

KLIMAFREUNDLICHE BODENSTROMVERSORGUNG VON LUFTFAHRZEUGEN

MARKTSTUDIE

Studie im Auftrag des
Bundesministeriums für Digitales und Verkehr

Herausgeberin: NOW GmbH

Autorin: Dornier Consulting International GmbH

IMPRESSUM

Im Auftrag des

Bundesministeriums für Digitales und Verkehr
Dienstsitz Bonn
Robert-Schuman-Platz 1
53175 Bonn

Herausgeberin

NOW GmbH
Fasanenstr. 5
10623 Berlin

Autorin

Dornier Consulting International GmbH
Eva Goebel, Tine Haas und Manuel Kilian
Charlottenstr. 18
10117 Berlin

Stand

19. Februar 2024

Copyright

Die Nutzungsrechte liegen, soweit nicht explizit genannt, beim Bundesministerium für Digitales und Verkehr, der NOW GmbH und der Dornier Consulting International GmbH.

DISCLAIMER

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr und der NOW GmbH von Mitarbeitenden der Dornier Consulting International GmbH erstellt.

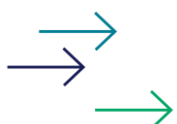
Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeitenden der Dornier Consulting International GmbH. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings geben weder die Dornier Consulting International GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeitenden irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses, oder versichert, dass deren Nutzung private Rechte nicht verletzen würden.

© Dornier, 01. März 2024

Sollten Sie Anmerkungen oder Fragen zu den Inhalten dieser Studie übermitteln wollen, so richten Sie diese bitte an das Team Klimafreundliche Luftfahrt der NOW GmbH unter luftfahrt@now-gmbh.de.

Inhaltsverzeichnis

EXECUTIVE SUMMARY	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	8
TABELLENVERZEICHNIS	9
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	10
1 EINLEITUNG	11
2 METHODIK.....	12
3 BODENSTROMANLAGEN.....	13
Produktkategorisierung und -eigenschaften	14
Statische Bodenstromanlagen	15
Batterie-GPUs	17
Herstellerübersicht.....	18
Vergleich von Batterie-GPUs und Diesel-GPUs.....	20
Vergleich der Umweltverträglichkeit	20
Vergleich der Effizienz	20
Vergleich der Kostenstruktur	21
Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung	22
Status quo an deutschen Flughäfen	23
Herausforderungen	23
Entscheidungskriterien beim Kauf	26
Ausblick	27
4 GROUND SUPPORT EQUIPMENT (GSE)	29
Technologieübersicht.....	30
Vor- und Nachteile batterieelektrischer und Brennstoffzellenantriebe	32
Status der Defossilisierung an deutschen Flughäfen	33
Übersicht über Förderprogramme.....	34
Empfehlungen für die Beschaffung von klimafreundlichem GSE.....	35
Ausblick	36
QUELLENVERZEICHNIS	39



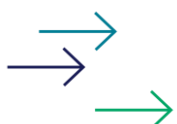
Executive Summary

Die Umstellung von konventionell mit fossilen Brennstoffen betriebenem Ground Support Equipment (GSE) auf klimafreundlichere Alternativen ist ein wichtiger Schritt zur **Defossilisierung des Flughafenbetriebs**. Insbesondere die Bodenstromversorgung von Flugzeugen bei der Abfertigung trägt im Bereich GSE wesentlich zum Ausstoß von Emissionen bei. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden **klimafreundliche Lösungen für die Bodenstromversorgung** hinsichtlich technischer Aspekte, Marktverfügbarkeit, Kostenstruktur und Herausforderungen bei der Umstellung analysiert. Darüber hinaus wird weiteres **klimafreundliches Ground Support Equipment** in Bezug auf Technologiestand und -entwicklungen betrachtet. Die Marktstudie basiert auf **Desktop-Recherche und Interviews** mit deutschen Verkehrsflughäfen und Herstellern von Bodenstromanlagen.

Bodenstromanlagen versorgen am Boden befindliche Luftfahrzeuge (sog. „stationäre Luftfahrzeuge“ laut EU) mit Strom. Im deutschen Sprachgebrauch wird in der Regel zwischen **statischen Bodenstromanlagen** und **Ground Power Units (GPUs)** unterschieden. Statische Bodenstromanlagen werden an das Flughafenstromnetz angeschlossen und wandeln den daraus bezogenen Strom in die für das Flugzeug benötigte Form um. Sie können entweder stationär oder mobil sein. GPUs sind mobile Einheiten die unabhängig vom Flughafenstromnetz verwendet werden können, da sie mit Diesel, elektrisch oder mittels Brennstoffzellentechnologie betrieben werden. Sie kommen an Positionen ohne Netzanschluss zum Einsatz oder zur Überbrückung von Ausfällen oder bei Wartungsarbeiten.

Es gibt eine Reihe von **Herstellern von klimafreundlichen Bodenstromsystemen**, die Produkte in unterschiedlichen Kategorien anbieten. Im Rahmen der Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung an deutschen Flughäfen sind vor allem batterieelektrische GPUs relevant, da diese dort zum Einsatz kommen, wo bisher Diesel-GPUs verwendet wurden. In Deutschland gibt es in diesem Bereich in der frühen Phase des Marktes derzeit zwei etablierte Hersteller, **ITW GSE** und **Dynell**. Der dänische Hersteller ITW GSE war der erste mit marktreifen Batterie-GPUs. Der österreichische Hersteller Dynell kann als „Early Adopter“ bezeichnet werden.

Im **Vergleich von Batterie- und Diesel-GPUs** ist der entscheidende Faktor die **deutlich höhere Klima- und Umweltverträglichkeit von Batterie-GPUs**. Während des Betriebs stoßen Batterie-GPUs keine Emissionen aus. Bei Verwendung von Grünstrom sind sie vollständig emissionsfrei. Ebenfalls profitieren Batterie-GPUs, verglichen mit Diesel-GPUs, von einem **höheren Wirkungsgrad**, da sie keine Energieverluste durch Wärme und mechanische Umwandlung haben. Schlüsselkomponente der Batterie-GPUs in Bezug auf Kapazität, Lebensdauer und Kosten ist die Batterie. In ihrem Einsatz sind **Batterie-GPUs durch die Batteriekapazität limitiert**. Aktuell auf dem Markt etablierte Batterie-GPUs sind für den Einsatz auf Vorfeldpositionen ohne Stromnetzanschluss konzipiert, an denen täglich eine hohe Zahl an Abfertigungen von Narrow-Body-Flugzeugen mit einer kurzen Turnaround-Zeit stattfindet. Für die energieintensivere Abfertigung von Wide-Body-Flugzeugen ist die Batteriekapazität Batterie-GPUs nicht ausgelegt. Diesel-GPUs sind dieser Limitierung nicht ausgesetzt. Für ihren Einsatz ist zudem kein Lademanagement erforderlich, da sie innerhalb des laufenden Betriebs auf dem Vorfeld betankt werden können. Eine weitere Begrenzung von Batterie-GPUs ist die **Lebensdauer der Batterie**. Das Lebensende der Batterie wird voraussichtlich nach etwa zehn Jahren erreicht sein. Die **Anschaffungskosten** für Batterie-GPUs sind deutlich höher als für Diesel-



GPUs. Jedoch haben Batterie-GPUs sehr **geringe Wartungskosten** und sind im Betrieb durch den **Verbrauch von Strom statt Diesel** ebenfalls deutlich günstiger. Betrachtet man einen Zeitraum von zehn Jahren, so liegt der Break-Even-Punkt, ab dem die Total Cost of Ownership (TCO) einer Batterie-GPU niedriger ist als die einer Diesel-GPU, nach Herstellerangaben zwischen ca. drei und sieben Jahren.

Der aktuelle Stand der **Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung** an deutschen Flughäfen ist individuell. Befragte deutsche Verkehrsflughäfen haben noch dieselebetriebene GPUs im Einsatz, sind aber um die Umstellung bemüht. **Herausforderungen** bei der Umstellung liegen in den Bereichen **Infrastruktur, Technologie, Betrieb und Kosten**. Insbesondere die begrenzte Netzkapazität und fehlende Ladepunkte stellen Flughäfen vor Schwierigkeiten. Hier ist eine langfristige Planung und ausreichend Budget erforderlich. Technisch sind Batterie-GPUs in erster Linie durch die Batteriekapazität limitiert. Hier können GPUs mit Brennstoffzellen potenziell einen Lösungsansatz bieten. Im Betrieb ist das für Batterie-GPUs notwendige Lademanagement herausfordernd. Personal muss für das neue Gerät und die durch den Ladevorgang veränderten Prozesse geschult werden. Telematik zur Überwachung, Erfassung und Übertragung von Daten zu Ladestand und Position der GPU kann das Lademanagement vereinfachen. Finanzielle Hürden entstehen für Flughäfen bei dem Ausbau der notwendigen Infrastruktur und der Anschaffung von neuen Bodenstromsystemen. Hier können Zuwendungen im Rahmen von Förderprogrammen Unterstützung bieten.

Flughäfen sind als Sektorenauftraggeber ab einem Auftragswert von 443.000 Euro zur europaweiten Ausschreibung von Liefer- und Dienstleistungsaufträgen verpflichtet. Diese Grenze ist bei der Anschaffung einiger Batterie-GPUs erreicht. **Entscheidungskriterium** beim Kauf ist in der Regel hauptsächlich der **Preis**. Zu berücksichtigen sind hierbei neben den Anschaffungskosten die Gesamtbetriebskosten und potenzielle Förderungen. **Technisch** relevant ist primär die Batteriekapazität. Ebenfalls wichtig sind durch Hersteller angebotene **Serviceleistungen**, wie beispielsweise Dokumentation und Kommunikation in deutscher Sprache sowie Schulungsangebote. Flughäfen tendieren insgesamt dazu, Hersteller zu wählen, mit deren Produkten sie bereits positive **Erfahrungen** gesammelt haben.

Die **zukünftige Entwicklung** im Bereich klimafreundliche Bodenstromversorgung wird sowohl durch **Regularien** als auch durch **technologische Fortschritte** beeinflusst. Die durch den Europäischen Rat verabschiedete Verordnung über den **Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR)** verpflichtet die Mitgliedstaaten dafür zu sorgen, dass zukünftig auf allen Flughäfen des TEN-V-Kernnetzes und TEN-V-Gesamtnetzes die Stromversorgung stationärer Luftfahrzeuge sichergestellt ist. Ab dem 1. Januar 2030 muss diese Bodenstromversorgung entweder durch Strom aus dem Netz oder durch lokal erzeugten Strom ohne Verwendung fossiler Brennstoffe erfolgen. Im Rahmen der **Richtlinie über Zuwendungen zur Förderung alternativer Technologien für die klima- und umweltfreundliche Versorgung von Luftfahrzeugen mit Bodenstrom an Flughäfen (Bodenstrom-Richtlinie)** des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) werden Anreize für eine frühzeitige Umstellung geschaffen. Technologisch sind Batterie-GPUs bereits auf einem marktreifen Stand. Denkbar sind zukünftig Entwicklungen in der Zellchemie zur Verbesserung der Kapazität. Potenzial liegt ebenfalls in der Entwicklung von Wasserstoff-GPUs, welche auf Basis von Brennstoffzellentechnologie betrieben werden. Hier gibt es bereits erste Pilotprojekte.



Auch hinsichtlich weiteren Produktkategorien beim **Ground Support Equipment (GSE)** wird eine Defossilisierung angestrebt. Bei den derzeit am Markt etablierten klimafreundlichen Alternativen handelt es sich **hauptsächlich um batterieelektrische Geräte**. Herausfordernd in diesem Zusammenhang ist ebenfalls die **Limitierung hinsichtlich der Batteriekapazität**. Für viele weniger energieintensive Geräte, wie beispielsweise Gepäckschlepper, Fluggasttreppen und kleinere Flugzeugschlepper, gibt es bereits etablierte batterieelektrische Lösungen. Für energieintensive Fahrzeuge, wie Enteisungs- oder Feuerwehrfahrzeuge, gibt es hybridelektrische Alternativen. Potenziell kann auch hier die **Brennstoffzellentechnologie eine Ergänzungsmöglichkeit** bieten.

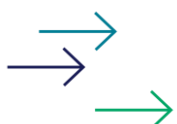
Der **Stand der Defossilisierung der GSE-Flotten an deutschen Flughäfen** variiert. Oftmals beruhen Angaben der Flughäfen zum Status Quo auf Schätzwerten. Der Flughafen, der mit der Umstellung am weitesten fortgeschritten ist, hat etwa die Hälfte seiner Flotte defossilisiert, gemessen an der eingesparten Menge Diesel.

Ein potenziell relevantes **Förderprogramm** im Kontext der Umstellung auf klimafreundliches GSE ist das Programm „**Elektro-Mobil**“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Im Rahmen dieses Programms wurden bereits die Projekte „Scale-up! – emissionsfreie Flughafenflotte“ des Flughafens Stuttgart und „Ladeinfrastruktur als bidirektionales Flottenkraftwerk“ des Flughafens Frankfurt gefördert.

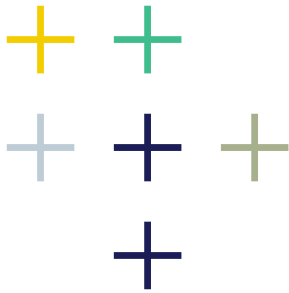
Bei der Beschaffung von neuem klimafreundlichen Ground Support Equipment ist grundsätzlich eine sorgfältige **Kosten-Nutzen-Analyse** empfehlenswert, um die Wirtschaftlichkeit und die potenziellen Emissionseinsparungen angemessen zu bewerten. Die **Zukunftsfähigkeit neuer Technologien** ist zu berücksichtigen. Technologien müssen in der Lage sein, sich ändernden Anforderungen, Trends und Herausforderungen nachhaltig zu stellen. Die Wahl von etablierten Produkten und Herstellern minimiert das Risiko, dass beispielsweise Ersatzteile und Services zukünftig vom Markt verschwinden. Interessant im Sinne der Nachhaltigkeit sind Angebote von Herstellern für die Batterie an ihrem Lebensende durch **Second-Life-Optionen oder Recyclingprogramme**. Wichtig für die Flughäfen ist ebenfalls die durch den Hersteller angebotene **Servicequalität**.

Die **Zukunft des Ground Support Equipments** wird maßgeblich von **technologischen Fortschritten** bestimmt, insbesondere von der Weiterentwicklung von Batterie- und Brennstoffzellensystemen. Die Haltung von Flughäfen gegenüber **Brennstoffzellentechnologie** als zukunftsfähigen Antrieb von GSE variiert. Einige Flughäfen sehen eine Chance für den Einsatz bei energieintensiven Geräten und zur Bewältigung der Herausforderung des Lademanagements für batterieelektrisches GSE. Andere Flughäfen sehen bisher keinen Anwendungsfall für Wasserstoffgeräte, unter anderem deswegen, weil an diesen Flughäfen nachts kein Flugverkehr stattfinden und Geräte problemlos über Nacht geladen werden können. Aktuell gibt es einige Entwicklungen und Pilotprojekte, bei denen Brennstoffzellen als Antrieb von GSE zum Einsatz kommen. Herausfordernd ist die ausreichende Verfügbarkeit der für klimafreundliches GSE benötigten Infrastruktur, unabhängig von der gewählten Technologie.

