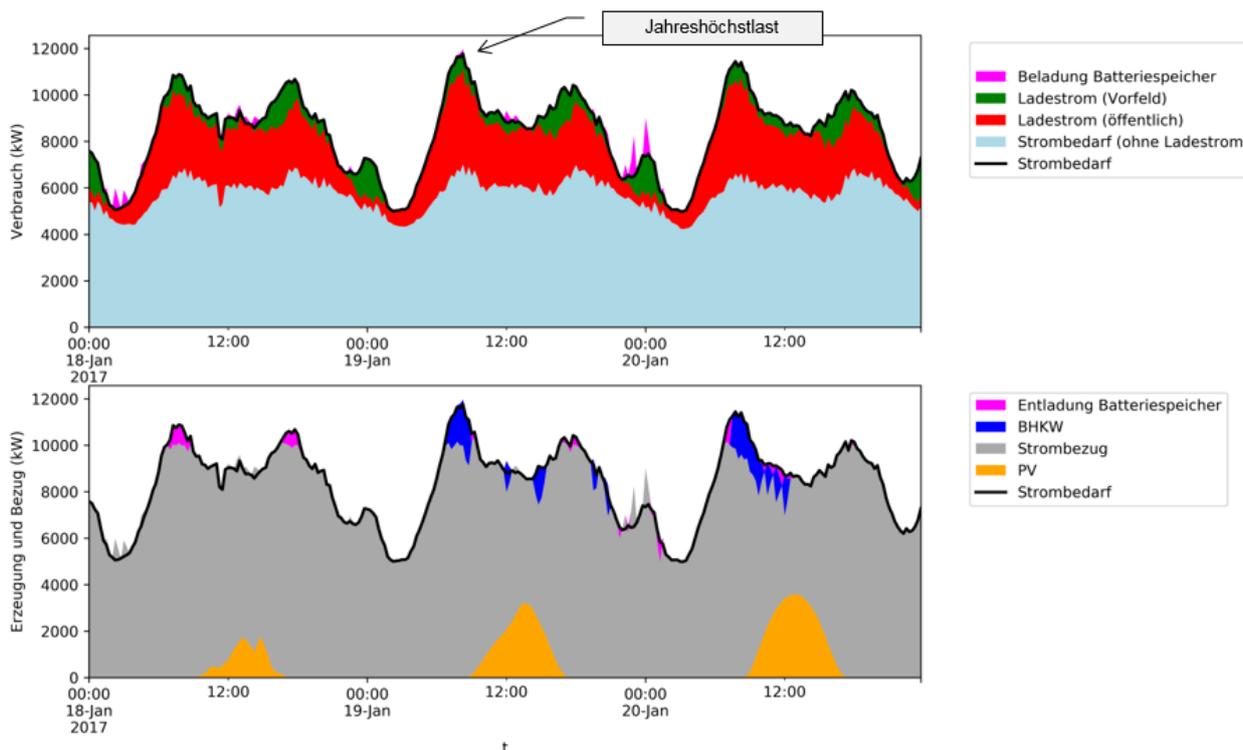
Abbildung 5-3: Charakteristischer Tagesgang des Ladestrombedarfs der Vorfeldflotte im Jahr 2035



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen im Projekt *scale up!*

Abbildung 5-4 zeigt exemplarisch für einen Zeitraum von drei Tagen im Jahr 2035 die Profile für Stromverbrauch, Eigenerzeugung und Bezug aus dem übergeordneten Netz. In dem hier gezeigten Zeitraum (18. bis 20. Januar) tritt die maximale im Verlauf des Jahres beobachtete Last auf (ca. 12 MW). Diese Lastspitze ist zu nahezu 50 % auf den Ladestrombedarf elektrisch betriebener Fahrzeuge zurückzuführen. Der Ladestrombedarf der Vorfeldflotte verstärkt hierbei insbesondere die Lastspitzen am Vormittag und am Nachmittag. Der Stromverbrauch durch öffentliche Elektrofahrzeuge ist, wie bereits im Vergleich der jährlichen Bedarfe gezeigt (siehe Abbildung 5-1), deutlich größer als der Verbrauch der Vorfeldflotte. Das Ladeprofil der öffentlich genutzten Elektrofahrzeuge zeigt ausgeprägte Lastspitzen vormittags und nachmittags. Außerhalb der Kernzeit (5-20 Uhr) sinkt die Stromnachfrage im öffentlichen Bereich nahezu auf null.

Abbildung 5-4: Profile für Stromverbrauch, Eigenerzeugung und Bezug im Jahr 2035



Quelle: Öko-Institut und FSG, eigene Berechnungen im Projekt *scale up!*

Die Stromnachfrage wird in dem gezeigten Zeitraum zum weitaus größten Teil durch Bezug aus dem übergeordneten Netz gedeckt. Saisonal bedingt ist der Beitrag der Photovoltaik-Eigenerzeugung gering. Die Lastspitzen vormittags und nachmittags werden durch den Einsatz von stationären Batteriespeichern und durch das Erdgas-Blockheizkraftwerk (BHKW) geglättet.

5.3. Fazit

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass im Jahr 2035 etwa ein Drittel des gesamten Strombedarfs am Standort des Flughafens Stuttgart durch Elektromobilität verursacht wird. Der weitaus größte Teil hiervon entfällt dabei auf öffentliche Elektromobilität. Die Vorfeldflotte spielt eine eher untergeordnete Rolle.

Sofern keine Steuerung der Ladevorgänge erfolgt, werden durch den Ladestrombedarf die bereits vorhandenen Lastspitzen der klassischen Stromverbraucher am Vormittag und am Nachmittag verstärkt. Im Bereich der Vorfeldflotte könnte dieser Effekt durch eine Verschiebung von Ladevorgängen in die Nacht reduziert werden – allerdings ist für zahlreiche Fahrzeuge auf Grund begrenzter Batteriekapazitäten ein Zwischenladen im Tagesverlauf nicht zu vermeiden.

Bei öffentlich genutzten Fahrzeugen dürfte eine Verschiebung von Ladevorgängen in die Nacht nur in Ausnahmefällen möglich sein, da die Fahrzeuge in der Regel nur tagsüber am Flughafen geparkt sind. Hier ist zu prüfen, inwiefern durch Lademanagement eine Verschiebung innerhalb der Kernzeit möglich ist, um die Verbrauchsspitzen am Vormittag und Nachmittag zu reduzieren.

6. Übertragbarkeit und Handlungsempfehlungen

6.1. Einführung

In den Kapiteln 2 bis 5 wurden im Detail Erkenntnisse aus der Begleitforschung zur Elektrifizierung der Vorfeldflotte am Flughafen Stuttgart dargestellt. In Abschnitt 6.2 wird diskutiert, inwiefern sich die Erkenntnisse aus der Einsatzpraxis auf andere Flughäfen übertragen lassen. Anschließend werden in Abschnitt 6.3 die wesentlichen Herausforderungen zusammengefasst und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Beide Kapitel stellen die Sichtweise der Begleitforschung dar, beziehen jedoch Ergebnisse zweier Workshops im Rahmen des Projekts *scale up!* ein. An den Veranstaltungen im Juni und im November 2019 nahmen jeweils – neben den Vertreterinnen und Vertretern der Projektpartner sowie des Fördermittelgebers – 20 bis 30 weitere Repräsentantinnen und Repräsentanten der Branche teil. Diese umfassten zehn weitere Flughäfen aus dem deutschsprachigen Raum, elf Hersteller von Fahrzeugen, Batterien und Ladeinfrastruktur sowie fünf weitere Akteure (Ministerien, Branchenverbände / -gremien und Forschungseinrichtungen). Darüber hinaus wurden im Jahr 2019 fokussierte Hintergrundgespräche mit einzelnen Personen aus dem Kreis der Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Workshops geführt.

6.2. Übertragung der Erkenntnisse aus *scale up!* auf andere Flughäfen und Anwendungen

Generelle Einordnung des Flughafens Stuttgart und der Elektrifizierung gegenüber anderen Flughäfen

Der Flughafen Stuttgart liegt mit einem Passagieraufkommen von 12,7 Mio. im Jahr 2019 auf **Rang 6 der deutschen Verkehrsflughäfen**. Zum Vergleich: Am weltweiten größten Flughafen Atlanta wird etwa das Neunfache, am größten deutschen Flughafen Frankfurt am Main das Sechsfache und in München das Vierfache Aufkommen abgefertigt. In Deutschland existieren jedoch auch ca. 30 vom Passagieraufkommen her kleinere zivile Verkehrs- und Sonderflughäfen. Es existieren insgesamt vier Terminals.

