

Verband öffentlicher Verkehr VöV

Technologiestudie Elektrobusse 2026

Zürich, 12. Januar 2026

Roberto Bianchetti, Oliver Frei, Julien McTighe



Impressum

Technologiestudie Elektrobusse 2026

Zürich, 12. Januar 2026

Auftraggeber

Verband öffentlicher Verkehr VöV

Projektleitung

Andreas Zemp, Koordinationsstelle neue Antriebsarten, VöV

Autor:innen

Roberto Bianchetti, Oliver Frei, Julien McTighe

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Begleitgruppe

Andreas Zemp, Koordinationsstelle neue Antriebsarten, VöV

Beat Hinni, Fachexperte Bus, VöV

Inhalt

| | |
|---|----|
| Zusammenfassung | 4 |
| Résumé | 5 |
| Riassunto | 6 |
| 1. Einleitung | 7 |
| 1.1. Ausgangslage | 7 |
| 1.2. Zweck und Nutzen der Studie | 7 |
| 1.3. Struktur des Berichts | 7 |
| 2. Teil I: Technologische Entwicklungen | 9 |
| 2.1. Marktentwicklung E-Busse und alternative Antriebe | 9 |
| 2.2. Überblick Antriebskonzepte und Batteriebusse | 12 |
| 2.3. Strombasierte Treibstoffe | 32 |
| 2.4. Biotreibstoffe | 42 |
| 2.5. Energieeffizienz verschiedener Antriebstechnologien | 44 |
| 2.6. Politische Rahmenbedingungen und Fördermittel | 45 |
| 3. Teil II: Vertiefung E-Busse und Umstellungsstrategien | 47 |
| 3.1. Systemgrenze und Abgrenzung | 47 |
| 3.2. Kostenentwicklung | 47 |
| 3.3. Anforderungen an der Infrastruktur | 52 |
| 3.4. Anforderungen an die IT-Umgebung | 57 |
| 3.5. Auswirkungen auf den Betrieb | 59 |
| 3.6. Umstellungsstrategien mit Batteriebussen | 61 |
| 4. Fazit und Umsetzung bei den Transportunternehmen | 63 |
| 4.1. Technologische Entwicklung | 63 |
| 4.2. Umsetzung bei den Transportnehmern | 64 |
| Glossar | 65 |
| Literatur | 66 |

Zusammenfassung

- Die aktuelle Marktentwicklung zeigt deutlich, dass die Elektrifizierung des Busverkehrs in Europa und der Schweiz weiter voranschreitet. Der Anteil der Batteriebusse an den neu zugelassenen Linienbussen in der Schweiz beträgt bereits rund 55%, im Bestand liegt er bei knapp 10% bzw. 17% einschliesslich der reinen Trolleybusse. Brennstoffzellenbusse spielen in der Schweiz bislang keine relevante Rolle.
- Bei den Ladekonzepten zeigt sich – analog zu Deutschland – ein klarer Trend hin zu reinen Depotladern, ergänzt bei Bedarf durch Kombilader, die unterwegs über einen Pantographen an dezentralen Ladestationen laden können. Reine Gelegenheitslader mit kleinen, leistungs- optimierten Batterien stehen hingegen nicht mehr im Fokus.
- Der Batteriemarkt bleibt dynamisch, mit weiteren Preissenkungen in Aussicht. Die Bedeutung von Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) nimmt weiter zu. Insbesondere in Europa ist eine Marktstabilisierung zu erwarten. Ab ca. 2040 werden höhere Energiedichten durch neue Zellchemien und Technologien grössere Reichweiten ermöglichen.
- Ab Februar 2027 müssen gemäss der EU-Batterieverordnung (2023/1542) Batterien über einen digitalen Batteriepass verfügen, der Informationen zu Herkunft, Zusammensetzung, CO₂-Fussabdruck, Leistungsdaten und Recyclingfähigkeit enthält und damit Transparenz entlang der gesamten Wertschöpfungskette sicherstellt.
- Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff bleibt begrenzt. Biotreibstoffe können als Übergangstechnologie dienen, diese sind jedoch aufgrund der steigenden Nachfrage in der Schweiz nur eingeschränkt verfügbar. Wasserstoffverbrenner-Busse sind im Linienverkehr aufgrund des geringen Wirkungsgrads und der fehlenden Modellverfügbarkeit keine Option.
- Batteriebusse schneiden bei Energieeffizienz, Gesamtkosten und Umweltauswirkungen im Vergleich zu anderen fossilfreien Antriebstechnologien am besten ab.
- Mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad steigt die Komplexität der Flottenumstellung. Dies führt zu höheren Anforderungen an die IT-Systemlandschaft und die Ladeinfrastruktur.
- Bei der Elektrifizierung entsteht ein Wechselwirkungsdreieck zwischen Umlaufplanung, La- dezeiten und der Anzahl benötigter Fahrzeuge. Diese Faktoren beeinflussen sich gegenseitig und müssen systemisch optimiert werden.
- Es bestehen verschiedene Strategien zur vollständigen Flottenumstellung bzw. zur Elektrifi- zierung anspruchsvoller Umläufe: Optimierung der Umläufe, Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge als Depotlader, Kombilader mit dezentralen Ladestationen oder das Abwarten technischer Reichweitensteigerungen.