Insgesamt befindet sich die **Defossilisierung von Ground Support Equipment einschließlich der Bodenstromversorgung in Deutschland in der Umsetzung**. Flughäfen sind bemüht ihr Emissionen zu reduzieren und batterieelektrische Alternativen bieten derzeit eine marktreife Lösung für viele

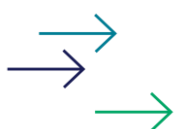


Anwendungsfälle. Die Brennstoffzellentechnologie befindet sich als eine potenzielle Alternative für energieintensive Geräte in der Entwicklung, während Regularien und Förderprogramme die Umstellung weiter vorantreiben.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel einer bodenmontierten Bodenstromanlage, ITW GSE 2400 Compact GPU (Bildquelle: ITW, 2024).....	15
Abbildung 2: Beispiel einer brückenmontierter Bodenstromanlage (90 kVA Statischer Umformer und Kabelrolle in einem gemeinsamen Gehäuse), ITW GSE - 2400 Power Coil (Bildquelle: ITW GSE, 2024)	15
Abbildung 3: Beispiel eines Hatch Pits, Dynell – DPH 090 (Bildquelle: Dynell, 2024)	16
Abbildung 4: Beispiel eines Pop-Up Pits, Dynell – DPP 090 (Bildquelle: Dynell, 2024)	16
Abbildung 5: Beispiel einer statisch mobile Bodenstromanlage, händisch bewegt, Dynell - DSM 090 (Bildquelle: Dynell, 2023)	16
Abbildung 6: Beispiel einer statisch mobile Bodenstromanlage, anhängermontiert, ITW GSE 1400 solid-state 28 VDC GPU (Bildquelle: : ITW GSE, 2024.).....	16
Abbildung 7: Beispiel einer batterieelektrischen GPU, Dynell DEM 090 (Bildquelle Dynell, 2024)....	18
Abbildung 8: Beispiel einer batterieelektrischen GPU, ITW GSE 7400 eGPU, (Bildquelle: ITW GSE, 2024).....	18
Abbildung 9: Ground Support Equipment (GSE), eigene Darstellung basierend auf Boeing (2008) .	29



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktkategorien klimafreundliche Bodenstromanlagen	14
Tabelle 2: Übersicht Hersteller von Bodenstromanlagen.....	19
Tabelle 3: Herausforderungen und Lösungsansätze bei Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung	24
Tabelle 4: Entscheidungskriterien für den Kauf von klimafreundlichen Bodenstromanlagen	26
Tabelle 5: Entwicklungsstand elektrischer und Brennstoffzellenantrieb nach GSE-Kategorie	31
Tabelle 6: Vor- und Nachteile von elektrischem und Brennstoffzellenantrieb im Vergleich zum Antrieb mit fossilen Kraftstoffen.....	32
Tabelle 7: Potenzielle Förderprogramme für Ground Support Equipment (GSE)	34



Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation (Verordnung über den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe)
APU	Auxiliary Power Unit (Hilfstriebwerk)
ASU	Air Starter Unit (Bodenstartgerät)
BAV	Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BVD	Bodenverkehrsdienste
DACH	Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
eGPU	Electric Ground Power Unit (Batterie-GPU)
GPU	Ground Power Unit (Bodenstromanlage)
GSE	Ground Support Equipment (Luftfahrtbodengerät)
IoT	Internet of Things
KsNI	Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur des BMDV
KTF	Klima- und Transformationsfonds
LFP	Lithium-Ferrophosphat, auch Lithium-Eisenphosphat oder LiFePO ₄
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
MWIKE NRW	Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCA	Pre-Conditioned Air System
TCO	Total Cost of Ownership
TEN-V	Trans-European Networks - Verkehr (Transeuropäisches Verkehrsnetzwerk)

1 Einleitung

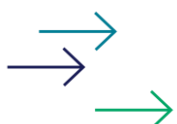
Die **Defossilisierung des Flughafensbetriebs** ist ein wichtiger Schritt zur Erreichung internationaler, europäischer und nationaler Klimaschutzziele. Allerdings ist die Umstellung auf Lösungen mit alternativen Antrieben in den meisten Fällen noch mit höheren Kosten und zusätzlichen Aufwänden bei den Akteuren verbunden. Um eine möglichst zeitnahe Transformation der Flughäfen anzureizen, wurden und werden Förderrichtlinien des Bundes mit verschiedenen Schwerpunkten konzipiert und realisiert.

Ein wesentliches Element bildet hierbei der **Ersatz von konventionellen, also mit fossilen Brennstoffen betriebenen, Geräten** zur Abfertigung von Flugzeugen an Flughäfen durch klimafreundliche Geräte. Diese als **Ground Support Equipment (GSE)** bezeichneten Geräte stellen einen wesentlichen Verursacher der flughafeninduzierten Treibhausgas-, Schadstoff- und Schallemissionen auf der Luftseite dar. Akteure wie Flugplatzbetreiber, Bodenverkehrsdienste und Fluggesellschaften werden darum unter anderem mit Klimaschutzvorgaben und Förderung zur Beschaffung klimafreundlicher Alternativen angeregt.

In der vorliegenden Marktstudie liegt der Schwerpunkt darauf, sowohl die technischen Besonderheiten als auch die Marktverfügbarkeit sowie typische Kostenaspekte einschließlich der Infrastruktur im Hinblick auf eine klimafreundliche Bodenstromversorgung detailliert zu analysieren und anschaulich darzustellen. Zu den klimafreundlichen Bodenstromanlagen werden batterieelektrische oder mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebene Ground Power Units (GPUs) sowie direkt mit dem Flughafenstromnetz verbundene, statische Bodenstromanlagen gezählt. Auch Wasserstoff in der Direktverbrennung würde Emissionsvorteile gegenüber dieselbetriebenen Systemen bieten.

Darüber hinaus werden weitere Produktkategorien des GSEs zusammenfassend im Hinblick auf den Stand der Technik, den Status der Defossilisierung an deutschen Flughäfen und die potenziellen zukünftigen Entwicklungen untersucht. Beispielhaft sind Hersteller und Einsatzorte genannt. Zusätzlich sind für GSE relevante Förderprogramme dargestellt.

Ziel dieser Marktstudie ist es, eine **umfassende Technologie- und Produktübersicht** für die **umwelt- und klimafreundliche Bodenstromversorgung** von Flugzeugen an Flughäfen zu liefern. Die Studie soll dazu dienen, Lösungen verschiedener Anbieter für eine klimafreundliche Bodenabfertigung an Flughäfen aufzuzeigen und Entscheidungsträger mit wesentlichen wirtschaftlichen und technischen Informationen zu versorgen.



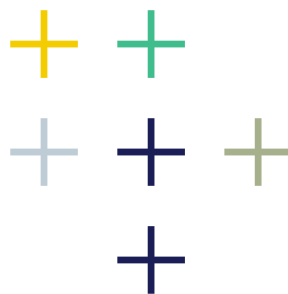
2 Methodik

Die vorliegende Marktstudie basiert auf einer Desktop-Recherche und Interviews mit Herstellern von Bodenstromsystemen und deutschen Flughäfen.

Im Rahmen der **Desktop-Recherche** wurden Herstellerangaben herangezogen, um eine Grundlage und eine erste Marktübersicht zu Bodenstromanlagen zu erhalten. Der in Anhang 1 dargestellten Produktübersicht zu Bodenstromsystemen liegen recherchierte Produktangaben der Hersteller zugrunde. Darüber hinaus wurden verschiedene Quellen wie Pressemitteilungen, Unternehmenswebseiten, Forschungsberichte und offizielle Bekanntmachungen von Regierungs- und Industrieorganisationen herangezogen.

Um praxisnahe Erkenntnisse zu gewinnen, wurden **Interviews mit sieben deutschen Verkehrsflughäfen** durchgeführt. Die Gespräche konzentrierten sich auf den aktuellen Stand der Defossilisierung von Bodenstromanlagen und weiterem GSE, geplante Maßnahmen zur Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung sowie einhergehende Herausforderungen. Dies ermöglichte Einblicke in die Bedürfnisse und Perspektiven der Flughafenbetreiber.

Es wurden Gespräche mit Herstellern von Bodenstromsystemen geführt mit dem Ziel, die Marktsituation in Deutschland besser zu verstehen, Informationen zu technischen Aspekten und Herausforderungen der verschiedenen Systeme zu erhalten sowie Entscheidungskriterien von Kaufinteressierten zu identifizieren. Weiterhin wurde auf Vor- und Nachteile von Batterie-GPUs gegenüber Diesel-GPUs eingegangen sowie Einschätzungen zur Entwicklung von Brennstoffzellentechnologien erfragt.



3 Bodenstromanlagen

Bodenstromanlagen versorgen am Boden befindliche Flugzeuge mit Strom, um verschiedene bordeigene Systeme wie beispielsweise Beleuchtung, Avionik und Bordküche zu betreiben. In dieser Studie wird zur besseren Unterscheidung und gemäß dem deutschen Sprachgebrauch zwischen **statischen Bodenstromanlagen und GPUs** unterschieden. Als statische Bodenstromanlagen werden stationäre und mobile Systeme bezeichnet, die ausschließlich zur Umwandlung genutzt werden. Sie werden an das Stromnetz des Flughafens angeschlossen, wandeln den daraus bezogenen Strom um und stellen diesen dem Luftfahrzeug mit entsprechend benötigter Spannung und Frequenz zur Verfügung. Als GPUs werden mobile Systeme bezeichnet, die unabhängig vom Flughafenstromnetz verwendet werden können, da sie durch Diesel, batterieelektrisch oder mittels Brennstoffzellentechnologie betrieben werden. Ausgeschlossen werden technologische Lösungen, bei denen Wasserstoff als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor verwendet wird. Dies ist zwar umweltfreundlicher als fossiler Brennstoff, aber im Betrieb nicht emissionsfrei. Batterieelektrische GPUs werden als Batterie-GPUs oder eGPUs bezeichnet. GPUs die durch Brennstoffzellentechnologie, also mit Wasserstoff, angetrieben werden, werden als Wasserstoff-GPUs, hGPUs oder auch H₂-GPUs bezeichnet. Begrifflichkeiten können in anderen Quellen abweichen. Im Englischen ist die Bezeichnung Ground Power Units ein Überbegriff für alle Bodenstromanlagen. Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Produkttypen ist im nachfolgenden Kapitel gegeben.

Die Stromversorgung, Klimatisierung der Kabinenluft und das Starten der Triebwerke von stationären Luftfahrzeugen kann autark von der **bordeigenen Hilfsgasturbine (Auxiliary Power Unit, APU)** übernommen werden. Eine mit Kerosin betriebene APU hat einen Wirkungsgrad etwa zwischen 8 und 14 Prozent¹ und emittiert nicht nur Treibhausgase und Luftschadstoffe, sondern stellt zudem eine große Lärmquelle dar. Ebenfalls nachteilig ist der Verschleiß der APU und damit des Luftfahrzeugs. Die Funktionen der APU können am Boden durch flughafenseitige Infrastruktur übernommen werden, um so die Umwelt- und Klimaauswirkungen des Luftverkehrs am Boden zu reduzieren. Externe dieselbetriebene Anlagen tragen zwar nicht zum Verschleiß des Flugzeugs bei, stoßen jedoch auch schädliche Emissionen aus. Rein elektrisch oder mit Wasserstoff betriebene Bodenstromsysteme haben darüber hinaus den Vorteil, dass sie lokal keinen fossilen Kraftstoff verbrauchen und daher am Nutzungsort keine Abgase emittieren. Für die Klimatisierung und Aufbereitung der Kabinenluft ist ein **Pre-Conditioned Air System (PCA)** notwendig. Für das Starten der Triebwerke kann eine Air Starter Unit (ASU) am Boden verwendet werden. Die Stromversorgung der elektrischen Systeme der stationären Flugzeuge wird mittels der in dieser Marktstudie vorgestellten Bodenstromanlagen übernommen.

Nur wenn alle Funktionen der APU durch die Flughafeninfrastruktur abgedeckt werden, kann auf den Betrieb der APU am Gate verzichtet werden.

¹ AGES at Zurich Airport, 2018

Produktkategorisierung und -eigenschaften

Basierend auf der Installationsform der verschiedenen Bodenstromsysteme werden diese in Tabelle 1 dargestellten **Produktkategorien** unterteilt.

Produktkategorie		Eigenschaften	
1	statische Bodenstromanlagen	stationär	<ul style="list-style-type: none"> · Stationär entweder vertikal oder horizontal montiert · Anwendung auf dem Vorfeld oder im Hangar
2			<ul style="list-style-type: none"> · Anwendung auf dem Vorfeld (Flugsteigposition), montiert an der Fluggastbrücke
3			<ul style="list-style-type: none"> · Installation direkt an der Position im Boden als Hatch Pit oder Pop-Up Pit · Ein-/ausfahrbar
4	statische Bodenstromanlagen	mobil	<ul style="list-style-type: none"> · Anwendung primär im Hangar, ggf. auf dem Vorfeld (für dauerhafte Nutzung auf dem Vorfeld nicht geeignet) · Händisch bewegt oder ggf. mittels elektrisch betriebenen Fahrgestells
5			<ul style="list-style-type: none"> · Anwendung auf dem Vorfeld oder im Hangar · Bewegt mit Schlepper oder ggf. elektrisch betriebenem Fahrgestell
6	GPU		<ul style="list-style-type: none"> · Anwendung auf dem Vorfeld oder im Hangar · Bewegt mit Schlepper oder ggf. elektrisch betriebenem Fahrgestell · Unabhängig von Stromnetz des Flughafens

Tabelle 1: Produktkategorien klimafreundliche Bodenstromanlagen

Grundsätzlich gibt es Bodenstromgeräte in den aufgezeigten Kategorien mit **zwei verschiedenen Ausgangstypen**. Der erste Ausgangstyp liefert Wechselstrom (AC) mit einer Nennspannung von 115 Volt bei 400 Hz für reguläre Zivilluftfahrzeuge. Dies ist der überwiegende Standard zur Bereitstellung von Bodenstrom für Flugzeuge an Flughäfen in der Zivilluftfahrt. Diese Bodenstromgeräte werden oftmals als 400-Hz-Anlagen bezeichnet. Der zweite Ausgangstyp stellt 28 V Gleichstrom (DC) für kleinere Luftfahrzeuge wie Geschäfts- und Privatjets, Turboprop-Flugzeuge und Helikopter zur Verfügung. Bodenstromgeräte liefern entweder ausschließlich 400 Hz Wechselstrom (AC), ausschließlich 28 Volt Gleichstrom (DC) oder bieten eine Kombination aus beiden Varianten an. Oftmals wird für 400-Hz-Anlagen ein Ausgang mit 28 V DC als Zusatzoption angeboten. Für Ausgänge mit 400 Hz wird die Nennleistung in Kilovoltampere (kVA) angegeben. Für Ausgänge mit 28 V DC wird der



nominale Ausgangsstrom in Ampere (A) angegeben. Multipliziert mit der zur Verfügung gestellten Spannung von 28 V ergibt sich daraus ebenfalls die Leistung in (Kilo-)Voltampere.