Nicht nur hinsichtlich der Größe zeigen die Verkehrsflughäfen große Unterschiede, die sich auch auf die Umsetzung von emissionsfreier Vorfeldmobilität auswirken. Ein wesentlicher Faktor für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist der **Flugplan**. So besteht seit den 1970er Jahren in Stuttgart ein **Nachtflugverbot** zwischen 23:00 Uhr (Starts) bzw. 23:30 Uhr / 24:00 Uhr (Landungen) und 6:00 Uhr. Dies erleichtert die Elektrifizierung der Vorfeldmobilität, da die Fahrzeuge mit moderater elektrischer Leistung während der nächtlichen Standzeiten geladen werden können. Für Flughäfen wie etwa Leipzig / Halle und Köln / Bonn, die den nächtlichen Betrieb als Standortvorteil v. a. wegen der Attraktivität für Frachtverkehre nutzen, kann dies bedeuten, dass eine andere Ladestrategie entwickelt werden muss.

Von Bedeutung ist zudem der Anteil von Urlaubsflügen. Flughäfen mit ausgeprägten **ferienbedingten Nachfragespitzen** verfügen in Relation zum gesamten Fluggastaufkommen über das Jahr über einen hohen Fahrzeugbedarf, um diese Peaks bedienen zu können. Auch die Ladeinfrastruktur muss sehr leistungsfähig ausgelegt sein, um die Spitzen bedienen zu können. Von Relevanz ist auch das Verhältnis von sogenannten **Low-Cost-Carriern** und etablierteren Fluggesellschaften. Aus Kostengründen werden erstere häufig auf Außenpositionen abgefertigt anstatt direkt an den Terminals mittels Fluggastbrücken. Dies hat einen erhöhten Fahrzeugaufwand zur Folge.

Nach Ansicht der im Projekt beteiligten Expertinnen und Experten sind die meisten deutschen Airports mit dem Flughafen Stuttgart vergleichbar in dem Aspekt, dass wenig direkt verfügbare **Flächenreserven** bestehen. Der Aufbau von Wartungskapazitäten und Ladeinfrastruktur kann, insbesondere in der Übergangsphase mit mehreren parallel existierenden Antriebstechnologien, dadurch gehemmt sein.

Unter den deutschen Flughäfen ist Stuttgart der größte, der nur über eine Start- und Landebahn verfügt. Deren Lage, wie auch die der Rollbahnen, Terminals und Abstellflächen (**Flughafen-Layout**) beeinflusst die Länge der Wegstrecken und damit erforderliche Batteriekapazitäten und Ladeleistungen. An Hub-Flughäfen können gegenüber „sekundären“ Airports wie Stuttgart längere Wegstrecken für die Vorfeldfahrzeuge auftreten. Dieser Faktor muss in der Auslegung von Batteriekapazitäten und Ladeinfrastruktur sowie der Einsatzplanung für E-Fahrzeuge frühzeitig berücksichtigt werden.

Ein weiterer allgemeiner Aspekt ist die Bedeutung von **Drittabfertigern**. Prinzipiell fördern Konzessionen für begrenzte Zeiträume eher nicht den langfristigen Aufbau neuer Technologien. Wichtig ist ein Vergabesystem, in dem der Einstieg in Innovationen Wettbewerbsvorteile erbringt, beispielsweise durch verbindliche Vorgaben in Ausschreibungen, und ein Wissens- und Technologietransfer zwischen verschiedenen Flughafenstandorten, an denen die Unternehmen tätig sind, erfolgt. Unter diesen Rahmenbedingungen können die Drittabfertiger Innovationstreiber sein.

Erwähnenswert ist nicht zuletzt die Bedeutung des **Handlungsdrucks**, der von den zumeist öffentlichen **Anteilseignern** ausgeübt werden kann. Im Fall des Flughafens Stuttgart war die frühzeitige Positionierung von Stadt und Land als Anteilseigner ein treibender Faktor für die Vorreiterrolle des Airports.

Mittlerweile sind jedoch auch andere deutsche Flughäfen in größerem Umfang in die emissionsfreie Vorfeldmobilität eingestiegen. So setzt der größte deutsche Flughafen in **Frankfurt am Main** aktuell etwa 500 elektrische Fahrzeuge auf dem Vorfeld ein, das entspricht etwa 15 % der Flotte (Fraport 2020). Während es beispielsweise für Förderbänder und Hubtransporter Vollelektrifizierungsfahrpläne für das kommende Jahrzehnt gibt und auch keine dieselbetriebenen GPUs mehr beschafft werden sollen, bleiben relevante Fahrzeugtypen wie etwa Gepäck- und Frachtschlepper, Passagierbusse, Push-Back-Schlepper momentan noch weitgehend außen vor. Der zweitgrößte deutsche Flughafen in **München** (Munich Airport 2020) verfügt zwar bisher erst über etwa 120 elektrische Fahrzeuge, plant aber eine CO₂-Neutralität des Fuhrparks bis 2030.

International ist beispielsweise der Flughafen **Zürich** hervorzuheben, wo bereits im Jahr 2016 30 % der 2.000 eingesetzten Fahrzeuge über einen elektrischen Antrieb verfügten (Flughafen Zürich 2019). Zur Stromversorgung wird dort stärker als in Stuttgart auf Schnellladeinfrastruktur gesetzt. Zudem ist die Interoperabilität ein wichtiges Prinzip: Es werden für verschiedene Fahrzeugtypen nutzbare zentrale Ladezonen aufgebaut. Am vor Frankfurt drittgrößten europäischen Flughafen **Amsterdam-Schiphol** sind die Fortschritte bei der Elektromobilität auf dem Vorfeld eng mit einer sehr ambitionierten Entwicklung auf der Landseite verbunden. So steht der Marke von ca. 40 Vorfeldbussen eine Zahl von über 100 ÖPNV-Bussen im Umfeld gegenüber (Royal Schiphol Group 2020). Die Ausschreibung der Busverkehre sieht einen Ausbau auf über 250 E-Busse zur Anbindung vor. Der Flughafen hat in den vergangenen Jahren zudem eine komplett elektrische Taxiflotte, elektrisches Carsharing und umfangreiche Lademöglichkeiten für Privatnutzerinnen und -nutzer aufgebaut. Auf dem Vorfeld wurde z. B. die Stromversorgung weitgehend auf mobile und stationäre e-GPUs umgestellt.

Klimaziele, Handlungsdruck und Umsetzungsstrategien

Die gesellschaftlichen Diskussionen und das steigende Engagement in Sachen Klimaschutz erhöhen auch den öffentlichen Druck auf Flughafenbetreiber, sich dem Thema anzunehmen und notwendige Schritte in Richtung einer CO₂-Reduzierung einzugehen. Infolgedessen haben die im ADV organisierten deutschen Flughafenbetreiber im Jahr 2019 das Ziel von **Netto-Null-CO₂-Emissionen** bis 2050 vereinbart (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) 17.07.2020). Dass diese Zielsetzung hilfreich ist, eingehalten und wenn möglich verschärft werden soll, ist unter den beteiligten Vertreterinnen und Vertretern weiterer Flughäfen Konsens. Zudem sind sich die im Rahmen der Projektworkshops beteiligten Akteure darüber einig, dass eine saubere Alternative zu Dieselfahrzeugen notwendig ist, um zukünftige verschärfte Luftschadstoffgrenzwerte erfüllen zu können.

Hinsichtlich der Priorisierung gegenüber anderen Zielen sowie der Wege zur Erreichung dieser Marke gibt es jedoch Unterschiede. So hat erwartungsgemäß in Berlin die Eröffnung des neuen Hauptstadtflughafens höchste Priorität, sodass bisher keine umfassende Strategie zur Elektrifizierung der Vorfeldflotte oder zu anderen Klimaschutzmaßnahmen entwickelt wurde. Unterschiedliche Ansätze bestehen vor allem bei der Frage, in welchem Maße und bis wann die Einsparungen von Treibhausgasen durch Maßnahmen im eigenen Betrieb erfolgen sollen und inwieweit verbleibende Emissionen durch weitere Initiativen außerhalb des eigenen Handlungsraums kompensiert werden können. Die ADV-Selbstverpflichtung trifft an dieser Stelle bisher keine verbindliche Entscheidung, die Formulierung lautet: „In erster Linie soll das Klimaziel durch Reduktion des eigenen CO₂-Ausstoßes (Scope 1 und 2*) erreicht werden.“ Der internationale Verband ACI Europe konkretisiert jedoch, dass zur Erreichung des „Net zero“-Ziels eine Kompensation nur dann angerechnet werden kann, wenn dabei CO₂-*Senken* wie Wälder entstehen, nicht aber in Form von Emissionsreduktionsmaßnahmen (Airports Council International (ACI) 16.05.2019, 2019).