Résumé

- L'évolution actuelle du marché indique clairement que l'électrification du trafic par bus continue de progresser, en Suisse et en Europe. La proportion des bus à batteries parmi les nouvelles immatriculations de bus de ligne représente déjà 55 % en Suisse, presque 10 % du total des flottes ou 17 % des trolleybus purs. Les bus à pile à combustible ne jouent pas de rôle important jusqu'à présent en Suisse.
- Concernant les concepts de recharge, il y a une tendance claire – comme en Allemagne – vers la recharge en dépôt, complété si nécessaire par la recharge combinée au dépôt et pendant le trajet via un pantographe à des stations de recharge décentralisées. La recharge d'opportunité pure avec des petites batteries optimisée n'est plus au centre de l'attention.
- Le marché des batteries reste dynamique, avec des nouvelles baisses de prix en perspective. L'importance des batteries au phosphate de fer et de lithium (LFP) continue de croître. Une stabilisation du marché est attendue, en particulier en Europe. À partir de 2040 environ, de nouvelles chimies cellulaires et de nouvelles technologies permettront des densités énergétiques plus élevées, et donc des autonomies plus grandes.
- À partir de février 2027, conformément au règlement de l'UE (2023/1542), les batteries devront disposer d'un passeport de batterie numérique contenant des informations sur leur origine, leur composition, leur empreinte carbone, leurs données de performance et leur recyclabilité, garantissant ainsi la transparence tout au long de la chaîne de valeur.
- La disponibilité de l'hydrogène vert reste limitée. Les biocarburants peuvent servir de technologie de transition, mais leur disponibilité est restreinte en Suisse. Les bus à moteur thermique à hydrogène ne sont pas une option pour le trafic par bus de ligne en raison de leur faible efficacité et du manque de modèles disponibles.
- Les bus à batterie obtiennent les meilleurs résultats en matière d'efficacité énergétique, de coût total et d'impact environnemental par rapport aux technologies de propulsion alternatives (sans énergie fossile).
- Plus le degré d'électrification augmente, plus la transformation de la flotte devient complexe. En conséquence, les exigences en matière d'environnement informatique et d'infrastructure de recharge sont plus élevées.
- L'électrification crée un triangle d'interactions entre la planification des rotations, la durée de recharge et le nombre de véhicules nécessaires. Ces facteurs s'influencent mutuellement et doivent être optimisés de manière systémique.
- Il existe différentes stratégies pour transformer entièrement la flotte ou pour électrifier les rotations exigeants : optimisation des rotations, utilisation de véhicules supplémentaires pour la recharge au dépôt, recharge combinée avec des stations de recharge décentralisées ou attente d'augmentations techniques de l'autonomie.