Im weiteren Verlauf werden die unterschiedlichen Kategorien von Bodenstromsystemen mit technischen Spezifikationen, Funktionsweise und Anwendungsbereich genauer vorgestellt. Eine umfangreiche, tabellarische Übersicht über am Markt verfügbare Produkte mit Angaben zu Herstellern und technischen Eckdaten findet sich in Anhang 1.

Statische Bodenstromanlagen

Statische Bodenstromanlagen finden Anwendung, wenn an der zu bedienenden Position **ein Anschluss an das Flughafenstromnetz** verfügbar ist. Sie dienen als Umwandler des aus dem Flughafenetz bezogenen Stroms, um diesen dem Luftfahrzeug in benötigter Form, also mit 400 Hz oder 28 V DC, zur Verfügung zu stellen. Sie existieren in **stationärer oder mobiler** Form. Die Installation von stationären Anlagen ist vor allem dann sinnvoll, wenn an der Position eine hohe Zahl täglicher Abfertigungen stattfindet. Mobile Anlagen sind flexibler und finden vor allem auf dem Vorfeld sowie im Hangar Anwendung.

Boden- und brückenmontierte statische Bodenstromanlagen werden üblicherweise mit einem Ausgang mit 400 Hz angeboten und bieten meist die Zusatzoption eines Ausgangs mit 28 V DC. Sie sind je nach Hersteller und Modell mit einer Leistung zwischen 20 und 180 kVA verfügbar. Bodenmontierte Anlagen gibt es ebenfalls mit ausschließlich 28 V DC. Der nominale Ausgangsstrom liegt bei diesen Geräten bei 300 bis 800 A. Brückenmontierte Anlagen sind an Flugsteigpositionen an der Fluggastbrücke montiert. Bodenmontierte Anlagen finden ebenfalls an Flugsteigpositionen Anwendung und werden dort unter der Fluggastbrücke montiert. Auch auf Vorfeldpositionen oder im Hangar können bodenmontierte Anlagen aufgestellt werden. Beispiele für boden- und brückenmontierte Anlagen sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 ersichtlich.

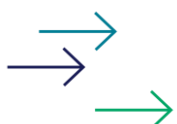


Abbildung 1: Beispiel einer bodenmontierten Bodenstromanlage, ITW GSE 2400 Compact GPU (Bildquelle: ITW, 2024)



Abbildung 2: Beispiel einer brückenmontierter Bodenstromanlage (90 kVA Statischer Umformer und Kabelrolle in einem gemeinsamen Gehäuse), ITW GSE - 2400 Power Coil (Bildquelle: ITW GSE, 2024)

Eine weitere Form von stationären statischen Bodenstromanlagen sind **Unterflurinstallationen**. Sie existieren in Form von Hatch Pits oder Pop-Up Pits (Beispiele siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Sie bieten in der Regel Ausgänge mit 400 Hz oder eine Kombination aus 400 Hz und 28 V DC. Die erhältliche Leistung variiert zwischen 90 und 360 kVA. Unterflurinstallationen sind fest in die



Infrastruktur integriert. Eine Nachrüstung mit Unterflursystemen ist aufwendig und kostenintensiv. Daher werden sie vorrangig beim Neubau oder bei der Sanierung des Vorfeldes in Betracht gezogen.



Abbildung 3: Beispiel eines Hatch Pits, Dynell – DPH 090 (Bildquelle: Dynell, 2024)



Abbildung 4: Beispiel eines Pop-Up Pits, Dynell – DPP 090 (Bildquelle: Dynell, 2024)

Statisch mobile Bodenstromanlagen gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen. Eine Variante wird händisch bewegt oder hat gegebenenfalls ein elektrisch betriebenes Fahrgestell. Diese Geräte sind primär für die Nutzung im Hangar ausgelegt. Sie können ebenfalls auf dem Vorfeld genutzt werden, sind dafür aber, vor allem aufgrund der Reifen, nicht dauerhaft geeignet. Sie sind verfügbar mit 400 Hz AC, 28 V DC oder einer Kombination aus beiden Ausgängen. Die Nennleistung für die 400-Hz-Anlagen liegt bei 20 bis 90 kVA. Eine weitere Variante von statisch mobilen Bodenstromanlagen ist anhängermontiert. Diese Geräte haben eine Deichsel und werden mittels eines Gepäckschleppers bewegt. Sie sind ebenfalls in allen Anschlusskategorien verfügbar. Die Leistung verfügbarer Geräte liegt bei 20 bis 180 kVA. Die Anlagen können auf dem Vorfeld und im Hangar verwendet werden.



Abbildung 5: Beispiel einer statisch mobile Bodenstromanlage, händisch bewegt, Dynell - DSM 090 (Bildquelle: Dynell, 2023)



Abbildung 6: Beispiel einer statisch mobile Bodenstromanlage, anhängermontiert, ITW GSE 1400 solid-state 28 VDC GPU (Bildquelle: ITW GSE, 2024.)



Batterie-GPUs

Batterie-GPUs oder eGPUs sind im Vergleich zu statischen Bodenstromanlagen eine neuere Technologie. Die ersten marktreifen Batterie-GPUs wurden im Jahr 2018 in Betrieb genommen. Sie können **unabhängig vom Flughafenstromnetz** eingesetzt werden und sind daher für die Verwendung auf Positionen ohne Stromnetzanschluss geeignet.

Batterie-GPUs sind vorrangig konzipiert für den Einsatz auf Vorfeldpositionen ohne Stromnetzanschluss, an denen täglich eine hohe Zahl von **Abfertigungen von Narrow-Body-Flugzeugen²** mit einer kurzen Turnaround-Zeit stattfinden. Dafür werden in der Regel Batterie-GPUs mit 400 Hz und einer Leistung von 90 kVA eingesetzt. Die Batteriekapazität für Geräte mit dieser Leistung liegt je nach Hersteller und gewählter Ausstattungsoption bei 120 bis 240 kWh. Die meisten am Markt erhältlichen Geräte bieten die zusätzliche Option eines Ausgangs mit 28 V. Es gibt eine Batterie-GPU am Markt, die ausschließlich 28 V bietet. Die Ladezeit für eine Batterie-GPU mit einer Kapazität von rund 160 kWh liegt an einem 125-Ampere-Ladepunkt bei rund 3 bis 4 Stunden, abhängig vom Ladestatus.

Grundsätzlich bieten einige Hersteller ebenfalls Batterie-GPUs mit einer Leistung von 180 kVA und einer Kapazität von über 300 kWh an, die für die **Abfertigung von Wide-Body-Flugzeugen³** in Frage kommen. Jedoch stoßen diese Geräte, aufgrund des hohen Energiebedarfs und der längeren Bodenzeit bei der Abfertigung von größeren Luftfahrzeugen an die Grenzen ihrer Batteriekapazität. Das bedeutet, dass die Ladung gegebenenfalls nicht für einen Turnaround-Prozess ausreicht oder die GPU nach einer Abfertigung bereits wieder geladen werden muss. Ein weiterer Faktor, der gegen den Einsatz von Batterie-GPUs mit 180 kVA spricht, sind die deutliche höheren Kosten (siehe hierzu auch Kapitel 0). Ebenfalls sind Geräte mit 180 kVA und einer entsprechend hohen Batteriekapazität deutlich schwerer als Geräte mit 90 kVA, da das Gewicht der Batterie annähernd proportional zur Kapazität steigt. Genaue Angaben hinsichtlich Gewichts und Abmessungen verschiedener Geräte finden sich in Anhang 1.

Eine Möglichkeit zum **Ausgleich von Kapazitätsengpässen** besteht darin, eine zweite Batterie-GPU an die im Betrieb befindliche Batterie-GPU als eine Art „Powerbank“ anzuschließen. Dies ist eher als Notfalllösung, denn als Option für den regulären Betrieb, zu betrachten. Gründe hierfür sind, wie für den Einsatz eines 180-kVA-Geräts, die dennoch insgesamt begrenzte Kapazität und die hohen Anschaffungskosten für die Geräte.

In Batterie-GPUs werden **Lithiumbatterien** eingesetzt. Dabei werden je nach Hersteller unterschiedliche Technologien verwendet, entweder Nickel-Mangan-Cobalt-Batterien (NMC-Batterien) oder Lithium-Ferrophosphat-Batterien (LFP- oder LiFePO₄-Batterien). LFP-Batterien sind aufgrund der im Vergleich niedrigeren Kosten und umweltfreundlicheren Rohstoffe sowie ihrer Langlebigkeit und besseren Sicherheit bei hohen Temperaturen attraktiv. Sie sind jedoch empfindlicher gegenüber Kälte und haben eine geringere Energiedichte, was zu einer geringeren Laufzeit führt. NMC-Batterien hingegen haben eine höhere Energiedichte und schnellere Ladefähigkeit bei kalten

² Verkehrsflugzeug mit einem Kabinengang und bis zu 6 Sitzen pro Reihe (Economy-Class), beispielsweise A320-Family und Boeing 737

³ Verkehrsflugzeug mit zwei Kabinengängen und einem Rumpfdurchmesser von min. 5 Metern, beispielsweise A340, A350, A380 und Boeing 747, Boeing 777, Boeing 787

Temperaturen. Diese Vorteile gehen jedoch mit höheren Herstellungskosten und einer kürzeren Lebensdauer einher. Sie bergen zudem ein erhöhtes Risiko von thermischen Vorfällen und sind daher weniger geeignet für den Einsatz in Regionen mit heißem Klima.

Die am deutschen Markt derzeit führenden Hersteller von Batterie-GPUs sind ITW GSE und Dynell (siehe nachfolgendes Kapitel 0). ITW GSE verwendet Batterien des japanischen Autoherstellers Nissan aus dem Elektrofahrzeugmodell LEAF. Dynell setzt Batterien des schwedischen Herstellers Northvolt ein, welcher mit eigener Gewinnung von Rohstoffen und eigener Serienproduktion wirbt. Beide Batteriehersteller bieten am Markt etablierte Produkte an, welche über hohe Sicherheitsstandards und Zertifizierungen verfügen.



Abbildung 8: Beispiel einer batterieelektrischen GPU, ITW GSE 7400 eGPU, (Bildquelle: ITW GSE, 2024)

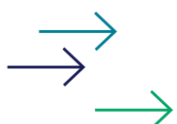


Abbildung 7: Beispiel einer batterieelektrischen GPU, Dynell DEM 090 (Bildquelle Dynell, 2024)

Eine genaue Aussage zur Lebenserwartung der Batterie kann nicht getroffen werden. Diese ist unter anderem abhängig von Einsatzzeit, Ladezyklen, Außentemperaturen und Entladungstiefe. Es ist zu erwarten, dass die eingesetzten Batterien nach etwa zehn Jahren bei einer Restkapazität von 70 bis 80 Prozent liegen und damit ihr Lebensende erreicht haben. Dann können die Batterie ausgetauscht und die Geräte weiterverwendet werden. Es ist derzeit noch unklar, ob der Austausch der Batterien bei heutigen Geräten bereits sinnvoll ist. Ebenfalls denkbar ist, dass der Kauf neuer Batterie-GPUs mit einer weiterentwickelten Technologie zu bevorzugen ist. Gemäß dem deutschen Batteriegesetz sind Hersteller zur Zurücknahme und **umweltgerechten Entsorgung** oder zum **Recycling** von Altbatterien verpflichtet. ITW GSE beispielsweise setzt Batterien nach dem Ende ihres ursprünglichen Einsatzes in der Notstromversorgung ein. Der Batteriehersteller Northvolt, dessen Batterien der Hersteller Dynell verwendet, recycelt Batterien in einem eigenen Werk.

Herstellerübersicht

In Tabelle 2 ist eine **Liste von Herstellern von Bodenstromsystemen** dargestellt, einschließlich einer Übersicht, in welcher Produktkategorie diese Bodenstromsysteme anbieten. Der Fokus liegt hierbei auf europäischen Herstellern.

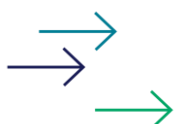


	Hersteller	Hauptsitz	Sitz in DACH-Region	Produktkategorien					
				bodenmontiert	brückenmontiert	Unterflurinstallation	statisch mobil (händisch bewegt)	statisch mobil (anhänger montiert)	Batterie-GPU
1	AeroSpecialities	USA					x	x	
2	Dabico	USA	Deutschland	x	x	x	x	x	x
3	Dynell	Österreich	Österreich	x	x	x	x	x	x
4	Effeti	Italien		x					x
5	Estel	Estland		x	x	x		x	
6	ElectroAir	Estland		x	x	x		x	x
7	Guinault	Frankreich						x	x
8	ITW GSE	Dänemark	Deutschland	x	x			x	x
9	JBT AeroTech	USA			x			x	
10	Sinepower	Portugal		x			x	x	
11	TK Airport Solutions	Spanien		x	x				
12	TLD GROUP	Frankreich							x
13	Unitron	USA		x	x		x	x	
14	Vincorion	Deutschland	Deutschland	x					
15	WCBKT	Polen		x	x				

Tabelle 2: Übersicht Hersteller von Bodenstromanlagen

Die aufgelisteten **Hersteller wurden kontaktiert** und um ein Interview gebeten. Insgesamt wurden **Interviews mit zwei am deutschen Markt aktiven Herstellern** geführt, Dynell und ITW GSE (in Deutschland vertreten durch Stavolt Non Stop Power). Einige Hersteller gaben an, nicht im deutschen Markt aktiv zu sein. Von den meisten Herstellern erfolgte keine Rückmeldung. Akteure berichteten in diesem Zusammenhang von der Schwierigkeit für die Hersteller die Anforderung der Flughäfen zu erfüllen. Diese Anforderungen erstrecken sich über Kommunikation, Schulungen, Dokumentation etc. in deutscher Sprache und zum anderen an den hohen Qualitäts-, Technologie- sowie Sicherheitsansprüchen der deutschen Flughäfen.

Im Bereich statische Bodenstromanlagen und Batterie-GPUs sind **Dynell** und **ITW GSE** die am deutschen Markt wichtigsten Anbieter. Geräte zur Bodenstromversorgung beider Unternehmen stehen an einem Großteil der deutschen Verkehrsflughäfen. ITW GSE war der erste Anbieter von Batterie-GPUs und verkaufte die ersten Geräte im Jahr 2018. Bis zum Jahr 2022 hatte ITW GSE einen Marktanteil in Deutschland für Batterie-GPUs von 100 %. Dynell kann als „Early Adopter“ bezeichnet werden und bietet seit dem Jahr 2022 marktreife Batterie-GPUs an. Gespräche mit Flughäfen haben gezeigt, dass das Vertrauen in diese Unternehmen hinsichtlich Qualität und Serviceleistungen derzeit am höchsten ist. Da sich der Markt für batterieelektrische GPUs in einer frühen Phase befindet, besteht die Möglichkeit, dass weitere Akteure in den Markt eintreten werden.