Der Flughafen München strebt an, bereits bis 2020 durch 60 % Reduktion und 40 % Kompensation CO₂-neutral zu sein. Fraport hat sich zum Ziel gesetzt, seine jährlichen CO₂-Emissionen auf 80.000 t im Jahr 2030, also gegenüber 2018 um über 50 %, zu reduzieren, und bis 2050 ohne Kompensation CO₂-neutral aufgestellt zu sein. Am Frankfurter Flughafen konnten mittels eines Energieeffizienzprozesses seit 2001 über 40 % CO₂ eingespart werden. Der Hauptanteil entfällt hier allerdings auf die Gebäudetechnik (Klimatisierung, Wärmedämmung, Beleuchtung).

Insgesamt wird der Anteil der Vorfeldmobilität an den Gesamtemissionen der Flughäfen mit etwa 5 bis 8 % beziffert. Jedoch stellt die Umstellung auf Elektromobilität ein heute technisch verfügbares und vergleichsweise schnell umsetzbares Reduktionspotenzial dar. Durch die Umstellung der Gebäudetechnik können zwar absolut höhere Emissionsreduktionen erreicht werden, in der Umsetzung kann sich dies jedoch äußerst komplex darstellen.

Unsicherheiten hinsichtlich des Technologiepfads

Auch die Herangehensweise an eine nachhaltige Transformation der Vorfeldmobilität unterscheidet sich zwischen den Flughäfen. Der Flughafen Stuttgart legt klar den Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge und auch weitere an den Workshops beteiligte Flughäfen setzen bereits heute Hubbühnen, Vorfeldschlepper, Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Busse mit elektrischem Antrieb ein. An anderen Standorten werden größere Hoffnungen in andere, bisher noch weiter von der breiten Umsetzung entfernte Antriebsarten, v. a. Wasserstoff, gesetzt und diese Technologien verstärkt in Konzepte und Masterpläne integriert. Höhere Reichweiten und geringere Tankzeiten werden meist als Argument für die Wasserstoff-Brennstoffzelle genannt. Mit dem Argument der Technologieoffenheit wird dort in geringerem Umfang in die Elektromobilität investiert. An manchen Flughäfen befinden

sich Hybridfahrzeuge als mögliche Brückentechnologie im Einsatz bzw. in der Einführung. Diese werden jedoch nicht als langfristige Lösung betrachtet.

Im Vergleich mit Konkurrenztechnologien sprechen für die Elektromobilität, wie in diesem Papier vielfach untermauert, u. a. die bereits heute erzielbare CO₂-Einsparung und Energieeffizienz, die hohe technologische Reife, und das vergleichsweise große Fahrzeugangebot, das die meisten auf dem Vorfeld existierenden Anforderungsprofile bewältigen kann.

Einig ist man sich hingegen darüber, dass es einer langfristigen Strategie bedarf, die die Weiterentwicklung von Fahrzeugen und auch Infrastrukturen im Blick behält. Dienstanweisungen in der Beschaffung, welche auf die Umweltverträglichkeit als Kriterium in der Umsetzung verweisen, können dieses Bestreben zusätzlich stärken.

Fahrzeugverfügbarkeit und Technikentwicklung

Für den Flughafen Stuttgart als „Early Adopter“ kommt und kam es in mehreren Fahrzeugklassen zu Verzögerungen der eigentlichen geplanten Flottenelektrifizierung aufgrund von mangelnder Verfügbarkeit oder technischer Reife. Manche Fahrzeugtypen sind und waren herstellerseitig nicht mit elektrischem Antrieb verfügbar, andere nicht mit den benötigten Stückzahlen oder Lieferzeiten, wieder andere nur als Prototypen mit entsprechenden Ausfallzeiten bei der Technologieerprobung. Wie unter diesen Bedingungen die Elektrifizierung der Flotte vonstattengeht und welche Auswirkungen dies auf Kosten, Energiebedarf und CO₂-Emissionen hat, wurde in Kapitel 2 präsentiert.

Zur Erreichung der Dekarbonisierung 2050 und der bis dahin als Etappenziele gesetzten Werte zur Emissionsreduktion ist jedoch eine beschleunigte Umstellung der Flotten erforderlich. Es ist also mit einer sprunghaft steigenden Nachfrage zu rechnen. Sofern aber die Hersteller von Sonderfahrzeugen, wie momentan zu beobachten, weiter konsequent ihre elektrifizierte Modellpalette ausbauen und gleichzeitig auch die Massenmarkt-Fahrzeuge (Pkw und LNF) in den benötigten Stückzahlen verfügbar sind, ist zu hoffen, dass die Entwicklung an den übrigen deutschen Flughäfen weniger als am Vorreiter Flughafen Stuttgart von mangelnder Fahrzeugverfügbarkeit und fehlender Technologiereife geprägt sein wird.

Herstellerseitig muss sich auf die Dauer eine breite Palette an Fahrzeugspezifikationen herausbilden, insbesondere was Batteriekapazitäten angeht. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Flughäfen hinsichtlich des Flugprogramms (z. B. nächtliche Standzeiten zur Ladung) und der zurückzulegenden Strecken führen zu sehr unterschiedlichen Anforderungen. Eine Differenzierung hinsichtlich der Reichweite stellt eine neue, in der konventionellen Antriebswelt bisher nicht erforderliche, Anforderung dar.

Ladeinfrastruktur, Strombereitstellung und Strombezug

In Stuttgart, wie auch an anderen Flughafenstandorten, spielt die Stromnachfrage der Vorfeldmobilität auch bei starkem Ausbau mengenmäßig eine im Vergleich zum Gebäudebereich untergeordnete Rolle.

Bereits kurzfristig treten allerdings zusätzliche Lastspitzen durch die Batterieladung auf, die ein frühzeitiges Lademanagement oder die Nutzung anderer Flexibilitäten im System erforderlich machen. Anforderungen des Fahrzeugbetriebs und der Energiebereitstellung müssen frühzeitig in Einklang gebracht werden. Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, wurde darauf am Flughafen Stuttgart in der Form reagiert, dass eher geringe elektrische Leistungen an den einzelnen Ladepunkten realisiert und gleichzeitig ein intelligentes Lademanagement aufgebaut wurden. Auf diese Weise konnten Hardwarekosten für Ladepunkte, Netzausbau und Erzeugungskapazitäten bzw. Strombezug bei

Spitzenlast eingespart werden. Gleichzeitig ist durch das Lademanagement eine Berücksichtigung der quantitativ übergeordneten Nachfrager im Gebäudebereich und künftig bei der landseitigen Mobilität möglich.

Dieser robuste und gleichzeitig zukunftsfeste Ansatz lässt sich prinzipiell auch auf andere Flughäfen übertragen, weil die zugrundeliegenden Eigenschaften – gute Planbarkeit des Einsatzprofils, hoher Anteil von Standzeiten, kurze Fahrtstrecken, Grenzen hinsichtlich der elektrischen Anschlussleistung usw. – auch an anderen Flughäfen gelten. Unterschiede im Flugprogramm, v. a. Nachtbetrieb, können jedoch Gründe sein, andernorts z. B. stärker auf Schnellladung zu setzen. Auch werden flächenmäßige Einschränkungen, v. a. an den bestehenden Fahrzeugabstellflächen, an anderen Flughäfen noch stärker als Einschränkung gesehen. Diese Thematik wurde im zweiten Workshop kontrovers diskutiert.

Der Flughafen Stuttgart wird zukünftig mit seinen vielfältigen verkehrlichen und sonstigen Stromnachfragern – Vorfeldmobilität, Zubringer- und Fernverkehr mit Pkw und Nutzfahrzeugen, Messeverkehre, schienengebundener ÖPNV, Bahn-Fernverkehr, ÖPNV- und Fernbusse, Gebäudebereich usw. – einen höchst interessanten und komplexen Knotenpunkt darstellen. Eine ganzheitliche und wissenschaftliche Betrachtung dieses Reallabors sollte daher gewährleistet sein. Auch dies gilt in ähnlicher Form für die meisten anderen Flughäfen.

Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien ist ein Treiber für die Elektrifizierung und kann je nach Standort in unterschiedlichem Umfang durch Eigenstromerzeugung kombiniert werden. Diese zusätzliche Motivation zum Umstieg auf Elektromobilität kann an anderen Standorten höher ausfallen, da die Bedingungen im Umfeld des Flughafens Stuttgart, v. a. aufgrund von Flächenbeschränkungen, nicht optimal sind. Im Abschnitt 5 wurde dargestellt, dass die Eigenversorgung mit erneuerbarem Strom am Flughafen Stuttgart auch künftig nur eine untergeordnete Rolle spielen wird. Andernorts ist die Eigenstromerzeugung mit Werten von bis zu 50 % (aus erneuerbaren und fossilen Quellen) höher als in Stuttgart.