Riassunto

- Gli attuali sviluppi del mercato mostrano chiaramente che l'elettrificazione del trasporto in autobus in Europa e in Svizzera continua ad avanzare. In Svizzera, la quota degli autobus a batteria tra gli autobus di linea di nuova immatricolazione ammonta già a circa il 55%; nel parco veicoli esistente è di poco inferiore al 10%, o al 17% includendo i filobus puri. Gli autobus a celle a combustibile non hanno finora alcun ruolo rilevante in Svizzera.
- Per quanto riguarda i concetti di ricarica, analogamente alla Germania, si osserva una chiara tendenza verso i veicoli con ricarica solo in deposito, integrati, se necessario, dai veicoli con ricarica combinata che possono ricaricarsi in viaggio tramite pantografo presso le stazioni di ricarica decentralizzate. Al contrario, i veicoli con batterie piccole e ottimizzate per la potenza, che effettuano ricariche occasionali, non sono più al centro dell'attenzione.
- Il mercato delle batterie rimane dinamico, con ulteriori cali dei prezzi in vista. L'importanza delle batterie al litio-ferro-fosfato (LFP) continua ad aumentare; in Europa è tuttavia prevista una stabilizzazione del mercato. A partire dal 2040 circa, densità energetiche più elevate, ottenute grazie a nuove chimiche delle celle, consentiranno autonomie maggiori.
- A partire dal febbraio 2027, in conformità con il regolamento UE sulle batterie (2023/1542), le batterie dovranno disporre di un passaporto digitale della batteria, che contenga informazioni sull'origine, la composizione, l'impronta di carbonio, i dati sulle prestazioni e la riciclabilità e garantisca così la trasparenza lungo l'intera catena del valore.
- La disponibilità di idrogeno verde rimane limitata. I biocarburanti possono fungere da tecnologia di transizione, ma in Svizzera sono disponibili solo in misura limitata a causa della crescente domanda. Gli autobus con motore termico a idrogeno non sono un'opzione per il servizio di linea a causa del basso rendimento e della mancanza di disponibilità di modelli.
- Gli autobus a batteria ottengono i risultati migliori in termini di efficienza energetica, costi totali e impatto ambientale rispetto ad altre tecnologie prive di combustibili fossili.
- Con l'aumentare del grado di elettrificazione, la conversione della flotta diventa sempre più complessa. Ciò comporta requisiti più elevati per l'architettura dei sistemi IT e per l'infrastruttura di ricarica.
- Con l'elettrificazione si crea un triangolo di interdipendenza tra la pianificazione delle rotazioni, i tempi di ricarica e il numero di veicoli necessari. Questi fattori si influenzano a vicenda e devono essere ottimizzati a livello sistematico.
- Esistono diverse strategie per la completa conversione della flotta o per l'elettrificazione delle rotazioni più impegnative: l'ottimizzazione delle rotazioni, l'impiego di veicoli aggiuntivi con ricarica solo in deposito, l'utilizzo di veicoli con ricarica combinata con stazioni di ricarica decentralizzate, o l'attesa un aumento dell'autonomia degli autobus a batteria.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die meisten Transportunternehmen des öffentlichen Verkehrs (TU) planen, ihre Flotte schrittweise auf fossilfreie Antriebe umzustellen. Dazu beschaffen zahlreiche TU derzeit bzw. in den nächsten Jahren fossilfreie Linienbusse, errichten Ladepunkte in ihren Depots und betreiben teilweise dezentrale Schnellladestationen an Busknotenpunkten.

In den letzten Jahren haben sich die technologischen Entwicklungen im Bereich fossilfreier Antriebssysteme – insbesondere bei batterieelektrischen Bussen – merklich beschleunigt. Die hohe Markt- und Produktdynamik beeinflusst die Entscheidungsprozesse von TU zunehmend. Diese Entwicklung wirkt jedoch nicht nur fördernd, sondern auch hemmend: Viele TU sehen sich mit Unsicherheiten konfrontiert, beispielsweise in Bezug auf den aktuellen Stand der Technik oder künftige technologische Entwicklungen. Oft fehlt ein strukturierter Überblick über den Stand des Wissens, der bestehende, herstellerneutrale Grundlagen und Informationen konsolidiert sowie konkrete Entscheidungsgrundlagen bietet.

1.2. Zweck und Nutzen der Studie

Die vorliegende Technologiestudie zeigt eine aktuelle Darstellung der Technologiestände bezüglich Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur sowie deren künftige Entwicklungen auf, wobei der Fokus besonders auf der Elektromobilität liegt. Die Studie dient der Branche als Entscheidungshilfe für Umstellungsstrategien und zeigt wichtige Aspekte rund um die Antriebsarten, die Infrastruktur, die Entwicklung von Reichweiten und Kosten auf.