Vergleich von Batterie-GPUs und Diesel-GPUs

In diesem Kapitel erfolgt ein Vergleich von Batterie- und Diesel-GPUs hinsichtlich Umweltverträglichkeit, Effizienz und Kostenstruktur. Verglichen werden, soweit nicht anders angegeben, GPUs mit 400 Hz und einer Leistung von 90 kVA.

Grundsätzlich ist auch der Ersatz von Diesel-GPUs durch **statische Bodenstromanlagen** denkbar, da diese mit Strom aus dem Flughafennetz gespeist werden und bei Grünstrombezug damit ebenfalls emissionsfrei sind. Bei vorhandenem Netzanschluss sind statische Bodenstromanlagen in der Anschaffung deutlich kostengünstiger als eGPUs und weisen zudem keine Ladeverluste auf. Dieselgeräte kommen jedoch überwiegend an Positionen zum Einsatz, an denen kein Anschluss an das Flughafenstromnetz vorhanden ist, oder zur Überbrückung von technischen Ausfällen. Da statische Geräte einen Netzanschluss benötigen, wäre ihr Einsatz mit hohen Kosten für die Schaffung neuer Infrastruktur verbunden. Die Kosten hängen im Detail stark von den individuellen Gegebenheiten vor Ort ab, wie beispielsweise der Distanz der zu verlegenden Kabel und dem Umfang benötigter Tiefbauarbeiten. Daher wird der Vergleich von Diesel-GPUs und statischen Bodenstromanlagen im Rahmen dieser Studie vernachlässigt.

Vergleich der Umweltverträglichkeit

Der zentrale Vorteil batteriebetriebener GPUs liegt in der höheren Klima- und Umweltverträglichkeit. Während des Betriebs stoßen Batterie-GPUs keine Emissionen aus. Bei Verwendung von Grünstrom sind sie vollständig emissionsfrei. Ebenfalls profitieren Batterie-GPUs verglichen mit Diesel-GPUs von einem **höheren Wirkungsgrad**, da sie kaum Energieverluste durch Wärme und mechanische Umwandlung haben. Gemäß ITW GSE (o.D.) verursachen Diesel-GPUs derzeit 42 Prozent des insgesamt durch GSE ausgestoßenen CO₂. Auch der Wegfall der Energienutzung im Leerlauf, wie er bei dieselbetriebenen GPUs aufgrund von Vorlaufzeiten anfällt, ist ein wesentliches Merkmal batterieelektrischer Systeme. Diese Leerlaufzeiten können laut Aussage eines GPU-Nutzers standortbezogen bis zu 50 Prozent der gesamten Betriebszeit ausmachen und werden durch batterieelektrische Systeme eliminiert.

Die Umstellung auf batterieelektrische GPUs trägt daher in hohem Maße zur Defossilisierung des Vorfeldes bei. Da Batterie-GPUs während des Betriebs keine Abgase emittieren, können sie problemlos auch im Hangar verwendet werden.

Ein weiterer Vorteil von Batterie-GPUs ist die deutlich **geringere Lärmbelastung**. Ebenfalls emittieren Batterie-GPUs **keine Abgase**, die bei Diesel-GPUs insbesondere in den Wintermonaten bei niedrigen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit vom Vorfeldpersonal als belastend empfunden werden. Durch die geringe Lärmbelastung und wegfallende Abgasbelastung tragen Batterie-GPUs zum Arbeits- und Gesundheitsschutz der Mitarbeitenden bei. Die befragten Flughafenbetreiber und Hersteller gehen daher davon aus, dass das Vorfeldpersonal der Umstellung positiv gegenübersteht.

Vergleich der Effizienz

Ein Hauptfaktor im Rahmen des Vergleichs der Effizienz von Batterie- und Diesel-GPUs ist der **Ladevorgang** von Batterie-GPUs. Während Diesel-GPUs auf dem Vorfeld mittels eines Tankwagens mit



geringem Zeitaufwand getankt werden können, müssen Batterie-GPUs an eine Ladestation gebracht und dort für mehrere Stunden geladen werden (siehe Kapitel 0). Der für den Betrieb von Batterie-GPUs notwendige, aufwendige Ladevorgang erfordert im Gegensatz zum Betrieb von Diesel-GPUs ein umfangreiches Lademanagement (siehe Kapitel 3.4). Von den zehn größten Flughäfen Deutschlands, gemessen an den Flugbewegungen, haben sechs ein Nachtflugverbot oder eine Nachtflugbeschränkung. Für diese Flughäfen bietet sich die Möglichkeit, Batterie-GPUs über Nacht zu laden.

Ein weiterer unmittelbar hiermit zusammenhängender Einflussfaktor ist die **Kapazität** von Batterie-GPUs. Wie bereits in Kapitel 0 erläutert, sind Batterie-GPUs derzeit hauptsächlich für den Einsatz auf Vorfeldpositionen ohne Stromnetzanschluss konzipiert, an denen täglich eine hohe Zahl Abfertigungen von Narrow-Body-Flugzeugen mit einer kurzen Turnaround-Zeit stattfindet. Für den Einsatz bei Abfertigungen von Wide-Body-Flugzeugen und bei längeren Bodenzeiten sind Batterie-GPUs derzeit nicht ausgelegt. Größere Geräte mit einer Leistung von 180 kVA und einer höheren Batteriekapazität sind deutlich teurer und haben dennoch eine begrenzte Kapazität. Diese Limitierung haben Diesel-GPUs nicht.

Da Batterie-GPUs eine neue Technologie darstellen, ist das Vertrauen in die Verlässlichkeit der Geräte an den Flughäfen derzeit teilweise noch zurückhaltend. Aktuell können noch keine verlässlichen Aussagen über **Lebensdauer** und **Zyklusfestigkeit**⁴ der Batterien getroffen werden, da die ersten Batterie-GPUs der anfänglichen Generation erst seit wenigen Jahren im Einsatz sind.

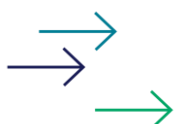
Vergleich der Kostenstruktur

In folgendem Kapitel werden die Kostenstrukturen von Batterie- und Diesel-GPUs verglichen. Dies soll zu einem besseren Verständnis der **Total Cost of Ownership (TCO)** beider Typen beitragen. Dazu zählen Anschaffungskosten sowie Betriebskosten wie etwa Kosten für Diesel oder Strom und Wartung. Im weiteren Verlauf werden die Faktoren erläutert, die sich auf die Kosten auswirken. Die **Anschaffungskosten** von Batterie-GPUs mit einer Leistung von 90 kVA sind je nach Hersteller etwa doppelt so hoch wie die von vergleichbaren Diesel-GPUs. Der Hauptkostentreiber bei Batterie-GPUs ist die Batterie, für die der Preis mit zunehmender Kapazität annähernd proportional ansteigt. Batterie-GPUs mit einer Leistung von 180 kVA benötigen eine Batterie mit einer deutlich höheren Kapazität, wodurch der Preis für ein solches Gerät ungefähr dreimal so hoch ist, wie der für ein Diesegerät.

Der Vergleich zwischen dem **Kraftstoffverbrauch** von Diesel-GPUs und dem **Stromverbrauch** von Batterie-GPUs spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung der Betriebskosten. Diesel-GPUs nutzen Diesel als primäre Energiequelle. Dieselmotoren haben zudem tendenziell einen höheren Verbrauch pro Leistungseinheit im Vergleich zu elektrischen Motoren, was zu höheren Betriebskosten führt.

Diesel-GPUs erfordern regelmäßige **Wartung**, wie etwa Ölwechsel und Reparaturen am Verbrennungsmotor. Im Gegensatz dazu haben Batterie-GPUs aufgrund ihrer geringeren Anzahl beweglicher

⁴ Die Fähigkeit einer Batterie über mehrere Lade- und Entladezyklen hinweg stabil zu bleiben ohne signifikante Kapazitätsverluste zu erleiden.



Teile einen deutlich geringeren Wartungsaufwand. Im Allgemeinen ist nur eine jährliche Überprüfung der Batterie hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit erforderlich. Dazu reicht in der Regel eine durch Flughafenmitarbeitende durchgeführte Datenabfrage, die an den Hersteller übermittelt wird.

Die **Lebensdauer** von Batterie- und Diesel-GPUs hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter Einsatzzeit, Herstellerqualität, Instandhaltung und Betriebsbedingungen (beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Staub, etc.). Eine genaue Aussage über die Lebenserwartung der Batterie von Batterie-GPUs zu treffen, ist daher schwierig. Es wird laut Herstellern eine Lebensdauer von etwa zehn Jahren erwartet. Diesel-GPUs können je nach genannten Einflussfaktoren eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren haben.

Bei Betrachtung eines Zeitraums von zehn Jahren liegt der Break-Even-Punkt laut Herstellerangaben zwischen etwa drei und sieben Jahren. Zu diesem Zeitpunkt unterschreiten die Total Cost of Ownership einer Batterie-GPU die einer Diesel-GPU. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass die Anfangsinvestition aufgrund einer Förderung gegebenenfalls geringer ausfällt. Der genaue Zeitpunkt des Break-Even ist stark abhängig von den Anschaffungskosten, Wartungskosten sowie der täglichen Einsatzzeit und dem sich daraus ergebendem Verbrauch und Kosten von Diesel und Strom.

Darüber hinaus ist zu bedenken, dass Batterien von eGPUs nach voraussichtlich etwa zehn Jahren ihr **Lebensende** erreicht haben. Derzeit kann keine verlässliche Aussage getroffen werden, ob der Austausch der Batterien oder die Anschaffung einer neuen GPU mit anderer Batterietechnologie oder gegebenenfalls Brennstoffzellentechnologie sinnvoller wäre. Auch eine Aussage zu den dadurch anfallenden Kosten ist daher schwierig zu treffen.

Bodenstromsysteme gehören generell zur **Infrastruktur des Flughafens** und liegen damit in der Verantwortung des Flughafenbetreibers. Dies gilt ausnahmslos für stationäre Bodenstromanlagen, welche fest in die Flughafeninfrastruktur integriert sind. Mobile Geräte befinden sich zumeist ebenfalls im Eigentum des Flughafens, können jedoch auch Drittabfertigern (sogenannte Bodenverkehrsdiensten, kurz BVD) gehören. Da Flughäfen zu den Sektorenauftraggebern zählen, sind sie ab einem Auftragswert von 443.000 EUR zur **europaweiten Ausschreibung** von Liefer- und Dienstleistungsaufträgen verpflichtet. Plant ein Flughafen die Anschaffung mehrerer Geräte, erfolgt daher in der Regel eine Ausschreibung. Im Rahmen dieser Ausschreibungen ist der angebotene Preis oftmals das Hauptauswahlkriterium. Anbietende Hersteller haben hier die Möglichkeit, die Preise entsprechend zu gestalten. Der Preis wird ebenfalls durch individuelle Anforderungen der Flughäfen an Konfigurationen und zusätzliche Optionen für Batterie-GPUs beeinflusst.

Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung

Die Befragungen von Flughäfen und Herstellern haben ergeben, dass aktuell **Batterie-GPUs** die bevorzugte Lösung für die Umstellung auf eine klimafreundliche Bodenstromversorgung darstellen. Diesel-GPUs werden derzeit an Vorfeldpositionen ohne Netzanschluss und für die Überbrückung bei Ausfällen und Wartungen eingesetzt, wofür Batterie-GPUs eine gute Alternative bieten.

In diesem Kapitel wird nachfolgend auf den aktuellen Stand der klimafreundlichen Bodenstromversorgung an deutschen Flughäfen eingegangen. Weiterhin werden Herausforderungen im Rahmen



der Umstellung erläutert und Entscheidungskriterien für den Kauf von Bodenstromgeräten vorgestellt.

Status quo an deutschen Flughäfen

Die Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung an deutschen Flughäfen befindet sich derzeit in der Umsetzung. Dabei zeigen verschiedene Flughäfen unterschiedliche Fortschrittsstadien. Im Folgenden wird ein **Überblick über den aktuellen Stand** der Bodenstromversorgung an deutschen Flughäfen gegeben, basierend auf Gesprächen mit den Flughafenbetreibern. An den sieben befragten Verkehrsflughäfen sind jeweils noch etwa 30 bis 50 dieselbetriebene GPUs im Einsatz. Während einige Flughäfen bereits Batterie-GPUs im Regelbetrieb nutzen, wurden an anderen Flughäfen nur Tests durchgeführt oder batteriebetriebene Geräte sind bisher noch nicht im Einsatz. Einige Flughäfen haben im Jahr 2023 bereits eine Zuwendung im Rahmen des ersten Förderaufrufs der Bodenstrom-Richtlinie des BMDV erhalten. Die Auslieferung der geförderten Geräte erfolgt zeitnah.

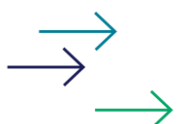
An den deutschen Flughäfen erfolgt die **Bodenstromversorgung** von Positionen an **Fluggastbrücken** nahezu vollständig mit stationären Anlagen. Auf dem **Vorfeld** variiert die Art der Versorgung je nach Flughafen. Einige Flughäfen haben bis zu 90 Prozent der Vorfeldpositionen mit statischen Anlagen ausgestattet. An diesen Flughäfen werden GPUs nur noch selten genutzt, hauptsächlich an den verbleibenden, nicht angeschlossenen Positionen oder zur Überbrückung von technischen Ausfällen und Wartungen. An anderen Flughäfen gibt es bisher noch keinen statischen Netzanschluss an den Vorfeldpositionen.

Die **Gründe für das Fehlen einer statischen Bodenstromversorgung** sind vielfältig und individuell. Die erforderlichen Hoch- und Tiefbauarbeiten für den Netzanschluss sind oft komplex und kostenintensiv. Daher wird ein Anschluss häufig nur für neu gebaute Vorfeldareale und Bereiche mit ausreichender Auslastung in Betracht gezogen. Selbst bei vorhandenem Netzanschluss erlaubt die Auslegung der Positionen nicht immer die Installation von stationären Anlagen, beispielsweise aufgrund von Abstandsregelungen zum Flugzeug. In solchen Fällen können mobile Anlagen oder Batterie-GPUs zum Einsatz kommen.

Die **Eigentumsverhältnisse** der Bodenstromanlagen unterscheiden sich je nach Flughafen. Stationäre Bodenstromanlagen sind grundsätzlich Teil der Infrastruktur der Flughäfen und daher deren Eigentum. Flughäfen mit eigenem BVD besitzen entsprechend auch mobile Geräte. Sind an Flughäfen externe BVD ansässig, nutzen diese teilweise die mobilen Geräte des Flughafens oder verfügen über eigene Geräte.