Wirtschaftlichkeit und Förderung

Die Erkenntnisse der Elektrifizierung am Flughafen Stuttgart hinsichtlich der wirtschaftlichen Parameter lassen sich in der Grundtendenz auch auf andere Standorte übertragen:

- Letztlich bestimmen im Moment der Neuanschaffung oder -errichtung von Fahrzeugen, Komponenten und Infrastruktur wirtschaftliche Überlegungen die Investitionsentscheidungen. Dies gilt mindestens in gleichem Maße für Drittanbieter wie für die Flughafenbetriebsgesellschaften.
- Eine Wirtschaftlichkeit über die gesamte Lebensdauer ist heute zwar bei einzelnen Fahrzeugkategorien gegeben, u. a. weil Energie-, sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten reduziert werden. In vielen Fällen verhindern jedoch die zu hohen Anschaffungskosten noch die vollständige Konkurrenzfähigkeit ohne Förderung.
- Aufgrund von Entwicklungen in der Batterietechnologie, vermehrter Herstellerkonkurrenz und Skaleneffekten ist mit einer Kostendegression bei Elektrofahrzeugen zu rechnen.
- Im Verlauf des Elektrifizierungsprozesses ist dennoch, wenn überhaupt, nur von einem moderaten Rückgang der jährlichen Mehrkosten für die Elektrifizierung auszugehen, weil über die Jahre vermehrt auch die aus wirtschaftlicher Sicht sehr schwierigen Sonderfahrzeugkategorien umgestellt werden.

Andere Flughäfen bzw. Flottenbetreiber, die später in den Prozess starten oder gestartet sind, profitieren im Vergleich zum Flughafen Stuttgart jedoch voraussichtlich von einem verbesserten und günstigeren Angebot an Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur. Dennoch ist mittelfristig nicht

abzusehen, dass die Elektrifizierung ohne verbindliche Vorgaben oder öffentliche finanzielle Förderung zum Selbstläufer wird. Hervorgehoben werden bei den Beteiligten aus der Branche Förderprogramme wie in Nordrhein-Westfalen, wo auch schwere Nutzfahrzeuge mit einer zusätzlichen Anschaffungsprämie von bis zu 8.000 Euro gefördert werden.⁴

Deutlich wird am Beispiel des Flughafens Stuttgart auch, wie Altersstruktur und Erneuerungszyklen im Fuhrpark sowie parallellaufende Entwicklungen wie etwa die Elektrifizierung von Vorfeldpositionen auf die Wirtschaftlichkeit wirken. Auch die erwartete Fluggast- und ggf. Frachtaufkommensentwicklung sind relevante Faktoren. Betriebliche Charakteristika bestimmen den möglichen Bedarf an Schnellladepunkten (s. vorheriger Abschnitt), der zum Kostentreiber werden kann.

Eine langfristige Planung von Flotte und Ladeinfrastruktur ist somit in jedem Falls notwendig. Szenarienbetrachtungen zu genannten Aspekten, wie im Projekt *scale up!* erfolgt, vermitteln dabei wertvolle Erkenntnisse zu den zentralen Einflussfaktoren.

6.3. Herausforderungen und Handlungsempfehlungen

6.3.1. Fortsetzung des Elektrifizierungsprozess geboten

In diesem Working Paper konnte gezeigt werden, welche **Umweltvorteile** die Umstellung auf elektrischen Antrieb bietet: Durch die Vermeidung des Verbrauchs fossiler Kraftstoffe zahlt der Prozess auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen ein. Elektromobilität ist für das Einsatzprofil der Fahrzeuge mit oft langen Standzeiten und kurzen Einsatzwegen in Hinblick auf Verbrauch, Emissionen und Lebensdauer der Komponenten **besser geeignet als Dieselmotoren**. Die Einsparung von Lärm- und Schadstoffemissionen kommt dem Personal zugute.

Die Technologie ist weitgehend **zukunftssicher**, da politische Weichenstellungen wie die CO₂-Bepreisung fossiler Kraftstoffe und der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung die Kostenbilanz zugunsten der Elektromobilität verbessern bzw. stabilisieren. Gleichzeitig ist bei weiterer Entwicklung der batterieelektrischen Fahrzeugtechnologie zu erwarten, dass in den kommenden Jahren hinsichtlich Batterie-, Energie- und Wartungskosten sowie Lebensdauer Vorteile gegenüber Verbrennerfahrzeugen ausgebaut bzw. Nachteile abgebaut werden.

Die Lithium-Ionen-Technologie sollte mittelfristig die **Blei-Säure-Batterien vollständig ablösen**. Hintergrund sind die höhere Effizienz der Lithium-Ionen-Batterien, die graduellen Vorteile hinsichtlich mehrerer Umweltgüter und v. a. der gravierende Vorteil in der Kategorie des abiotischen Ressourcenbedarfs.

Die aktuelle tiefgreifende **Krise der Luftfahrtbranche** infolge der Corona-Pandemie darf nicht als Anlass gesehen werden, den aus Umwelt- und auf die Dauer auch aus ökonomischer Sicht gebotenen Umbruch aufzuschieben. Im Gegenteil sollte geprüft werden, ob aktuell brachliegende Abfertigungskapazitäten im Interesse einer beschleunigten Flottenelektrifizierung vorzeitig stillgelegt und mögliche öffentliche Fördermittel für die Branche in den Umstieg auf Elektromobilität gelenkt werden können.

Trotz der realisierbaren Kosten- und Umweltvorteile durch die Elektrifizierung sind **intelligenter und sparsamer Fahrzeugeinsatz** gefordert, um Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur sowie Ressourcenaufwand zu begrenzen. Nicht zuletzt ist die hohe Bedeutung der allgemeinen Entwicklung von **Passagieraufkommen und Flugzeugabfertigungen** zu betonen. Ein weiteres Wachstum wird

⁴ <https://www.elektromobilitaet.nrw/foerderprogramme/elektrofahrzeuge/#c10248>

nicht nur auf die Klimabilanz des eigentlichen Flugverkehrs als weit bedeutenderer Treibhausgasemittent wirken, sondern auch auf die der Vorfeldmobilität.

Bei der Umstellung sind noch wichtige Herausforderungen zu meistern. Diese werden in den Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.6 diskutiert und jeweils Handlungsempfehlungen abgeleitet.

6.3.2. Fahrzeugverfügbarkeit und Technikentwicklung

Ein Großteil der in der Vorfeldflotte vertretenen Fahrzeugtypen ist mittlerweile auch mit E-Antrieb verfügbar und vermehrt entwickelt sich ein Markt mit konkurrierenden Anbietern. Nach wie vor sind Beschaffung und Roll-Out für Flughafenbetreiber und Drittabfertiger als Nischenabnehmer, die nur geringe Stückzahlen abnehmen und Spezialanfertigungen für den Vorfeldbetrieb benötigen, aufwändiger.

Fahrzeugverfügbarkeit und Technikentwicklung **orientieren** sich häufig an der Nachfrage und Produktion der jeweils verbundenen „**Massenmärkte**“. Manche der eingesetzten Fahrzeugtypen werden auch in anderen Anwendungen schon lange elektrisch angetrieben, bspw. **Gabelstapler und Schlepper** für die Nutzung in Innenräumen wie etwa Lagerhallen. Hier sind reifere Märkte mit mehreren Anbietern zu finden, in denen die Anschaffungspreise teils unter denen von Dieselfahrzeugen liegen. Schwieriger ist die Beschaffungssituation etwa bei **leichten Nutzfahrzeugen und Pkw**. Zwar können Flughäfen vom wachsenden Angebot an elektrischen Modellen und der mittlerweile auch dynamisch wachsenden Nachfrage im privaten und gewerblichen Bereich profitieren. Jedoch übersteigt die Nachfrage momentan das Angebot, sodass die Nachfrage der Flughäfen mit ihren relativ geringen Stückzahlen von individuell konfigurierten Fahrzeugen nicht prioritär bedient wird im Vergleich mit Abnehmern einer großen Anzahl von standardisierten Fahrzeugen, etwa aus der Branche der Kurier-, Express- und Paketdienste. Bei **Kleinserienfahrzeugen**, die fast ausschließlich am Flughafen eingesetzt werden, beispielsweise Push-Back-Schleppern und Hubtransportern, ist eine fehlende Serienverfügbarkeit festzustellen. Wegen der geringen Stückzahlen und der oft kleinen bis mittelständischen Anbieter, die diese Spezialfahrzeuge anbieten, ist es bisher nicht gelungen, eine Kostensenkung aufgrund von Skaleneffekten zu erreichen.