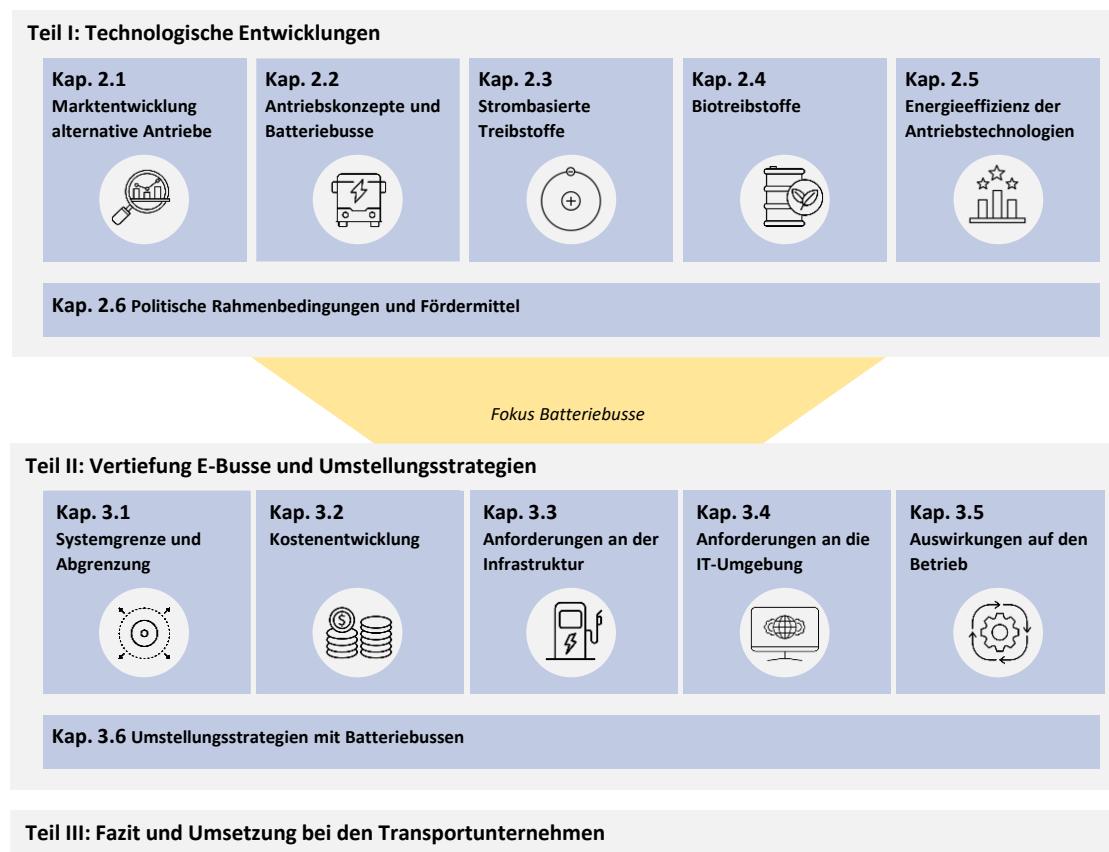
Zielgruppe der Studie sind relevante Entscheidungsträger der Transportunternehmen, Besteller, Stakeholder der Branche, Fachleute und die Öffentlichkeit.

1.3. Struktur des Berichts

Der erste Teil des Berichts widmet sich den aktuellen und relevanten Entwicklungen sämtlicher fossilfreier Antriebstechnologien (vgl. Abbildung 1). Dabei werden sowohl technische und marktbezogene Aspekte auf internationaler und nationaler Ebene als auch die politischen Rahmenbedingungen beleuchtet.

Im zweiten Teil liegt der Fokus auf Batteriebusse sowie Umstellungsstrategien für Transportunternehmen, die ihre Technologieentscheidung bereits getroffen haben und sich in einem fortgeschrittenen Umstellungsprozess befinden. In diesem Zusammenhang werden zentrale Aspekte untersucht, die für die vollständige Elektrifizierung der Flotte relevant sind. Dazu gehören insbesondere die Kostenentwicklung, die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur und die IT-Umgebung. Die Auswirkungen auf den Betrieb runden diesen Abschnitt ab.