Herausforderungen

Die Befragungen von Flughäfen und Herstellern haben ergeben, dass vor allem Batterie-GPUs für die Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgungen eine Lösung sind. Bei der Umstellung auf batteriebetriebene GPUs an Flughäfen ergeben sich verschiedene **Herausforderungen und operative Veränderungen**. Diese lassen sich unterteilen in infrastrukturelle, technische, operative und finanzielle Aspekte. Sie sind in Tabelle 3 dargestellt und werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.



Bereiche	Herausforderungen	Lösungen
Infrastrukturell	<ul style="list-style-type: none"> · Begrenzte Netzkapazität · Zahl der Ladepunkte 	<ul style="list-style-type: none"> · Langfristige Planung · Zuwendungen im Rahmen von Förderprogrammen
Technisch	<ul style="list-style-type: none"> · Begrenzte Kapazität Batterie-GPU 	<ul style="list-style-type: none"> · Brennstoffzelle · Statische Bodenstromanlage
Operativ	<ul style="list-style-type: none"> · Lademanagement · Einarbeitung des Personals an neuen Geräten und Ladeprozessen · Fehlende Erfahrungswerte 	<ul style="list-style-type: none"> · Telematik · Change-Management
Finanziell	<ul style="list-style-type: none"> · Ausbau der Netzkapazität und der Stromversorgung des Vorfelds · Anschaffung neuer Geräte 	<ul style="list-style-type: none"> · Zuwendungen im Rahmen von Förderprogrammen · Kostensenkung durch Skaleneffekte

Tabelle 3: Herausforderungen und Lösungsansätze bei Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung

Eine zentrale **infrastrukturelle Herausforderung** ist an nahezu allen Flughäfen die **Bereitstellung von ausreichend elektrischer Energie**, sowohl bezüglich der verfügbaren Ladestationen als auch der verfügbaren Netzkapazität. Es ist anzunehmen, dass die Netzkapazitäten der Flughäfen in Hinblick auf eine zukünftig vermehrte Nutzung von elektrischen GPUs und GSE an die Belastungsgrenze kommen wird. Besonders zu Stoßzeiten, in denen sowohl batterieelektrische Geräte als auch die Flughafeninfrastruktur das Netz beanspruchen, werden ohne einen Ausbau der Kapazitäten Engpässe entstehen. Ein weiterer Aspekt ist die derzeit oftmals unzureichende Zahl von Ladepunkten, insbesondere ein Mangel an 125-Ampere-Anschlüssen. Diese ermöglichen verglichen mit 32-Ampere-Anschlüssen, die bisher am häufigsten sind, eine weitaus schnellere Ladung. Zudem werden Gleichstromschnellladestationen benötigt, die sowohl Batterie- GPUs als auch weiteres GSE effizient mit Strom versorgen, etwa als Zwischenladung während der Schicht. Der Ausbau der Infrastruktur ist daher eine zentrale Aufgabe für Flughafenbetreiber im Kontext der Flotten- und Geräteelektrifizierung. Herausfordernd ist dies aufgrund der hohen hiermit verbundenen Kosten, Komplexität und dem beträchtlichen Zeitaufwand.

Anspruchsvoll ist ebenfalls die Versorgung mit (Stark-)Strom an **Vorfeldpositionen ohne Netzanschluss**. Statische Bodenstromanlagen sind energieeffizienter, da keine Umwandlungsverluste wie durch den Lade- und Entladevorgang bei Batterie-GPUs entstehen. Ebenfalls ist die betriebliche Nutzung von statischen Anlagen organisatorisch einfacher, da kein Lademanagement erforderlich ist. Die Anbindung an das Stromnetz ist jedoch aufgrund erforderlicher Hoch- und Tiefbauarbeiten sowohl kostenintensiv als auch technisch komplex. Daher bieten Batterie-GPUs eine Alternative.

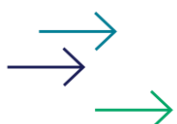
Grundsätzlich sind verschiedene Aspekte hinsichtlich der jeweiligen Vorfeldposition zu beachten. Haltepositionen von Flugzeugen können sich teilweise um 10 bis 15 Meter unterscheiden, abhängig beispielsweise vom Flugzeugtyp und Wetterbedingung. Einige Positionen bieten die Möglichkeit, dass Flugzeuge eigenständig die Position verlassen (Durchrollposition). Eine ausführliche Planung ist nötig, um allen Aspekten, wie abgefertigte Flugzeugtypen, Geometrie der Position und betriebliche Prozesse, gerecht zu werden.



Eine wesentliche **technische Herausforderung** bei der Umstellung auf Batterie-GPUs ist deren **begrenzte Kapazität**. Dies ist relevant hinsichtlich Abfertigungen von Wide-Body-Flugzeugen und Abfertigungen von Cargo-Flugzeugen, die meist lange Bodenzeiten von bis zu zehn Stunde haben. Auch für Flughäfen mit 24-Stunden-Betrieb ist die begrenzte Batteriekapazität eine Herausforderung, da die Batterie-GPUs, anders als an Flughäfen mit Nachtflugverbot oder -beschränkung, während des Betriebs geladen werden müssen und in diesem Zeitraum nicht zur Verfügung stehen. Für diese Anwendungsfälle sind Standardgeräte mit 90 kVA und einer Batteriekapazität von rund 160 kWh nicht ausreichend. Der Einsatz von Batterie-GPUs mit 180 kVA und einer entsprechend größeren Batteriekapazität ist allerdings umstritten. Der Preis für diese größeren Geräte liegt deutlich über dem von Diesel-GPUs (siehe Kapitel 0). Die Batteriekapazität ist zwar höher, aber dennoch begrenzt. Ebenfalls sind Batterie-GPUs mit 180 kVA deutlich schwerer und damit unhandlicher im Betrieb. Genaue Angaben hinsichtlich Gewichts und Abmessungen verschiedener Geräte finden sich in Anhang 1. Aufgrund dieser Limitierungen sind sie bislang wenig am Markt vertreten. Der Antrieb mittels Brennstoffzellentechnologie kann hier eine potenzielle Lösung bieten.

Auch **operative Herausforderungen** entstehen durch die Umstellung auf Batterie-GPUs. Dies beinhaltet zum Beispiel die **Gewöhnung des Vorfeldpersonals** an die Nutzung neuer Geräte. Mitarbeitende müssen anders als bei Diesel-GPUs aktiv den Ladestand kontrollieren und die Batterie-GPUs für den Ladevorgang zu den entsprechenden Ladepunkten bringen. Flughäfen fehlt teilweise noch die Erfahrung im Einsatz von Batterie-GPUs im Betrieb. Dies führt zu Unsicherheit bezüglich der Nutzungsdauer der Batterie, betrieblicher Integration und Zuverlässigkeit der neuen Technologie. Eine angemessene Planung, Umsetzung und Steuerung des Change-Managements sowie eine kontinuierliche Kommunikation mit den von der Umstellung betroffenen Beteiligten stellen sicher, dass die Integration in den Betrieb effektiv und effizient erfolgt und eine sachgerechte Einarbeitung der Mitarbeitenden erfolgt. Für ein effizientes Lademanagement kann Telematik eingesetzt werden. Ein in die Batterie-GPUs integriertes Telematiksystem erlaubt die Erfassung und Übertragung von Daten zum Ladestand und zur Position.

Nicht zuletzt begegnen die Flughafenbetreiber und gegebenenfalls Bodenverkehrsdienstleister **finanziellen Herausforderungen** bei der Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung. Dies beinhaltet hohe Kosten für einen potenziell notwendigen Netzausbau sowie die Erweiterung der Ladeinfrastruktur. Kostenintensiv wären ebenfalls der Anschluss von Vorfeldpositionen an das Flughafenstromnetz. Auch die alternative Anschaffung von Batterie-GPUs ist mit hohen Kosten verbunden (vgl. Kapitel 0). Eine Förderung im Rahmen der Bodenstrom-Richtlinie des BMDV oder anderer Förderprogramme kann dazu beitragen, diese finanziellen Barrieren zu senken.



Entscheidungskriterien beim Kauf

Bei der Umstellung auf klimafreundliche Bodenstromversorgung spielen verschiedene **Entscheidungskriterien beim Kauf** eine Rolle. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind Kriterien, die die Entscheidung potenziell beeinflussen, aufgeführt.

Entscheidungskriterien	
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> · Anschaffungspreis der Geräte · Total Cost of Ownership/Lifecycle-Kosten · Art und Höhe einer potenziellen Förderung
Technische Aspekte der Geräte	<ul style="list-style-type: none"> · Batteriekapazität · Leistung · Wartung und Instandhaltung · Homogenität der Geräte
Dienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> · Dokumentation und Services auf Deutsch · Ersatzteilverfügbarkeit · Wartungsservices · Schulungsangebote · Solvenz des Lieferanten
Erfahrungswerte	<ul style="list-style-type: none"> · Bevorzugung bewährter Hersteller · Austausch mit anderen Flughäfen
Eigenschaften der Positionen	<ul style="list-style-type: none"> · Art des Verkehrs (Passagier/Fracht) · Frequenz der Abfertigungen · Flugzeugtyp · Besondere Eigenschaften der Position (z. B. Durchrollposition) · Vorschriften (z. B. Abstandsregelungen)

Tabelle 4: Entscheidungskriterien für den Kauf von klimafreundlichen Bodenstromanlagen

Bodenstromanlagen werden in der Regel durch die Flughäfen gekauft, da diese Eigentümer der Flughafeninfrastruktur sind. Mobile Geräte können auch externen Bodenverkehrsdienstleitern gehören und durch diese beschafft werden (siehe Kapitel 0). Flughäfen als Sektorenauftraggeber sind oftmals zur Ausschreibung verpflichtet (siehe Kapitel 0). Die **Gewichtung** der verschiedenen Entscheidungskriterien variiert dabei je nach Anwendungsfall. Im Rahmen der Defossilisierung der Bodenstromversorgungen sind derzeit vor allem Batterie-GPUs eine gängige Lösung. Für diese ist häufig der Anschaffungspreis das Hauptkriterium. Einige Einkäuferinnen und Einkäufer achten jedoch vornehmlich auf technische Parameter, um einen störungsfreien Betrieb sicherzustellen, und priorisieren den Anschaffungspreis niedriger. Viele tendieren dazu, Geräte von Herstellern zu bestellen, mit denen sie in der Vergangenheit gute Erfahrungen beispielsweise hinsichtlich Zuverlässigkeit der Produkte, Kommunikation und Serviceleistungen gemacht haben.



Ausblick

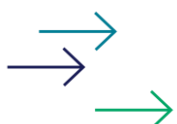
Die Entwicklung von klimafreundlichen Lösungen für die Bereitstellung von Bodenstrom für Flugzeuge an Flughäfen wird sowohl durch **Regularien** als auch durch das Voranschreiten von **Technologien** beeinflusst.

Im Jahr 2023 verabschiedete der Rat der Europäischen Union die **Verordnung über den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR)**⁵, welche seit dem 13. April 2024 vollumfänglich gilt. Die AFIR verpflichtet zur Stromversorgung stationärer Luftfahrzeuge, welche für den gewerblichen Luftverkehr während des Ein- oder Ausstiegs der Fluggäste oder zum Be- oder Entladen von Gütern genutzt werden. In diesem Rahmen muss die Bodenstromversorgung bis zum 31. Dezember 2024 an allen Flugsteigpositionen und bis zum 31. Dezember 2029 an allen Vorfeldpositionen sichergestellt werden. Weiterhin gibt die AFIR vor, dass ab dem 1. Januar 2030 der für die Bodenstromversorgung genutzte Strom aus dem Stromnetz kommen muss oder vor Ort ohne Nutzung fossiler Kraftstoffe erzeugt werden muss. Mit der Richtlinie über Zuwendungen zur Förderung alternativer Technologien für die klima- und umweltfreundliche Versorgung von Luftfahrzeugen mit Bodenstrom an Flughäfen (kurz: Bodenstrom-Richtlinie) unterstützt das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) die Defossilisierung des Flughafen-campus. Die Anträge der Bodenstrom-Richtlinie werden von der Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen (BAV) bearbeitet und bewilligt. Die NOW GmbH als wissenschaftlich-technischer Dienstleister unterstützt die veranlassten Erfolgskontrollen und begleitenden Evaluierungen mit ihrer fachlichen Expertise. Zusätzlich erhebt sie Daten zum Umfeld der Fördermaßnahme. Durch die Förderung wird eine beschleunigte Defossilisierung der Bodenstromversorgung, vor der im Rahmen der AFIR angestrebten Frist zum 1. Januar 2030, angestrebt. Durch die Förderung wird ein initialer Markt für Batterie- und gegebenenfalls Wasserstoff-GPUs in Deutschland aktiviert. Es ist anzunehmen, dass die Anschaffung ohne die Förderungen für die meisten Flughäfen zum jetzigen Zeitpunkt finanziell nicht realisierbar wäre.

Die **Technologie für Batterie-GPUs** ist bei den ersten Herstellern bereits marktreif und verfügbar. Die aktuell größte Herausforderung ist die limitierte Kapazität der Batterien. Denkbar ist, dass in Zukunft eine neue Zellchemie entwickelt wird, die das Design einer Batterie-GPU mit mehr Kapazität ermöglicht. Nach jetzigem Stand scheint vor allem der Einsatz von Brennstoffzellentechnologie eine Lösung für dieses Problem zu bieten.

Die Branche erkennt zunehmend das Potenzial von Wasserstoff zum Betrieb von GSE und GPUs. Dabei wird im Folgenden die Nutzung von Wasserstoff mittels **Brennstoffzellen** betrachtet. Wasserstoffbrennstoffzellen wandeln chemische in elektrische Energie um, wodurch ein Elektromotor betrieben werden kann. Ebenfalls möglich ist die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff in Verbrennungsmotoren. Dies ist zwar umweltfreundlicher als die Nutzung fossiler Brennstoffe, aber nicht vollständig lokal emissionsfrei. Ebenfalls ist der Gesamtwirkungsgrad niedriger als bei der Verwendung von Brennstoffzellen. Ein möglicher Vorteil von brennstoffzellenbetriebenen gegenüber batterieelektrischen GPUs ist der deutlich schnellere Tankvorgang. Batterie-GPUs sind durch die Batteriekapazität in ihrem Einsatz limitiert. Wasserstoff-GPUs sind von dieser Einschränkung nicht

⁵ Europäische Union (2023)



betroffen (siehe Kapitel 0). Daher sind sie potenziell für die Abfertigung von Wide-Body-Flugzeugen und zum Einsatz bei längeren Bodenzeiten, beispielsweise im Frachtbereich, geeignet. Die Brennstoffzellentechnologie wird aus diesen Gründen von Flughäfen und Herstellern von Bodenstromsystemen als Alternative in Betracht gezogen. Noch ist jedoch global keine marktreife Wasserstoff-GPU verfügbar.