Aus ähnlichen Gründen mangelt es an **technischer Standardisierung** von Ladeinfrastruktur, Bordelektronik und Energiespeichern. Hersteller orientieren sich bei der Komponentenentwicklung vermehrt an Standards aus dem OEM-Bereich, um Schnittstellen und Skaleneffekte sicherzustellen. Eine solche Entwicklung wird von den meisten Beteiligten begrüßt.

Die gegenüber der Komplexität von Diesellaggregaten **wartungsärmere** Technik wird heute bereits als Vorteil wahrgenommen und die Beteiligten erwarten, dass dies sich zukünftig noch vermehrt bei Kosten, Lebensdauer und Verfügbarkeit bemerkbar machen wird. Unsicherheiten stellen jedoch weiterhin die Entwicklung von **Batteriepreisen, Batteriekapazitäten** und Vorbehalte hinsichtlich der Verfügbarkeit der erforderlichen Rohstoffe dar – sowohl im Massenmarkt als auch insbesondere bei den Flughafenanwendungen. Besonders für den Einsatz an großen Hub-Flughäfen verfügen nach wie vor manche Fahrzeugtypen in ihrer elektromobilen Variante über zu geringe Reichweiten. Technologische Fortschritte und Skaleneffekte bei der Batterieproduktion erreichen bisher die betrachteten Anwendungen und Hersteller mit geringem Fertigungsvolumen nicht im vollen Maße.

Weiterhin steht das Zusatzgewicht vor allem bei großen Geräten und Fahrzeugen in der Kritik, ebenso wie die Frage nach einer ausreichenden Ressourcenverfügbarkeit zur Batterieherstellung. Somit wird auch in der Zukunft Bedarf bestehen, den Praxiseinsatz wissenschaftlich zu begleiten und die mit der Elektromobilität verbundenen ökologischen Fragestellungen zu untersuchen.

Handlungsempfehlungen

Die Anwender an Flughäfen sollten verstärkt und konzertiert ihre **Anforderungen** an das Fahrzeugangebot **kommunizieren** – einerseits **quantitativ** in Form von verbindlichen Abnahmezahlen als auch **qualitativ** in Form von möglichst vereinheitlichten technischen Spezifikationen. Dies ist sowohl im Interesse der Nachfrageseite, die ihre Elektrifizierungsfahrpläne umsetzen will und dabei auf eine ausreichende Fahrzeugverfügbarkeit angewiesen ist, als auch der Hersteller, die auf diese Weise frühzeitig die benötigte Vielfalt an Fahrzeugen wie auch den Einsatzzweck (und damit z. B. die Batteriekonfiguration) planen können. Gleichzeitig sind aber auch die Hersteller gefordert, ein vielseitiges und nach Möglichkeit **modular aufgebautes Fahrzeugangebot** zu schaffen und ebenfalls verstärkt mit den Anwendern der Flughafenbranche zusammenzuarbeiten. So kann der Austausch von Telemetrie-Daten eine Vergleichsmöglichkeit auf gleicher Ebene mit anderen Abfertigern ermöglichen.

Ein zentrales Erfordernis bei der **Fahrzeugtechnik** sieht die Branche in der **Standardisierung** der Einbaugrößen von Batterien. Die Herausforderung für die Hersteller besteht darin, dass die prinzipiell gewünschte Übertragbarkeit aus dem Automobilbereich aufgrund der Anforderungen an die Fahrzeuge nicht immer gegeben ist und sie auch in Märkte außerhalb der EU sowie in andere Anwendungen liefern. Umso entscheidender wird es sein, dass sich Flughafenvertreter wie auch Drittabfertiger noch stärker in **Normungsgremien** engagieren und so die Erfordernisse der **Branche stark vertreten**.

6.3.3. Umstellung des Fahrzeugbetriebs

Die Umstellung der Vorfeldmobilität ist für Flughafenbetreiber und Drittabfertiger einer der wichtigsten Hebel zur Emissionsreduktion. Dabei fungieren national und international einzelne Flughäfen, darunter Stuttgart, als Vorreiter der Elektrifizierung der Vorfeldmobilität. Vermehrt zeigen auch **Airlines Interesse** an einer CO₂-freien Abfertigung und gemeinsamen Aktivitäten mit Flughafenbetreibern in diese Richtung.

Die Elektrifizierung der Vorfeldflotte erweist sich aber auch in der Einsatzpraxis als vorteilhaft. Die Einsatzprofile sind meist gut planbar, bestehen aus relativ kurzen Fahrtstrecken und lassen sich somit problemlos in den Fahrzeugbetrieb integrieren. Der bei manchen Fahrzeugtypen stattfindende Einsatz in Gebäuden, der hohe Anteil von Standzeiten bzw. Kurzstreckenbetrieb und die gleichzeitig ständig erwartete Einsatzbereitschaft sind Eigenschaften, die den elektrischen Antrieb gegenüber den Verbrennungsmotoren auf dem Vorfeld Vorteile verschaffen.

Wenngleich das Interesse an der Thematik zunimmt und sich bereits einzelne Akteure intensiv mit der Elektrifizierung der Vorfeldmobilität auseinandersetzen, bleibt das Hemmnis **fehlender Ressourcen** vorerst bestehen. So fehlt oft nicht nur das **Personal**, welches sich der „Zusatzaufgabe“, die Elektromobilität konkret in die Umsetzung zu bringen, widmen kann. Sondern auch die Bearbeitung allgemeiner Nachhaltigkeitsthemen erfordert Zeitressourcen und **Detailwissen**, um kritische Fragen z. B. zur Ressourcenverfügbarkeit, Umweltbewertung (LCA) und zu möglichen Alternativenkonzepten (z. B. Brennstoffzellenantrieben und synthetischen Kraftstoffen) fundiert beantworten zu können und Vorbehalte in Bezug auf die Transformation und seine Ausgestaltung im Umfeld abzubauen.

Fahrzeuge, die im Vorfeld zum Einsatz kommen, unterliegen hohen Anforderungen an deren Verlässlichkeit bei der Flugzeugabfertigung. Eine zu Testbeginn noch fehlende bzw. unzureichend vorhandene **Verlässlichkeit des Fahrzeugeinsatzes** kann dann schnell als Eintrittshürde für neue Konzepte und Antriebe ausgelegt werden.

Handlungsempfehlungen

Der Schlüssel zur erfolgreichen Bewältigung der zahlreichen Herausforderungen durch die Transformation des Fuhrparks und zur Stärkung der Bereitschaft der Betreiber zur Elektrifizierung liegt in **Austausch und Zusammenarbeit** der beteiligten Akteure – sowohl standortbezogen als auch überregional. Es braucht stark aufgestellte **Akteure im Unternehmen**, die Nachhaltigkeitsstrategien insgesamt vorantreiben und die konkrete Umsetzung z. B. im Fuhrpark durchsetzen können. Darüber hinaus bedarf es der Zusammenarbeit und des **Austausches zwischen Flughäfen und Herstellern**, um den Markt auf die spezifischen Bedarfe der Vorfeldmobilität abzustimmen und auszubauen. Daneben zeigt sich ein zunehmendes Engagement von Mitarbeitenden bei der **Vernetzung von Flughäfen** (etwa über Projekte wie *scale up!* und Verbandsgremien von ADV und NOW), um von den gegenseitigen Erfahrungen zu lernen.

Zentral ist zudem eine verbesserte Berücksichtigung der Situation unter Dritt Fertigern: Wenn **Konzessionsausschreibungen konkrete Vorgaben** zu Emissionen bzw. Antriebstechnologie machen, schafft dies ein „level playing field“ zwischen den Wettbewerbern und sichert gleichzeitig das Ambitionsniveau. Wenn gleichzeitig **zwischen den Flughäfen Leitlinien** zur Gestaltung der Ausschreibungen hinsichtlich der Elektrifizierung **abgestimmt** werden, mindert dies Risiken für die Wettbewerber, die ihre Technik auf diese Weise auch an anderen Standorten einsetzen können.

Um den laufenden Dialog und die positive Entwicklung weiterführen zu können, sind momentan jedoch noch Förder- und Forschungsprogramme mit möglichst geringen formalen Hürden für Praxispartner erforderlich.