Abbildung 1: Übersicht der Berichtsstruktur



Grafik INFRAS.

Der letzte Teil des Berichts formuliert Handlungsempfehlungen für die Branche und zeigt auf, welche Umstellungsstrategien sich aus den Erkenntnissen ableiten lassen.

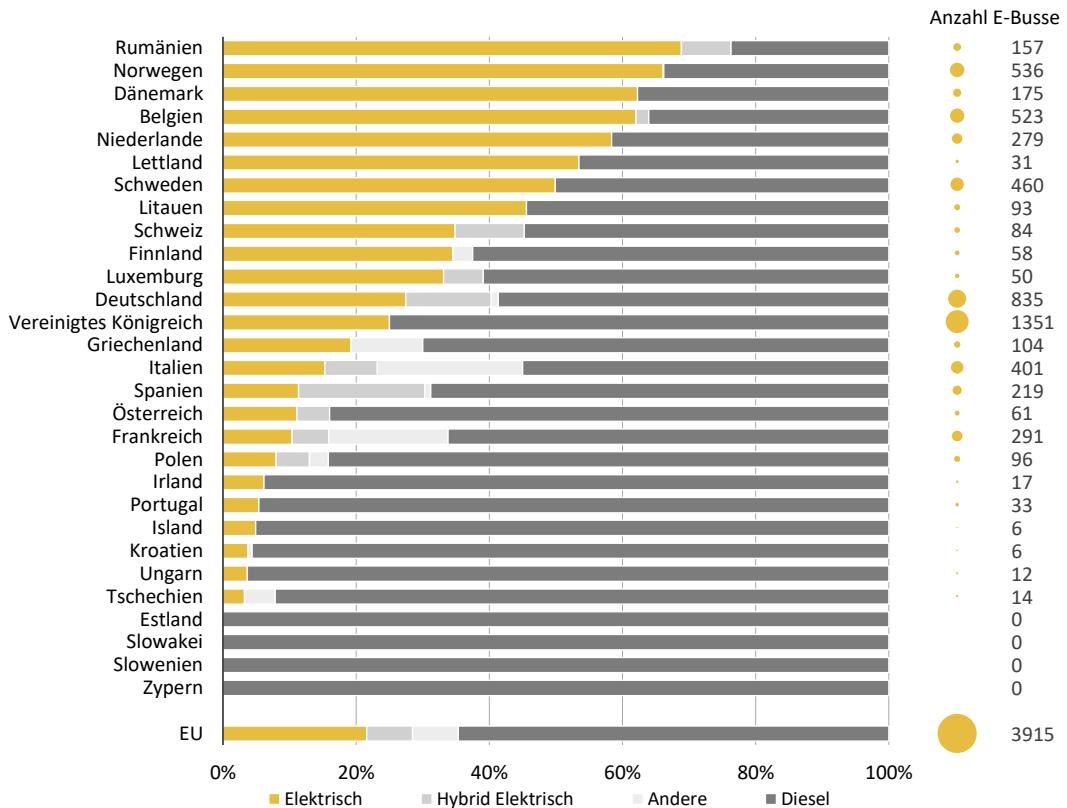
2. Teil I: Technologische Entwicklungen

2.1. Marktentwicklung E-Busse und alternative Antriebe

Entwicklung in Europa

Neuzulassungen von Elektrobussen in der EU sind im ersten Halbjahr 2025 im Vergleich zu 2024 um 26% gestiegen, der Marktanteil von 16% auf 22% (vgl. Abbildung 2). Die Verkäufe von Hybridbussen sind um 35% zurückgegangen, sodass sie nun nur noch 7% der Neuzulassungen ausmachen. Bei den Dieselbussen sind die Neuzulassungen um 7% zurückgegangen, wodurch sich ihr Marktanteil um einen Prozentpunkt auf 65% verringert hat. Mit einem Elektrobusanteil von 35% liegt die Schweiz deutlich über dem europäischen Durchschnitt. Deutschland ist mit einem Wachstum von 105% und 835 Einheiten der grösste E-Bus-Markt in der EU. Der zweitgrösste Markt ist Norwegen mit einem Wachstum von 173% und 536 Einheiten. Belgien folgt auf Platz drei mit einem Anstieg um 375% auf 523 zugelassene Einheiten.