Derzeit laufen erste **Pilotprojekte mit Wasserstoff-GPUs**. Im Rahmen des Projekts **GRQ Hydrogen Valley Airport** wurde am Flughafen Groningen mit dem Pilotbetrieb einer GPU mit Brennstoffzellenantrieb begonnen. Der Antriebshersteller Holthausen Clean Technologies hat hierfür eine konventionelle Diesel-GPU in eine wasserstoffbetriebene Variante umgewandelt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Auf Grundlage des Testbetriebs sollen Erfahrungen für den zukünftigen Einsatz von Wasserstoff auf dem Vorfeld gesammelt werden. Zudem ist eine Zertifizierung der Wasserstoff-GPU geplant, die den Einsatz im Regelbetrieb ermöglichen soll.⁶ Ein weiteres Pilotprojekt wird als Teil des europäischen Projekts „**TULIPS – Green Airports**“ umgesetzt. Eine Brennstoffzelle des niederländischen Herstellers zepp.solutions wird in eine GPU des österreichischen Hersteller Dynell verbaut. Diese Wasserstoff-GPU wird voraussichtlich ab Mitte des Jahres 2024 am Flughafen Amsterdam Schiphol eingesetzt und dort durch KLM Equipment Services B.V. im Betrieb genutzt.⁷ Wann die erste Wasserstoff-GPU marktreif sein wird und wie hoch der Anschaffungspreis liegt, ist derzeit schwer abschätzbar.

Eine große **Herausforderung**, der sowohl die batterieelektrische Bodenstromversorgung als auch Wasserstoff-GPUs gegenüberstehen, ist die benötigte **Infrastruktur**. Statische Bodenstromanlagen benötigen einen Anschluss an das Flughafenstromnetz vor Ort. Batterie-GPUs erfordern Ladepunkte in genügender Anzahl und mit ausreichender Leistung. Wasserstoff-GPUs brauchen Wasserstofftankstellen. Die Schaffung dieser Infrastrukturen ist kosten- und zeitaufwendig. Weitere Herausforderungen sind in Kapitel 0 dargestellt.

⁶ Groningen Airport Eelde (2023) & NXT Airport (2022)

⁷ TULIPS (2024)

4 Ground Support Equipment (GSE)

Ground Support Equipment (GSE) beschreibt **Service- und Wartungsgeräte**, die am Flughafen zur Unterstützung des Flughafenbetriebs auf dem Vorfeld und damit verbundene Aktivitäten benötigt werden. Sie werden vor allem für die luftseitige Abfertigung von Flugzeugen eingesetzt. Dies umfasst Dienstleistungen, die stattfinden, während sich das Flugzeug zwischen zwei Flügen am Boden befindet. Zu diesen Dienstleistungen zählen unter anderem Be- und Entladung von Gepäck, Betankung, Reinigung und Klimatisierung der Passagierkabine, Versorgung mit Lebensmitteln (Catering), Toiletten- und Frischwasserservice sowie gegebenenfalls Enteisung.

Eine **beispielhafte Übersicht** über zur Abfertigung verwendetes GSE ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Eine Auflistung von weiterem Equipment ist in nachfolgendem Unterkapitel 0 in Tabelle 5 sowie in Anhang 1 zu finden.

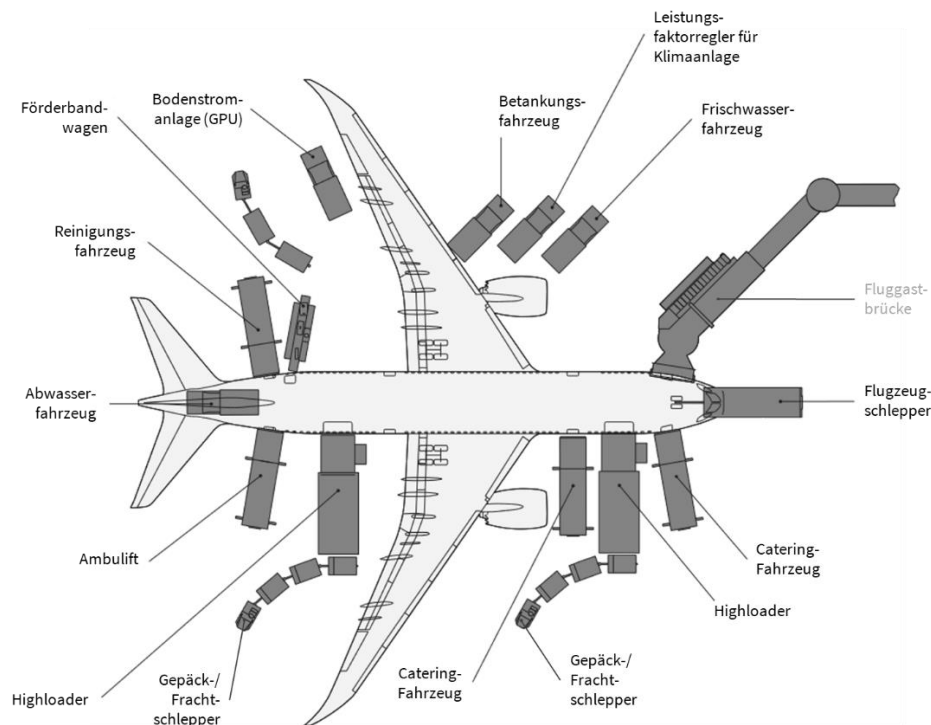
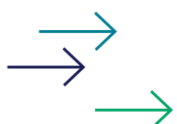


Abbildung 9: Ground Support Equipment (GSE), eigene Darstellung basierend auf Boeing (2008)

Ein Großteil des herkömmlichen GSE wird mit Diesel angetrieben. Vor allem im Hinblick auf den Ausstoß von CO₂ und Luftschadstoffen ist die **Umstellung auf klima- und umweltfreundliches GSE** erstrebenswert. Im weiteren Verlauf werden auf alternativen Energiequellen basierende Antriebsmöglichkeiten und deren jeweiliger Entwicklungsstand vorgestellt.

Im Verlauf dieses Kapitels werden der aktuelle Stand der Technologie sowie die Vor- und Nachteile von batterieelektrischem und Brennstoffzellenantrieb erläutert. Ebenfalls erfolgt ein Überblick über den aktuellen Fortschritt der Umstellung an deutschen Flughäfen sowie über potenzielle Unterstützung durch Förderprogramme. Es werden Empfehlungen für die Beschaffung und ein Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen im Bereich klimafreundlicher GSE gegeben.



Technologieübersicht

Hinsichtlich alternativer Antriebe im Bereich GSE sind zwei wesentliche Technologien in Betracht zu ziehen, zum einen der batterieelektrische Antrieb und zum anderen der elektrische Antrieb mit Wasserstoff und Brennstoffzellen.

Die Technologie des **batterieelektrischen Antriebs** ist bereits fortgeschritten. Ein Großteil des GSE ist mit elektrischem Antrieb am Markt verfügbar. Die Energieversorgung erfolgt über eine Batterie, welche an entsprechenden Ladepunkten geladen wird. Die Bereitstellung der hierfür notwendigen Ladeinfrastruktur liegt in der Verantwortung der Flughäfen. Die Entwicklung beispielsweise von elektrischen Gepäckschleppern mit fortschrittlichen Batteriemanagementsystemen und intelligenten Lademöglichkeiten schreitet voran. Zusätzlich gewinnt die Integration von IoT (Internet of Things)⁸ in elektrisches GSE an Bedeutung, was eine Echtzeitüberwachung und Fernwartung der Geräte ermöglicht. Bisher existieren keine marktreifen batterieelektrischen Lösungen für energieintensive Vorfeldfahrzeuge wie beispielsweise Schneepflüge. Die für diese Fahrzeuge benötigte Energiemenge ist derzeit nicht durch verfügbare Batteriekapazität limitiert. Die benötigte Reichweite kann derzeit durch batterieelektrische Lösungen nicht erzielt werden.

Fahrzeuge mit **Brennstoffzellentechnologie** nutzen Wasserstoff als Energiespeicher. Für die Stromerzeugung aus Wasserstoff werden Brennstoffzellen eingesetzt. Wasserstoff kann in größeren Mengen und vergleichsweise schnell getankt werden, wodurch die Fahrzeuge auch für den Betrieb auf längeren Strecken geeignet sind. Die Speicherung von Wasserstoff kann flüssig oder gasförmig erfolgen. Die Verflüssigung von Wasserstoff erfordert einen höheren Energiebedarf und bei der Lagerung können Boil-Off-Verluste entstehen.⁹ Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge werden an Wasserstofftankstellen vor Ort getankt. Die Anlieferung des Wasserstoffs erfolgt per Lkw, Zug oder Pipeline. Insgesamt hat sich die Technologie der Brennstoffzelle in den letzten Jahrzehnten bedeutend weiterentwickelt. Ausdruck findet dies unter anderem in einer verbesserten Performance, höheren Robustheit und einer längeren Lebensdauer. Auf globaler Ebene wird intensiv an der Weiterentwicklung von Materialien im Bereich Brennstoffzellen geforscht und an der Optimierung der Systemkomponenten gearbeitet. In den kommenden Jahren ist eine Verbesserung der Systemwirkungsgrade zu erwarten.¹⁰ Ein Hersteller, der bereits GSE mit Brennstoffzellentechnologie anbietet, ist die französische Firma Gaussin. Verfügbar von Gaussin sind Dispenser¹¹ und ULD-Transporter¹². Ebenfalls am Markt erhältlich sind Flugzeugschlepper¹³ und Förderbandwagen¹⁴ mit Brennstoffzellentechnologie des französischen Herstellers TLD. Der deutsche Nutzfahrzeughersteller MULAG und der US-amerikanische Hersteller von Brennstoffzellen Plug Power haben gemeinsam ein

⁸ Als „Internet of Things“ (IoT) wird die Kommunikation von Maschinen, Anlagen und Geräten untereinander und mit der Außenwelt bezeichnet. Durch die Verknüpfung von Kommunikation, Datenverarbeitung, Fernsteuerung und Interaktion werden die Geräte „intelligent“, was die Implementierung automatisierter Arbeitsprozesse und Steuerungen ermöglicht. (Bundesnetzagentur, 2024a)

⁹ VDI (2022)

¹⁰ e-mobil BW (2021)

¹¹ Gaussin (o.D.b)

¹² Gaussin (o.D.a)

¹³ TLD (2024b)

¹⁴ TLD (2024a)

brennstoffzellenbetriebenen Frachtschlepper entwickelt, der im Betrieb am Flughafen Hamburg zum Einsatz kommt.¹⁵

In der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt sind die aktuellen **Entwicklungsstände verschiedener GSE-Kategorien** hinsichtlich batterieelektrischem und Brennstoffzellenantrieb. Eine detaillierte Übersicht mit Angaben zu Herstellern der Geräte in der jeweiligen GSE-Kategorie kann in Anhang 1 eingesehen werden.

GSE-Kategorie	Entwicklungsstand	
	Elektrischer Antrieb	Brennstoffzellenantrieb
Abwasserfahrzeug	verfügbar	/
Ambulift	verfügbar	in Entwicklung
Betankungsfahrzeug	verfügbar	verfügbar
Bodenstartgerät (ASU)	verfügbar	/
Catering-Fahrzeug	verfügbar	/
Dispenser	verfügbar	/
Enteisungsfahrzeug	Hybrid verfügbar	/
Feuerwehrfahrzeug	Hybrid verfügbar	in Entwicklung
Fluggasttreppe mit Eigenantrieb	verfügbar, teils mit Solarpanels	/
Flugzeugschlepper stangenlos	verfügbar	/
Flugzeugschlepper mit Stangen	verfügbar	verfügbar
Flugzeugschlepper fahrerlos (tugs)	verfügbar	/
Förderbandwagen	verfügbar	verfügbar
Friktiontester	verfügbar	/
Frischwasserfahrzeug	verfügbar	/
Gepäck-/Frachtschlepper	verfügbar	Pilotprojekt(e)
Highloader	verfügbar	/
Kehrmaschine	verfügbar	/
Pre-Conditioned-Air Unit (mobil)	/	/
Schneepflug	/	/
ULD-/Palettentransporter	verfügbar	verfügbar
Vorfelddbus	verfügbar Solarantrieb in Entwicklung	verfügbar

Tabelle 5: Entwicklungsstand elektrischer und Brennstoffzellenantrieb nach GSE-Kategorie

¹⁵ CIN (2019)



Vor- und Nachteile batterieelektrischer und Brennstoffzellenantriebe

In Tabelle 6 sind einige **Vor- und Nachteile von batterieelektrischem und Brennstoffzellenantrieb gegenüber dem Antrieb mit fossilen Kraftstoffen** aufgeführt. Der maßgebende Faktor für beide Antriebsarten ist die Einsparung von CO₂-Emissionen und Luftschadstoffen. Durch die Antriebe werden während des Betriebs keine direkten Emissionen erzeugt. Stammt der Strom für elektrische Fahrzeuge oder für die Produktion von Wasserstoff für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge aus erneuerbaren Quellen, entstehen hier ebenfalls keine Emissionen. Zu berücksichtigen sind darüber hinaus indirekte Emissionen, die beispielsweise bei der Produktion von Batterie oder Brennstoffzelle und der Schaffung der benötigten Infrastruktur entstehen.

Der Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad ist beim batterieelektrischen Antrieb mit rund 86 Prozent am höchsten. Der Antrieb mit Brennstoffzellen liegt bei 51 Prozent Wirkungsgrad.¹⁶ Dieselmotoren haben einen Wirkungsgrad von bis zu 45 Prozent.¹⁷ Wird die Gesamtenergiekette nach Wheel-to-Tank betrachtet, sinkt der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs stärker ab, aufgrund der Verluste zusätzlicher Prozessschritte wie die Herstellung und Aufbereitung des Wasserstoffes.