6.3.4. Wirtschaftlichkeit und Förderung

Die Kosten für die Beschaffung und den Betrieb von E-Fahrzeugen in Vorfeldflotten haben sich in den letzten Jahren positiv entwickelt. **Gleiche Anschaffungskosten** scheinen mittelfristig in den meisten Fahrzeugkategorien realisierbar. Bei den Gesamtkosten über die Lebensdauer verfügen heute schon manche Fahrzeugtypen, deren elektrische Variante bereits in größeren Stückzahlen hergestellt werden, über Vorteile gegenüber der dieselbetriebenen Konkurrenz.

Die Kostenvorteile und die **positive Kostenentwicklung** zeigen sich dabei nicht nur im Antrieb und der Batterie, sondern auch der Lade- und Speichertechnik. Im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen ergeben sich vor allem **im Betrieb Kosteneinsparungen** durch u. a. geringere Wartungskosten, die die höheren Anfangsinvestitionen von E-Fahrzeugen gegenüber konventionellen kompensieren. Viele Fahrzeuge befinden sich bereits wirtschaftlich im Betrieb und werden in anderen Anwendungen seit mehreren Jahren zum Einsatz gebracht (z. B. kleine Schlepper). Zunehmend kann auch von **Skaleneffekten** profitiert werden, wie etwa bei den für den Massenmarkt produzierten leichten Nutzfahrzeugen. Momentan sind es vor allem auch umfangreiche **öffentliche Förderungen**, die die Entscheidung für eine Elektrifizierung der Vorfeldmobilität vorantreiben können. Zukünftig ist zu erwarten, dass auch das **Interesse der Airlines** an einer CO₂-freien Abfertigung steigen und damit die Entwicklung antreiben wird. Zuletzt wird auch der **Restwert der Fahrzeuge** aufgrund guter Wiederverkaufsmöglichkeiten von E-Fahrzeugen im Ausland als unkritisch gesehen. Denn auch in anderen Ländern geht der Trend in Richtung Elektromobilität – teils (z. B. China, europäisches Ausland) sogar mit einigem Vorsprung gegenüber Deutschland.

Dennoch herrscht weiterhin Unsicherheit über die weitere Entwicklung: Wie entwickeln sich Batteriepreise und Batteriekapazitäten? Könnten Nutzungskonzepte bzw. das Leasing von Batterien anstelle des Kaufs die Hürde hoher Anschaffungskosten reduzieren und Ausfall- und Kostenrisiken vom Nutzer zum Fahrzeug- bzw. Batteriehersteller verlagern? Wie sind das Risiko eines weiterhin

vergleichsweise niedrigen Ölpreises und das eventuelle Ausbleiben bzw. die wenig ambitionierte Einführung einer CO₂-Bepreisung einzuschätzen? Wie wird der Ausbau der Erneuerbaren Energien voranschreiten und in wieweit wirken im Zuge dieser Entwicklung marktseitige und politische Faktoren auf die Energiepreise?

Im Vergleich mit anderen Fahrzeugsegmenten wie Pkw, aber auch Lkw und Baumaschinen, ist der **Markt für Vorfeldfahrzeuge relativ klein**. Die Fahrzeuge werden daher von **Manufakturen** gefertigt oder umgebaut. Andererseits gilt dies auch für die konventionellen Fahrzeuge und doch können auch diese vom technologischen Fortschritt bei den Massenmarktprodukten (auf Komponentenebene) profitieren. Das Problem wird in der Branche eher darin gesehen, dass die meisten Fahrzeugtypen und -hersteller vor allem am Baumaschinen- und weniger am Automobilbereich orientiert sind. Genau dieser **Baumaschinen-Sektor** hinkt beim Thema Elektrifizierung deutlich hinterher. Die für die Vorfeldmobilität nachgefragten E-Fahrzeuge sind somit kein relevanter Hebel, um Skaleneffekte und damit Kostensenkungen seitens der Hersteller zu erreichen. Gleichzeitig haben die Hersteller von Vorfeldfahrzeugen aufgrund der geringen Stückzahlen auch keine Marktmacht gegenüber den Batterieherstellern und können **daher keine ausreichende Batteriekostensenkung** erzielen bzw. profitieren von dieser mit deutlichem Zeitverzug. Zudem fehlt es aufgrund der geringen Marktdurchdringung des Baumaschinenmarkts mit E-Fahrzeugen an einer Normierung der **Standards für die Batterie- und Ladetechnik**. Eine solche würde die Vorfeldfahrzeugbranche voranbringen.

Bei den Flughafenbetreibern stellt die Bereitstellung zusätzlicher **finanzieller Mittel** für die **Beschaffung** neuer (E-)Fahrzeuge oft eine Schwierigkeit dar. Bei den Investitionsentscheidungen steht meist der (hohe) **Anschaffungspreis** im Fokus, wohingegen eine Analyse der Gesamtbetriebskosten unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus (TCO) bei weitem nicht selbstverständlich ist. Höhere Abfertigungskosten, die durch den Einsatz von E-Fahrzeugen entstehen könnten, können jedoch nur schwer an Airlines weitergegeben werden: Diese zeigen ohne eine verbindliche Verpflichtung selten Zahlungsbereitschaft für eine emissionsfreie Bodenabfertigung, selbst wenn sie selbst eine Reduktion von Treibhausgasen anstreben, weil sie die Abfertigung am Boden i. d. R. nicht als eigenes Handlungsfeld ansehen. Die Flughäfen wiederum befürchten, durch alternativ angewandte höhere Gebühren für die Flugzeugabfertigung die Entwicklung ihres Standorts zu hemmen.

Handlungsempfehlungen

Die weiterhin **hohen Anfangsinvestitionen** bzw. die mit dem Umstieg auf Elektromobilität einhergehenden **Anschaffungsmehrkosten** lassen sich bisher nur teils durch Einsparungen von Energie- und Wartungskosten **im Betrieb kompensieren**. Trotz wachsender Bedeutung von Klimaschutzzielen und Luftqualitätsproblematiken bestimmt die **Wirtschaftlichkeit** nach wie vor die (Investitions-)Entscheidungen der Flughäfen. Die zumeist öffentlichen Eigner der Betreibergesellschaften sind in der Verantwortung, die **Abwägung** zwischen Wirtschaftlichkeit auf der einen sowie Schutz von Klima, Luftqualität und Mitarbeitergesundheit auf der anderen Seite zu treffen. Bei der Investitionsentscheidung muss unbedingt auf die **Lebenszykluskosten** fokussiert werden.

Aus Sicht der Flughafenbetreiber ist in der jetzigen Phase eine umfassende **öffentliche (Fahrzeug-)Förderung** von möglichst 50 % der Anschaffungskosten eine Voraussetzung, um weitere Schritte in Richtung Elektromobilität zu gehen. Daneben sollte die **öffentliche Förderung** nicht nur **Fahrzeuge** und **Infrastrukturen** berücksichtigen, sondern auch an Nachhaltigkeit ausgerichtete, praxisnahe **Forschungsprojekte** finanziell unterstützen. Als Teil der Fahrzeug- und Infrastrukturförderung besteht seitens der Flughafenbetreiber der Wunsch, auch Ladeinfrastrukturen auf dem Vorfeld als öffentliche Infrastruktur zu klassifizieren sowie Steuern und Umlagen auf Strom und Investitionen in die elektrische Infrastruktur zu verringern. Insgesamt stellt sich die Frage, welcher Akteure

die Mehrkosten für die Elektrifizierung tragen sollten: Viele beteiligte Akteure fordern einen **verstärkten Einbezug der Airlines** mittels Verpflichtungen zur emissionsfreien Abfertigung und Kostenbeteiligung. Dies deckt sich in der Konsequenz mit dem **Verursacherprinzip**, da die Kosten letztendlich zumindest teilweise durch die Fluggäste getragen würden.

Der wirtschaftliche Einsatz von E-Fahrzeugen in der Vorfeldmobilität kann jedoch nicht dauerhaft über öffentliche Fördergelder gewährleistet werden: Im Unternehmen, in Verbänden wie dem ADV und in der Politik muss **Regulierung und Rahmensetzung** verzahnt werden. Hersteller sind zu einer **attraktiveren Preisgestaltung** bei Fahrzeugen mit innovativen Antrieben wie der E-Mobilität und der Brennstoffzelle angehalten, um ihren Beitrag zur Zielerreichung zu leisten. Anders als etwa im Pkw-Bereich sind sie jedoch bisher nicht auf Zielwerte hinsichtlich der Flottenemissionen von **Treibhausgasen** verpflichtet. Zu erwarten ist jedoch, dass verschärfte Grenzwerte für die Emissionen von **Luftschadstoffen** aufgrund nötiger Motoroptimierung und Abgasnachbehandlung die Anschaffungskosten für konventionell angetriebene Fahrzeuge und somit die Wettbewerbsfähigkeit von E-Fahrzeugen erhöhen werden.