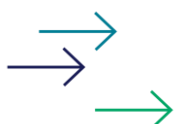
	Batterieelektrischer Antrieb	Brennstoffzellenantrieb
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Keine direkten Emissionen während des Betriebs Keine Feinstaubbelastung vor Ort Geringere Lärmemission Geringere Betriebskosten durch geringere Kosten für Energie und geringeren Wartungsaufwand Höherer Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Keine direkten Emissionen während des Betriebs Keine Feinstaubbelastung vor Ort Geringere Lärmemission Ähnliche Reichweiten wie Antrieb mit fossilem Kraftstoff
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Anschaffungskosten Längere Ladezeit Geringere Reichweite Ausbau Ladeinfrastruktur am Flughafen notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Anschaffungskosten Aufbau kostenintensiver Wasserstoffinfrastruktur notwendig

Tabelle 6: Vor- und Nachteile von elektrischem und Brennstoffzellenantrieb im Vergleich zum Antrieb mit fossilen Kraftstoffen

Im **Vergleich von batterieelektrischen und Brennstoffzellenantrieb** zeigt sich insgesamt, dass die Nutzung von erneuerbarem Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen energieeffizienter und kostengünstiger als die Nutzung von grünem Wasserstoff ist. Brennstoffzellen sind aufgrund der notwendigen Umwandlung von Strom in grünen Wasserstoff und der erneuten Umwandlung in der Brennstoffzelle in Strom für den Elektromotor weniger energieeffizient als batterieelektrische Lösungen. Der batterieelektrische Antrieb befindet sich auf einem fortgeschritteneren Entwicklungsstand,

¹⁶ Eigene Berechnungen nach Umweltbundesamt (2021)

¹⁷ TÜV NORD (o.D.)



entsprechende Geräte sind in vielen GSE-Kategorien am Markt verfügbar. Die Schaffung neuer Ladeinfrastruktur kann mit Blick auf die begrenzte Netzanschlussleistung von Flughäfen herausfordernd sein, bringt aber tendenziell geringeren zeitlichen Aufwand und geringere Kosten mit sich als der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Der Einsatz von Wasserstoff ist in der Regel dann sinnvoll, wenn ein hoher Energiebedarf besteht.¹⁸ Dieser kann am Flughafen bei Fahrzeugen wie etwa Schleppern für Wide-Body-Flugzeuge, Feuerwehr- oder Winterdienstfahrzeugen sowie GPU für Wide-Body-Flugzeuge oder im Frachtbereich auftreten. Zentraler Vorteil von Geräten mit Brennstoffzellenantrieb ist der deutlich schnellere Tankvorgang. Im Vergleich zu batterieelektrischen Geräten sind Brennstoffzellen nicht durch die Batterie hinsichtlich Kapazität limitiert. Perspektivisch wird die Nutzung von Wasserstoff für GSE durch eine Pipeline-Anbindung von Flughäfen an das Wasserstoffkernnetz begünstigt. Die erste Ausbaustufe wird durch die Bundesnetzagentur für 2027 angestrebt.¹⁹ Auch eine zukünftige Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff für Luftfahrzeuge wird eine erhöhte Verfügbarkeit von Wasserstoff an Flughäfen mit sich bringen. Erste Flugzeuge mit Flüssigwasserstoffantrieb für die kommerzielle Luftfahrt sind, beispielsweise durch Airbus²⁰, für 2035 angekündigt.

Status der Defossilisierung an deutschen Flughäfen

Alle befragten Flughäfen haben mit der Umstellung auf klimafreundliche Antriebe für ihre GSE-Flotte begonnen. Dabei wird zumeist auf batterieelektrische Antriebe gesetzt. Alternativ kommen teilweise Flüssiggas oder synthetischer Diesel (HVO 100) zum Einsatz, um Emissionen zu verringern. Der **Stand der Defossilisierung** variiert dabei zwischen den einzelnen Flughäfen. Der Flughafen, der mit der Umstellung am weitesten fortgeschritten ist, hat etwa die Hälfte seiner Flotte defossilisiert, gemessen an der eingesparten Menge Diesel. Oftmals beruhen Angaben der Flughäfen zum Stand der Umstellung ihrer Flotte auf Schätzwerten. Deshalb kann keine genaue Aussage zum Status Quo getroffen werden. Für einen direkten Vergleich ist grundsätzlich wichtig, ein einheitliches Maß wie beispielsweise eingesparte Emissionen gegenüber Dieselgeräten festzulegen.

Große Unterschiede hinsichtlich des Stands der Defossilisierung gibt es **zwischen den verschiedenen GSE-Kategorien**. Eine Übersicht über den aktuellen Technologiestand ist in Kapitel 0 zu finden. Die bereits am Markt verfügbaren Geräte sind dementsprechend auch an Flughäfen wiederzufinden. Elektrische Gepäck- und Frachtschlepper sind an den meisten Flughäfen bereits im Einsatz. Auch Förderbänder, Fluggasttreppen und Highloader sind an mehreren Flughäfen bereits elektrifiziert. Insgesamt ist die Elektrifizierung von weniger energieintensiven Geräten weiter fortgeschritten. Geräte, die mehr Energiekapazität benötigen, sind durch die Limitierungen aktueller Batterietechnologien eingeschränkt. Davon betroffen sind unter anderem Enteiser, Kehrmaschinen oder Schneepflüge. Für diese GSE-Kategorien sind wenige bis keine emissionsfreien Alternativen am Markt verfügbar. Erste Lösungsansätze bieten Geräte mit hybridelektrischem Antrieb, das heißt einer Kombination aus Elektro- und Verbrennungsmotor. Perspektivisch können Geräte mit Brennstoffzellentechnologie eine Lösung darstellen.

¹⁸ Umweltbundesamt (2022)

¹⁹ Bundesnetzagentur (2024b)

²⁰ Airbus (2024)

Neben der Marktverfügbarkeit sind beispielsweise auch das Alter der Bestandsflotten, der Verkehrsmix sowie die klimatischen Gegebenheiten am Standort entscheidend für den Status der Umstellung der einzelnen GSE-Kategorien. Ähnlich der Bodenstromversorgung stehen die Flughäfen auch im Bereich GSE verschiedenen Herausforderungen gegenüber (vgl. Kapitel 4.2). Zentral ist hier ebenfalls der oftmals notwendige Ausbau der Ladeinfrastruktur.

Übersicht über Förderprogramme

In diesem Kapitel werden mögliche Förderprogramme für die Umstellung auf klimafreundliches Ground Support Equipment vorgestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass das Bundesverfassungsgerichts am Mittwoch, den 15. November 2023, entschieden hat, dass das Zweite Nachtragshaushaltsgesetz 2021 mit der Schuldenregel des Grundgesetzes (Artikel 109 Absatz 3) sowie mit den Artikeln 110 Absatz 2 und 115 Absatz 2 des Grundgesetzes unvereinbar und damit nichtig ist (Aktenzeichen: 2 BvF 1 / 22). Da die vorgestellten Förderprogramme teilweise Mittel aus dem betroffenen sog. KTF verwenden, können Aussetzungen, Einstellungen oder Kürzungen der genannten Programme möglich werden. Über potenziell geeignete Förderprogramme kann sich auf der Förderdatenbank des Bundes unter foerderdatenbank.de informiert werden. Nähere Informationen zu den Programmen erhalten Sie dann je nach Programm bei der zuständigen Förderorganisation.

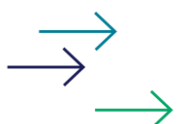
Tabelle 7 gibt eine Übersicht über mögliche Förderprogramme für die Umstellung auf klimafreundliches GSE.

GSE-Kategorie	Förderprogramme mit GSE-Referenzprojekten
Flugzeugschlepper	Elektro Mobil bzw. Erneuerbar Mobil
Förderbandwagen	Elektro Mobil bzw. Erneuerbar Mobil
Gepäck-/Frachtschlepper	Elektro Mobil bzw. Erneuerbar Mobil
Vorfelddbus	Elektro Mobil bzw. Erneuerbar Mobil <i>Hessen: Förderprogramm Elektromobilität</i>

Tabelle 7: Potenzielle Förderprogramme für Ground Support Equipment (GSE)

Ein wichtiges Förderprogramm im Bereich GSE ist das bundesweite **Förderprogramm Elektro-Mobil** des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Die beiden Ministerien bündeln in dieser Förderrichtlinie die Schwerpunkte der bisherigen Programme „Erneuerbar Mobil“ (BMUV) sowie „ELEKTRO POWER I+II“ (BMWK). Die Themenbereiche sind unter anderem Untersuchungen zur Einbindung von Elektrofahrzeugen in logistische Gesamtkonzepte und Untersuchungen zur Ladeinfrastruktur. Eine jährliche Vergabe von Fördermitteln zum 30. April oder an einem festgelegten Tag, je nach spezifischem Förderaufruf, ist bis 2025 vorgesehen. In diesem Rahmen wurden zwei Referenzprojekte identifiziert. In den Jahren 2016 bis 2019 wurde am Flughafen Stuttgart das Projekt „Scale-up! – emissionsfreie Flughafenflotte“ durchgeführt. Insgesamt wurde hier eine Förderung von 1,54 Millionen Euro für 48 Fahrzeuge, darunter Förderbandwagen, Busse, Schlepper und Push-Back-Fahrzeugen, vergeben.²¹ Ein weiteres Referenzprojekt ist das Projekt „Ladeinfrastruktur als bidirektionales Flottenkraftwerk“, welches in den Jahren 2023 bis 2027 am

²¹ Flughafenverband ADV (2022)



Flughafen Frankfurt stattfindet und mit etwa 5 Millionen Euro gefördert wird. Elektrische GSE-Fahrzeuge werden in dem Projekt zu mobilen Speichern, mit der Möglichkeit, ungenutzte Energie bedarfsgerecht in das Netz zurückzuführen.²² Förderungen anderer GSE-Gerätekategorien im Rahmen des Programms sind denkbar, fand bisher jedoch nicht statt oder wurde nicht öffentlich bekanntgegeben.

Auf **Länderebene** gibt es einige Förderprogramme im Themenbereich Elektromobilität. Im Rahmen der hessischen Innovationsförderung im Förderprogramm Elektromobilität wurde beispielsweise das Projekt „New eBus4Fraport“ zur Beschaffung von zwei in der Passagierabfertigung verwendeten Elektrobussen mit 225.000 Euro gefördert. Zudem wird der Aufbau von Ladeinfrastruktur am Flughafen Frankfurt mit 464.000 Euro gefördert.²³ In Baden-Württemberg heißt ein entsprechendes Programm „BW-e-Nutzfahrzeuge“. In Nordrhein-Westfalen ist dies der Programmbereich „Emissionsarme Mobilität“ im Förderprogramm für „Rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen“ (progres.nrw). Ein Zuschuss zum Kauf von Elektrofahrzeugen steht allerdings nur Kommunen zu, natürlichen und juristischen Personen ist nur eine Förderung von Ladeinfrastruktur sowie Umsetzungskonzepten und Studien möglich.²⁴ In vielen weiteren Bundesländern wird der Ausbau von Ladeinfrastruktur gefördert.

Das **Aufsetzen weiterer passender Förderprojekte ist notwendig**, um die Transformation der Energieträger auf dem Flughafenvorfeld voranzutreiben. Die Beschaffungskosten von Systemen mit alternativen Antrieben liegen häufig über den Anschaffungskosten konventioneller Systeme, insbesondere bei energieintensiven Anwendungen. Förderaktivitäten, welche der Defossilisierung des Flughafencampus dienen, sollten auf die Besonderheiten von Flugplätzen eingehen. Etwa, dass viele Fahrzeuge ohne Straßenzulassung genutzt werden und relativ kurze Distanzen aber viele Betriebsstunden anfallen.

Empfehlungen für die Beschaffung von klimafreundlichem GSE

Bei der Beschaffung von klimafreundlichem Ground Support Equipment (GSE) ist eine sorgfältige **Kosten-Nutzen-Analyse** empfehlenswert, um die Wirtschaftlichkeit und die potenziellen Emissionseinsparungen angemessen zu bewerten. Dabei sollten auch verfügbare Förderprogramme zur Finanzierung der Anschaffung von GSE in Betracht gezogen werden, um die Investitionen zu erleichtern. Auf potenzielle Förderprogramme wird im vorherigen Kapitel 0 eingegangen.

Die **Zukunftsfähigkeit neuer Technologien** ist zu berücksichtigen. Damit ist gemeint, inwieweit Technologien in der Lage sind, sich ändernden Anforderungen, Trend und Herausforderungen nachhaltig anzupassen. Die Wahl von am Markt etablierten Produkten und Herstellern minimiert das Risiko, dass beispielsweise Ersatzteile und Services vom Markt verschwinden. Die derzeit gängigste Lösung zur Defossilisierung der GSE-Flotte sind batterieelektrische Geräte. Ratsam ist ebenfalls flexible Lösungen zu wählen, die auch mit zukünftigen Technologieentwicklungen kompatibel sind, um langfristige Investitionen zu schützen. Beispielsweise benötigen batterieelektrische Geräte grundsätzlich Ladeinfrastruktur. Denkbar ist zukünftig die Weiterentwicklung der Zellchemie von

²² Fraport AG (2023)

²³ HA Hessen Agentur GmbH (2024) & Fraport AG (2022)

²⁴ MWIKE NRW (2024)

Batterielösungen. Jedoch würde beim Einsatz von Geräten mit neuer Batterietechnologie voraussichtlich keine neuartige Infrastruktur benötigt.

Des Weiteren sollte bei der Beschaffung von batterieelektrischen Geräten auch der **zukünftige Strombedarf** berücksichtigt werden. Es muss betrachtet werden, bis zu welchem Punkt die vorhandene Netzkapazität ausreicht und ob möglicherweise neue Ladepunkte erforderlich sind. Flughäfen haben generell einen hohen Energiebedarf aufgrund zahlreicher Betriebsaktivitäten auf der Land- und Luftseite sowie im Terminal. Die Elektrifizierung vieler Vorfeldfahrzeuge verursacht weiteren Strombedarf. Die bestehende Strominfrastruktur von Flughäfen ist gegebenenfalls nicht ausreichend dimensioniert, um den zusätzlichen Strombedarf durch das Laden der batterieelektrischen Geräte zu bewältigen. Der Ausbau der Strominfrastruktur kann somit erhebliche Investitionen erfordern.

Beim Kauf von batterieelektrischen Geräten ist es sinnvoll, darauf zu achten, ob der Hersteller eine **Lösung für die Batterie am Ende ihrer Lebenszeit** anbietet, sei es durch Second-Life-Optionen oder Recyclingprogramme. Hersteller sind nach dem deutschen Batteriegesetz zur Rücknahme von Altbatterien verpflichtet. Regelungen zum Recycling der zurückgenommenen Batterien gibt es jedoch nicht. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es ebenfalls ratsam, sich die gesamte Lieferkette anzuschauen. Hierzu zählt unter anderem, ob die Batterien unter Berücksichtigung von Aspekten wie der Nutzung erneuerbarer Energie und der Vermeidung von Abfall hergestellt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die **Servicequalität des Herstellers**. Im Falle von beispielsweise notwendigen Reparaturen und der Inanspruchnahme von Garantieleistungen ist die Möglichkeit einer zeitnahen und flüssigen Kommunikation mit dem Hersteller wichtig. Reparaturen von batterieelektrischen Geräten unterscheiden sich von Reparaturen von Dieselgeräten. Werkstätten benötigen Zusatzschulungen und gegebenenfalls Unterstützung von Herstellerseite. Ein gutes Serviceangebot durch den Hersteller kann helfen, längere Standzeiten von Geräten zu verhindern.

Die Entwicklung der **Wasserstofftechnologie** ist als mögliche zukünftige Alternative für Geräte, die mehr Energiekapazität benötigen, zu beobachten. Gegebenenfalls können Pilotprojekte unterstützt werden, um die Technologieentwicklung voranzutreiben und umfassende Lösungen für nachhaltiges GSE zu fördern. Marktreife Produkte existieren in diesem Bereich noch kaum, es befinden sich aber erste Produkte in Pilotprojekten bei verschiedenen Kunden. Potenzielle Entwicklungen sind im Kapitel 0 beschrieben.

Ausblick

Die zukünftige Entwicklung von Ground Support Equipment (GSE) wird stark von **technologischen Fortschritten** geprägt sein. Insbesondere die Weiterentwicklung von Batterietechnologien und Brennstoffzellensystemen wird eine bedeutende Rolle spielen. In der Vergangenheit fand bereits eine wesentliche Entwicklung im Bereich **Batterietechnologie**, weg von Bleisäurebatterien hin zu Lithium-Ionen-Batterie, statt. Lithium-Ionen-Batterien bieten eine höherer Energiedichte und ermöglichen dadurch eine längere Betriebsdauer und verbesserte Leistungsfähigkeit. Sie sind leichter und kompakter, was beispielsweise die Manövrierfähigkeit der Geräte erhöht. Darüber hinaus sind sie umweltfreundlicher und recyclingfähiger als Bleisäurebatterien. Fortschritte in der



Batterieeffizienz und -kapazität, etwa durch neue Zellchemie, werden auch zukünftig potenziell zu einer erhöhten Kapazität und längeren Betriebsdauer von batterieelektrischem GSE führen.

Die Haltung von Flughäfen gegenüber **Brennstoffzellentechnologie** als zukunftsfähige Antrieb von GSE variiert. Einige Flughäfen sehen eine Chance für den Einsatz bei energieintensiven Geräten und zur Bewältigung der Herausforderung des Lademanagements für batterieelektrisches GSE. Andere Flughäfen sehen bisher keinen Anwendungsfall für Wasserstoffgeräte. Von den gemessen an den Flugbewegungen zehn größten Flughäfen Deutschlands haben sechs ein Nachtflugverbot oder eine Nachtflugbeschränkung. Für diese Flughäfen stellt das Lademanagement von batteriebetriebenen GSE zumindest in den leichteren Fahrzeugklassen keine große Herausforderung dar. Wasserstoffgeräte benötigen neue Infrastruktur, deren Ausbau zeit- und kostenintensiv ist. Bedenken bestehen ebenfalls hinsichtlich der niedrigeren Energieeffizienz von Brennstoffzellenantrieben im Vergleich zu Batterie, wobei auch die systemischen Vorteile einer Wasserstoffnutzung anerkannt werden. Im Moment erfolgt eine Fokussierung auf Lithium-Ionen-Batterien, die eine kosteneffiziente und praktikable Lösung für die Defossilisierung von GSE darstellen.

Zu beobachten ist, dass Wasserstoff von den GSE-Herstellern weiterhin als potenzielle Lösung verfolgt wird. Aktuelle gibt es einige **Entwicklungen und Pilotprojekte**, bei denen **Brennstoffzellen** als Antrieb von GSE zum Einsatz kommen. Der kanadische Brennstoffzellenhersteller Loop Energy gab bekannt, von einem namentlich nicht genannten Original Equipment Manufacturer (OEM) zur Bereitstellung von Brennstoffzellen für den Einsatz in Feuerwehrfahrzeugen ausgewählt worden zu sein. Ein erstes Fahrzeug soll an einem spanischen Flughafen im Betrieb eingesetzt werden.²⁵ Wasserstoffbusse für den Passagierverkehr wurden im Jahr 2023 am Flughafen Köln/Bonn²⁶ und am Flughafen Düsseldorf²⁷ für jeweils einige Wochen getestet. Die getesteten Wasserstoffbusse werden von der deutschen Firma COBUS vertrieben und von dem portugiesischen Hersteller Caetano produziert.²⁸ Weitere aktuelle Entwicklungen und Pilotprojekte sind in Anhang 1 aufgeführt.

Ein wesentlicher Aspekt des Ausbaus von GSE ist die entsprechende **Ladeinfrastruktur**. Zukünftige Entwicklungen werden sich darauf konzentrieren, die Verfügbarkeit und Effizienz von Ladestationen auf Flughäfen zu verbessern. Dies umfasst die Erweiterung der Anzahl von Ladestationen, die Implementierung von Schnellladesystemen und die Integration intelligenter Netzwerklösungen, um die Ladekapazität zu optimieren. Die Zuwendungen im Rahmen der Bodenstrom-Richtlinie des BMDV, bieten Flughäfen die Möglichkeit, nicht nur klimafreundliche Bodenstromsysteme gefördert zu bekommen, sondern darüber hinaus die für den Betrieb der Geräte notwendige Lade- und Betankungsinfrastruktur. Die Implementierung solcher Maßnahmen schafft Anreize für Flughäfen, frühzeitig in nachhaltige Technologien zu investieren und Fahrzeugflotte und Infrastruktur kontinuierlich zu verbessern.

Einige **potenzielle Herausforderungen** könnten den Fortschritt von GSE beeinträchtigen. Dazu gehören technische Probleme, wie begrenzte Reichweite bei batteriebetriebenen GSE und die Notwendigkeit einer zuverlässigen Wasserstoffinfrastruktur für Brennstoffzellensysteme. Darüber hinaus könnten regulatorische Hürden und finanzielle Barrieren die Einführung umweltfreundlicher

²⁵ Loop Energy (2023)

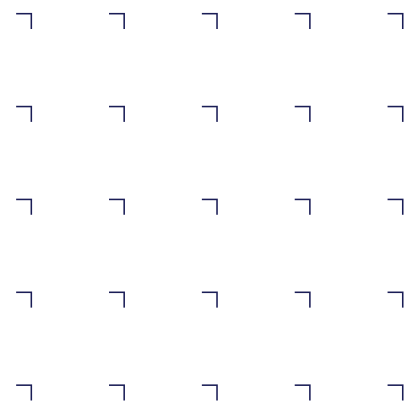
²⁶ Flughafen Köln/Bonn (2023)

²⁷ Flughafen Düsseldorf (2023)

²⁸ CaetanoBus (o.D.)

GSE-Technologien behindern. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Regierungen, Industrie und Stakeholdern, um die Entwicklung und Implementierung nachhaltiger GSE-Lösungen voranzutreiben.

Die **Regulierung** im Bereich der Luftfahrt wird sich voraussichtlich weiter in Richtung emissionsfreier Betriebsabläufe entwickeln, nicht zuletzt, um das Ziel der Klimaneutralität in Deutschland bis spätestens 2045 zu erreichen. Dies könnte zu strengeren Vorschriften und Richtlinien führen, die den Einsatz umweltfreundlicher GSE-Technologien notwendig machen. Es existieren bereits regional Vorgaben zur Lärmregulierung, wodurch Flughäfen auch aus diesem Aspekt zur Nutzung geräuscharmer Systeme angehalten werden. In diesem Zusammenhang könnten auch regulatorisch APU-Betriebszeiten reduziert werden (wie etwa am Flughafen Hamburg²⁹). Flugplatzbetreiber haben die Möglichkeit über den regulatorischen Rahmen hinaus Vorgaben zu den an Ihrem Flugplatz eingesetzten GSE festzulegen. Regierungen könnten Anreize schaffen und Förderprogramme auflegen, um den Übergang zu nachhaltigeren GSE-Lösungen zu unterstützen.



²⁹ Flughafen Hamburg (o.D.)



Quellenverzeichnis

- Airbus (2024). *ZEROe. Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft*. URL: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>, letzter Zugriff: 01. März 2024
- BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2023). *Bekanntmachung der Richtlinie über Zuwendungen zur Förderung alternativer Technologien für die klima- und umweltfreundliche Versorgung von Luftfahrzeugen mit Bodenstrom an Flughäfen (Bodenstrom-Richtlinie)*. URL: https://www.bav.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bodenstrom/FRL_Bodenstrom.pdf?__blob=publicationFile&v=4, letzter Zugriff: 13. Februar 2024
- Boeing (2008). *Preparing Ramp Operations for the 787-8*. URL: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_3_08/pdfs/AERO_Q308_article2.pdf, letzter Zugriff: 02. Januar 2024
- Bundesnetzagentur (2024a). *Internet of Things*. URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Internet/IoT/start.html>, letzter Zugriff 12. Februar 2024
- Bundesnetzagentur (2024b). *Wasserstoff-Kernnetz*. URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html>, letzter Zugriff: 01. März 2024
- CaetanoBus (o.D.). *Leader of Airport Buses. More fascinating than ever*. URL: <https://caetano-bus.pt/en/cobus/>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- CIN – Clean Intralogistics Net (2019). *Plug Power and MULAG to Bring New Hydrogen-Powered Ground Support Vehicles to Hamburg Airport*. URL: <https://www.cleanintralogistics.net/plug-power-and-mulag-to-bring-new-hydrogen-powered-ground-support-vehicles-to-hamburg-airport/>, letzter Zugriff: 01. März 2024
- Dynell (2023). *DFS / DSM 020-180. Solide-state GPU*. URL: <https://www.dynell.at/products/dsf-dsm-020-180>, letzter Zugriff: 05. Februar 2024
- ElectroAir (o.D.a). *Hatch EAPIT Systems*. URL: <https://electroair.eu/product/hatch-pit-systems/>, letzter Zugriff: 05. Februar 2024
- ElectroAir (o.D.b). *Pop-Up PIT systems*. URL: <https://electroair.eu/product/pop-up-pit-systems/>, letzter Zugriff: 05. Februar 2024
- e-mobil BW (2021). *Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte*. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf, letzter Zugriff: 03. Januar 2024
- Europäische Union (2023). *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU*. Amtsblatt der Europäischen Union L 234. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-25-2023-INIT/de/pdf>, letzter Zugriff: 13. Februar 2024



- Flughafen Düsseldorf (2023). *Düsseldorfer Airport testet Wasserstoffbus im Passagierverkehr*. URL: <https://www.dus.com/de-de/konzern/presse/medieninformationen/d%C3%BCsseldorfer-airport-testet-wasserstoffbus-im-passagierverkehr>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- Flughafen Hamburg (o.D.). *Fluglärm und Lärmschutz*. URL: <https://www.hamburg-airport.de/de/unternehmen/umwelt/fluglaerm-und-laermschutz-3686>, letzter Zugriff 01. März 2024
- Flughafen Köln/Bonn (2023). *Wasserstoffbus im Testbetrieb am Airport*. URL: https://www.koeln-bonn-airport.de/am-airport/aktuelles/default-109b6be2b031475_bbc2cb4cf5d339d22.html, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- Flughafenverband ADV (2022). *Emissionsfrei über das Vorfeld - Elektromobilität am Flughafen*. URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/Tag2_Buesing_Emissionsfrei-ueber-das-Vorfeld-Elektromobilitaet-am-Flughafen.pdf, letzter Zugriff: 14. Februar 2024
- Fraport AG (2022). *Pressemitteilung. Hessen und Fraport bringen E-Mobilität voran*. URL: https://www.fraport.com/content/dam/fraport-company/documents/newsroom/medien/pressemappen/2022/klimaschutzziele/pm%C2%B4s/2022_10_12_F%C3%B6rderprojekt%20E-Mobilit%C3%A4t.pdf/jcr_content/renditions/original./2022_10_12_F%C3%B6rderprojekt%20E-Mobilit%C3%A4t.pdf, letzter Zugriff: 14. Februar 2024
- Fraport AG (2023). *E-Projekt am Airport nutzt Ladeinfrastruktur als bidirektionales Flottenkraftwerk*. URL: <https://www.fraport.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2023/q4/e-projekt-am-airport-nutzt-ladeinfrastruktur--als-bidirektionale.html>, letzter Zugriff: 14. Februar 2024
- Gaussin (o.D.a). *AAT*. URL: <https://www.gaussin.com/aat>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- Gaussin (o.D.b). *ART*. URL: <https://www.gaussin.com/art>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- Groningen Airport Eelde (2023). *World first at Groningen Airport Eelde: hydrogen GPU unveiled*. URL: <https://www.groningenairport.nl/en/news/world-first-at-groningen-airport-eelde-hydrogen-gpu-unveiled>, letzter Zugriff: 13. Februar 2024
- Guinault (o.D.). *Mobile Solutions GPU (Ground Power Unit)*. URL: <http://www.guinault.com/de/luftfahrt/gpu/>, letzter Zugriff: 06. Februar 2024
- HA Hessen Agentur GmbH (2024). *Innovationsförderung Hessen. Projektbeispiele*. URL: <https://www.innovationsfoerderung-hessen.de/projektbeispiele>, letzter Zugriff: 14. Februar 2024
- ITW GSE (2024). *ITW GSE 2400 Power Coil*. URL: <https://itwgse.com/de/produkte/bodenstrom/itwgse-2400-power-coil/>, letzter Zugriff: 05. Februar 2024
- ITW GSE (o.J.). *ITW GSE 7400 eGPU. Batteriebetriebenes Bodenstromaggregat 90 - 140 - 180 kVA. Zur Verfügung gestellte Unternehmenspräsentation*.
- Loop Energie (2023). *Loop Energy Secures Design Win with Global Fire Truck and Special Purpose Vehicle Manufacturer*. URL: <https://loopenergy.com/news/loop-energy-secures-design-win-with-global-fire-truck/>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024

- MWIKE NRW – Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2024). *ElektroMobilität NRW*. URL: <https://www.elektromobilitaet.nrw/index/>, letzter Zugriff: 14. Februar 2024
- NXT Airport (2022). *Development of hydrogen Ground Power Unit at Groningen Airport Eelde*. URL: <https://www.nxtairport.nl/en/portfolio-items/development-of-hydrogen-ground-power-unit-at-groningen-airport-eelde/>, letzter Zugriff: 13. Februar 2024
- Umweltbundesamt (2022). *Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs)*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#einleitung>, letzter Zugriff: 12. Februar 2024
- Umweltbundesamt (2021). *Die Ökobilanz von Personenkraftwagen. Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung*. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>, letzter Zugriff: 29.02.2024
- VDI (2022). *Wasserstoff für den Schienenverkehr*. URL: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/wasserstoff-fuer-den-schienenverkehr>, letzter Zugriff: 03. Januar 2024
- TLD (2024a). *NBL-E*. URL: <https://www.tld-group.com/de/produkte/forderbandwagen/nbl-e-2/>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- TLD (2024b). *TMX-150-E*. URL: <https://www.tld-group.com/de/produkte/konventionelle-flugzeugschlepper/tmx-150-e-2/>, letzter Zugriff: 15. Februar 2024
- TULIPS (2024). URL: https://www.linkedin.com/posts/tulips-green-airports_hydrogen-fuelcell-technology-activity-7158831338983231488-HJ1Y/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop, letzter Zugriff: 19. Februar 2024
- TÜV NORD (o.D.). *Wirkungsgrad - Die Nutzbarkeit der Energie*. URL: <https://www.tuev-nord.de/de/privatkunden/verkehr/auto-motorrad-caravan/elektromobilitaet/wirkungsgrad/>, letzter Zugriff: 12. Februar 2024