6.3.5. Dilemma aus Handlungsdruck und Technologieoffenheit

Der **gesellschaftliche Wandel** und das damit eingehende gesteigerte **Umweltbewusstsein** sind auch in der Flughafenbranche relevante Themen. So wurde der Rückgang von v. a. innerdeutschen Flugreisen Ende 2019 teils als erstes Anzeichen von Verhaltensänderungen im Sinne einer „Flugscham“ aufgefasst. Es zeigt sich, dass Klimaschutz nun eine höhere Priorität zugeschrieben wird und auch **wissenschaftliche Fakten** innerhalb und außerhalb des Flughafenbetriebs auf größeres Gehör stoßen. Nicht zuletzt die veränderte öffentliche Wahrnehmung setzt den Akteuren Anreize dazu, Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele, allen voran der im ADV vereinbarten Zielmarke von **Netto-Null-CO₂-Emissionen** bis 2050, zu ergreifen.

Gleichzeitig beginnen schon heute veränderte **politische Rahmensetzungen**, eine nachhaltige Vorfeldmobilität zu fördern. Der hohe **politische Handlungsdruck** auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene sowie die politischen Aushandlungsprozesse um **CO₂-Preis sowie Effizienz- und Luftschadstoffregulierungen** treiben die Thematik weiter voran. Mit wenigen positiven Ausnahmen steht dieser Entwicklung in Richtung Nachhaltigkeit die fehlende Nachfrage von Fluggesellschaften an einer emissionsfreien Bodenabfertigung entgegen. Gerade der Handlungsdruck seitens der Low-Cost-Carrier fehlt. Ankündigungen wie bspw. von Lufthansa (CO₂-freie Vorfeldmobilität in Deutschland bis 2030) werden von der Flughafenbranche bisher als wenig glaubwürdig bewertet, da sie für die Fluggesellschaften kaum mit eigenem Handlungsbedarf verbunden sind.

Die Elektrifizierung der Vorfeldmobilität ist ein starkes Instrument, mit dem die Flughafenbetreiber zeitnah Einsparungen realisieren können. Die Entwicklung könnte heute schon deutlich schneller vonstattengehen, wird aber teils gehemmt durch eine Debatte über **Technologieoffenheit** und die von manchen Akteuren eingeforderte Bevorzugung von Alternativtechnologien wie dem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb oder synthetischen Flüssigkraftstoffen gegenüber der Elektromobilität. Die öffentliche Debatte über Alternativen mit geringerem Technologiereifegrad verunsichert die Akteure und verhindert Festlegungen und zeitnahes Handeln. Eine faktenbasierte Bewertung der Technologieoptionen kann von den Akteuren nicht selbst geleistet werden und die öffentliche Diskussion liefert widersprüchliche Informationen.

Handlungsempfehlungen

Der Aufwind, den das Thema Nachhaltigkeit aktuell auch im Flughafenumfeld erfährt, muss in entschlossenes Handeln aller Akteure umgesetzt werden. Zentrale Elemente sollten sein: Die baldige

und ambitionierte Einführung eines **CO₂-Preises**, Zielwerte für **Kraftstoffverbrauch, Luftschadstoff- und CO₂-Ausstoß** auch für Nutz- und Sonderfahrzeuge sowie eine Erfolgskontrolle der **Selbstverpflichtung** der Flughafenbetreiber zur Reduzierung von CO₂. Regulatorische Bedingungen müssen dabei so novelliert werden, dass sie ein Einsparpotenzial erzielen können und dennoch in der Praxis umsetzbar bleiben. Eine **gleichwertige Berücksichtigung von Flughafenbetreiber-gesellschaften und Drittabfertigern** ist nötig, um auch in Wettbewerbssituationen hohe Umweltstandards in die Umsetzung zu bringen und um z. B. beim Ladeinfrastrukturaufbau Synergien zwischen den verschiedenen Akteuren zu generieren. Wenn es gelingt, gesetzliche Anforderungen nicht nur deutschlandweit, sondern in der gesamten **EU** umzusetzen, werden eventuelle Wettbewerbsnachteile und Verdrängungseffekte durch Umweltstandards vermieden und Skaleneffekte bei den Fahrzeugherstellern gefördert. Im ganzen Prozess gilt es, neben Flughafenbetreibern und Drittabfertigern auch immer die **Hersteller einzubeziehen** und Voraussetzungen auch an diese weiterzugeben.

Zielsetzung sollte es sein, das **Ziel der CO₂-Neutralität bis 2050** durch entschlossenes Handeln zu unterfüttern und nach Möglichkeit den Pfad zur Zielerreichung durch eine **Verkürzung der Frist** noch zu verschärfen. Eine vorzeitige Umstellung des Fuhrparks bis 2035 bzw. 2030 ist allerdings nur möglich, wenn die CO₂-Ziele und die weiteren erzielbaren Vorteile wie der Gesundheitsschutz der MitarbeiterInnen auf dem Vorfeld über eine **monetäre Perspektive** gestellt bzw. die Mehrkosten von anderen Marktteilnehmern (z. B. Airlines) mitgetragen werden, da die Umstellung einiger Sonderfahrzeugtypen in den nächsten Jahren noch mit hohen Aufpreisen verbunden sein wird.

Die technologische Transformation der Vorfeldmobilität kann weiterhin nur gelingen, wenn **alle Stakeholder abgeholt werden** können und sich einem gemeinsamen Ziel verschreiben. Vor allem die meist öffentlichen **Anteilseigner** müssen die Treiber einer nachhaltigen Entwicklung der Vorfeldmobilität werden. Durch konkrete **Vorgaben an die Flughafenbetriebe** können sie die Transformation positiv (wie auch negativ) beeinflussen. Die Erarbeitung **gemeinsamer technischer Standards aller Flughäfen** unterstützt die Hersteller von Fahrzeugen und Infrastruktur in der Entwicklung einer geeigneten Angebotspalette und führt zu Kostensenkungen durch Synergien. Es muss eine gemeinsame Roadmap erarbeitet werden, die Kommunikation und der **Erfahrungsaustausch** zwischen Abfertigern muss sichergestellt sein. Nur dann kann eine Zusammenarbeit sowohl zwischen verschiedenen Akteuren innerhalb der eigenen Flughafengrenzen und darüber hinaus gelingen. Flughafenbetreiber haben mit diesem gestärkten Rückhalt dann die Möglichkeit auch auf Airlines und Drittabfertiger (z. B. bei Lizenzvergaben) Anreize oder auch Verpflichtungen zu schaffen.

Technologieoffenheit ist bei der Förderung ein wichtiges Grundprinzip. Schwerpunktmäßig ist jedoch aus Umweltsicht der Pfad der Elektrifizierung weiterzuverfolgen: Die Elektromobilität ist unter den genannten technologischen Alternativen die Einzige, mit der **ab sofort relevante Klimaschutzpotenziale** erschlossen werden können, da praxistaugliche Fahrzeuge und Infrastrukturen verfügbar sind. In der Umweltbewertung bietet sie in den meisten Wirkkategorien, u. a. Treibhausgas- und Versauerungspotenzial, bereits mit dem Strommix 2020 einen Vorteil über den gesamten Lebensweg gegenüber der Dieselvariante. Der erhöhte Ressourceneinsatz, der für den E-Antrieb benötigt wird, kann durch den Umstieg von der teilweise noch verwendeten Blei-Säure- auf Lithium-Ionen-Technologie deutlich reduziert werden. Der **Ressourcenbedarf** ist bei E-Varianten dann zwar höher als beim Verbrenner, aber im Falle von Lithium-Ionen-Batterien nicht wesentlich. Die Elektromobilität verfügt im Vergleich mit konkurrierenden Technologien mit Abstand über die **höchste Effizienz** im Gesamtprozess und ist somit hinsichtlich des nötigen Ausbaus der Erneuerbaren Energieversorgung weit im Vorteil.

6.3.6. Ladeinfrastruktur, Strombereitstellung und Strombezug

Elektrifizierung bedeutet nicht nur für die Fahrzeugflotte, sondern mehr noch für die Energieversorgung eine umfassende Transformation. Ein breiterer Durchbruch der Vorfeld-Elektromobilität auf weiteren Flughäfen wird bisher auch durch Unsicherheiten hinsichtlich des Ladeinfrastrukturaufbaus behindert. Um den Prozess der Elektrifizierung jenseits der First Mover wie dem Flughafen Stuttgart zu verstetigen, muss zeitnah deutlich werden, welche **Ladeinfrastruktur-Standards** sich durchsetzen. Mehrheitlich befürworten die Vertreterinnen und Vertreter der Branche eine einheitliche Verwendung der Systeme Typ-2 und CCS, die sich im Bereich der durch große OEMs hergestellten Pkw und leichten Nutzfahrzeuge etabliert haben. Auch die oft kleineren und spezialisierteren Hersteller der Vorfeldfahrzeuge sollten diese übernehmen, auch wenn oft individuelle Hemmnisse bestehen, etwa die Parallelen der Fahrzeugtypen zu solchen aus dem Baubereich, in dem andere elektrotechnische Normen und Standards herrschen.

Weiterhin ist das grundsätzliche Ladekonzept in vielen Anwendungen noch unklar: Die Nutzer müssen grundsätzlich zwischen großer **Batteriekapazität** oder mehrfachen **Schnellladungen** im Tagesverlauf abwägen. Bei der Vorfeldmobilität spricht die Kostenbetrachtung dabei vermehrt für große Batterien, die vorwiegend nachts geladen werden. Vor allem bei Flughäfen mit einem 24-Stunden-Betrieb auf dem Vorfeld ist dieses Konzept jedoch nur eingeschränkt möglich und es kann aufgrund der tagsüber nötigen Schnellladevorgänge zu zusätzlichen Lastspitzen im Stromnetz kommen.

Weiterhin wird der Aufbau der Ladeinfrastruktur für Vorfeldflotten beispielsweise durch **Flächenrestriktionen bzw. -konkurrenzen** gehemmt.

Zuletzt sieht die Branche hinsichtlich der zukünftigen **Förderkulisse** für den Ladeinfrastrukturaufbau Unsicherheiten. Zudem mangelt es **Drittartfertigern**, die im Rahmen zeitlich beschränkter Konzessionen arbeiten, an einer langfristigen Planbarkeit, um Investitionen in Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge zu tätigen.

Die Ziele zum **Ausbau der regenerativen Stromproduktion** und von Speicherkapazität treiben die Elektrifizierung der Vorfeldflotten grundsätzlich voran. Dass die elektrischen Modelle und die Energieversorgungsinfrastruktur prinzipiell verfügbar sind, ist ein wichtiger Vorteil gegenüber möglichen konkurrierenden Technologien wie dem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb. Die Qualität des verwendeten Ökostroms steigt am Flughafen Stuttgart an: Es kommt in zunehmendem Umfang eigenerzeugter EE-Strom zum Einsatz. Das Modell der einfachen Herkunftsnachweise ist rückläufig.

Handlungsempfehlungen

Der Flughafen Stuttgart kann als Beispiel dienen, dass **vorausschauende Planung**, frühzeitige Festlegung auf die Ladeinfrastruktur und damit die **gesicherte Beanspruchung von Flächen** auf dem Vorfeld zu diesem Zweck wichtige Signale in Richtung Elektrifizierung darstellen können. So können auch Flächenrestriktionen proaktiv vermieden werden. Flughafenbetreibern ist zu empfehlen, zunächst eine Bedarfsanalyse für ihre Ladeinfrastruktur wie auch ihr Lademanagement durchzuführen. Daraufhin kann der proaktive Aufbau und die Bündelung von Ladeinfrastrukturen erfolgen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die zusätzliche Stromnachfrage durch elektrische Vorfeldfahrzeuge im Verhältnis zum Gesamtstrombedarf untergeordnet ist. Dennoch können **zusätzliche Lastspitzen** das Stromnetz lokal an seine Grenzen führen. Im Bereich des **intelligenten Lademanagements** liegen noch große, bisher nicht ausgeschöpfte Potenziale, die massive Ausweitung der Anwendung von E-Fahrzeugen zu ermöglichen und gleichzeitig die Kosten für Ladeinfrastrukturausbau und Strombezug zu begrenzen. Es schafft Flexibilität und lässt sich im geschlossenen System

Flughafen verhältnismäßig leicht etablieren. Der Ladestrombedarf der Vorfeldflotte kann in die Nacht verschoben und so die Lastspitzen klassischer Verbraucher (v. a. Gebäude) am Vormittag und Nachmittag flexibel gemieden werden. Innovationen sollten auch durch technische Vorschriften und Normen dergestalt unterstützt werden, dass z. B. bei der Auslegung elektrotechnischer Anlagen Gleichzeitigkeitsfaktoren geringer angesetzt werden können, wenn die Ladevorgänge zeitlich intelligent gemanagt werden.

Intelligentes Lademanagement beinhaltet aber nicht nur die mittels KT optimierte zeitliche Steuerung der Ladeleistung, sondern es beginnt schon bei der Hardware: So werden z. B. am Flughafen Zürich zentrale Stellplätze mit Ladestationen an verschiedenen Orten auf dem Vorfeld eingerichtet, die von verschiedenen Fahrzeuggruppen genutzt werden können. Perspektivisch können dort auch autonome Fahrzeuge zum Einsatz kommen, die die Ladestationen automatisiert zur Batterieladung anfahren.

Beim Bezug von Ökostrom sollte auf eine Maximierung der **Zusätzlichkeitswirkung** geachtet werden. Strombezug, der nur auf Herkunftsnachweise setzt, ist dagegen für eine Bilanzierung mit Null-Emissionen nicht angemessen.

7. Literaturverzeichnis

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Regulatory Assistance Project (RAP); Navigant (2019): Verteilnetzausbau für die Energiewende. Elektromobilität im Fokus. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Netzausbau_Elektromobilitaet/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_EV-Grid_WEB.pdf.

Airports Council International (ACI) (2019): FAQ: Airports and the NetZero2050 Commitment. Online verfügbar unter https://acieurope-my.sharepoint.com/personal/biljana_banjac_aci-europe_org/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fbiljana%5Fbanjac%5Faci%2FDeurope%5Forg%2FDocuments%2FFAQ%20Airports%20and%20the%20NetZero2050%20Commitment%5FJAN%202020%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fbiljana%5Fbanjac%5Faci%2FDeurope%5Forg%2FDocuments&originalPath=aHR0cHM6Ly9hY2lldXJvcGUtbX-kuc2hhcmVwb2ludC5jb20vOml6L2cvcGVyc29uYWwvYmlsamFuYV9iYW5qYWNfYWN-pLWV1cm9wZV9vcmcvRWRIVINqeVRXN0JHb1g4UHlwYU-ZaU3dCdkFTNXZndjZ1VTJMV2txWTQtZGZOZz9ydGltZT16cm9hc2ZnUTJFZw.

Airports Council International (ACI) (16.05.2019): European Airports Committing to Net zero Carbon Emissions by 2050. Online verfügbar unter <https://www.aci-europe.org/component/attachments/attachments.html?id=861&task=download>.

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) (17.07.2020): Unser Klima, unser Beitrag: Flughafenverband ADV stellt Maßnahmenpaket zum Ziel „Net Carbon Emissions by 2050“ vor. Online verfügbar unter <https://www.adv.aero/wp-content/uploads/2019/07/ADV-PM-16-2019-Unser-Klima-unser-Beitrag-Flughafenverband-ADV-stellt-Ma%C3%9Fnahmenpaket-vor.pdf>.

Flughafen Zürich (2019): Konzept E-Infrastruktur Flughafen Zürich. scale-up! Workshop, 19.11.2019.

Fraport (2020): Elektromobilität am Flughafen Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.fraport.com/de/newsroom/fraport-mediathek/infographiken.html>, zuletzt geprüft am 02.06.2020.

Munich Airport (2020): Elektrofahrzeuge am Flughafen. Ein CO₂-neutraler Fuhrpark. Online verfügbar unter <https://www.munich-airport.de/elektrofahrzeuge-am-flughafen-5897733>, zuletzt geprüft am 02.06.2020.

Royal Schiphol Group (2020): Optimum Mobility. Mobility and transport projects. Online verfügbar unter <https://www.schiphol.nl/en/schiphol-group/page/mobility-and-transport-projects/>, zuletzt geprüft am 02.06.2020.

Seebach, Dominik (2019): Sinnvolle Bezugsoptionen für Ökostrom für den Flughafen Stuttgart. Arbeitspapier im Rahmen des Vorhabens „Scale Up: Emissionsfreie Flughafenflotte Flughafen Stuttgart“. unveröffentlicht. Öko-Institut.

Siehler; Feil; Minder (2020): Masterplan Energieeinsparung 2050. unveröffentlicht. Flughafen Stuttgart.

Statista (2020): Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2013 bis 2022. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>, zuletzt geprüft am 02.06.2020.

Thielmann, Axel; Neef, Christoph; Hettesheimer, Tim; Döscher, Henning; Wietschel, Martin; Tübke, Jens (2017): Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Hg. v. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Fraunhofer-Institut für chemische Technologie (ICT). Karlsruhe.