Abbildung 2: Neuzulassungen emissionsfreier Busse Q1-Q2 2025 in Europa

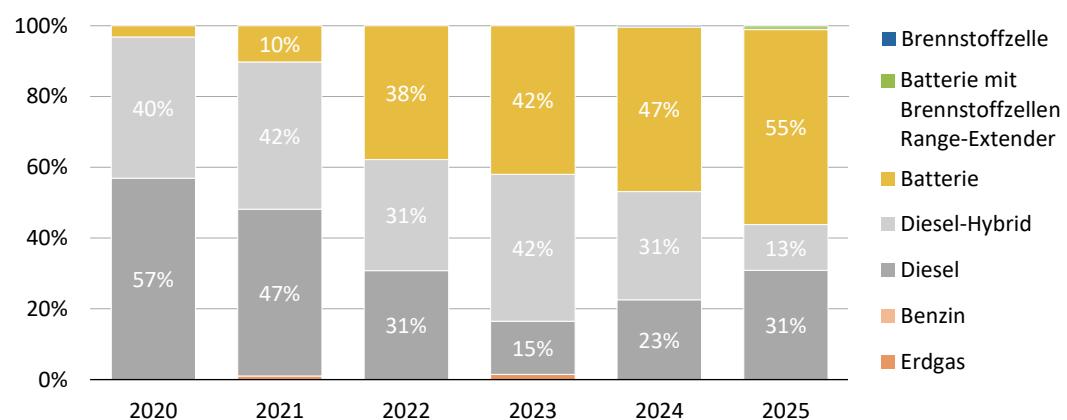


Grafik INFRAS. Quelle: ACEA 2025. Daten für Linienbusse und Reisebusse. Andere umfasst: Brennstoffzellenbusse, Biogas oder Biokraftstoffen.

Entwicklung in der Schweiz

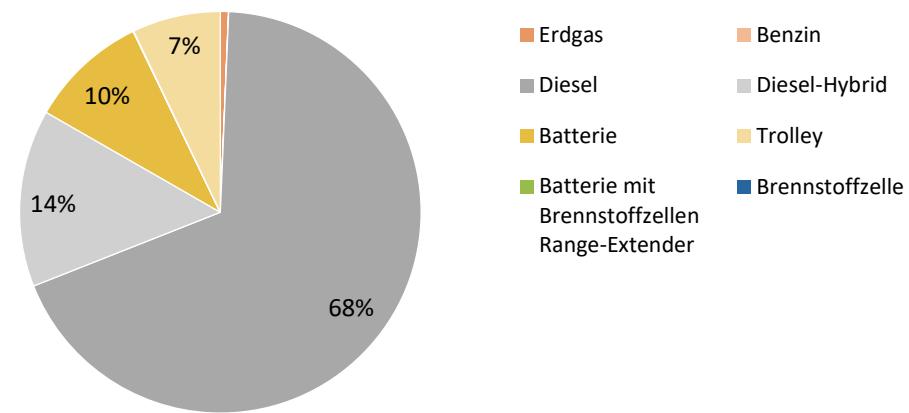
Der Anteil der Batteriebusse an den neuzugelassenen Linienbussen¹ ist im laufenden Jahr weiter gestiegen und beträgt bereits 55% (BAV 2025). Der Anteil an Dieselbusse ist wieder leicht auf 31% gestiegen, während Dieselhybride nach starkem Rückgang nun 13% der Neuzulassungen ausmachen (vgl. Abbildung 3). Brennstoffzellenbusse spielen weiterhin keine Rolle.

Abbildung 3: Entwicklung Neuzulassungen Linienbusse in der Schweiz



Grafik INFRAS. Quelle: BAV 2025. Stand 15.08.2025. Bemerkung: Robuste Zahlen für das Jahr 2025 werden im April 2026 verfügbar sein.

Abbildung 4: Aktueller Bestand Linienbusse in der Schweiz



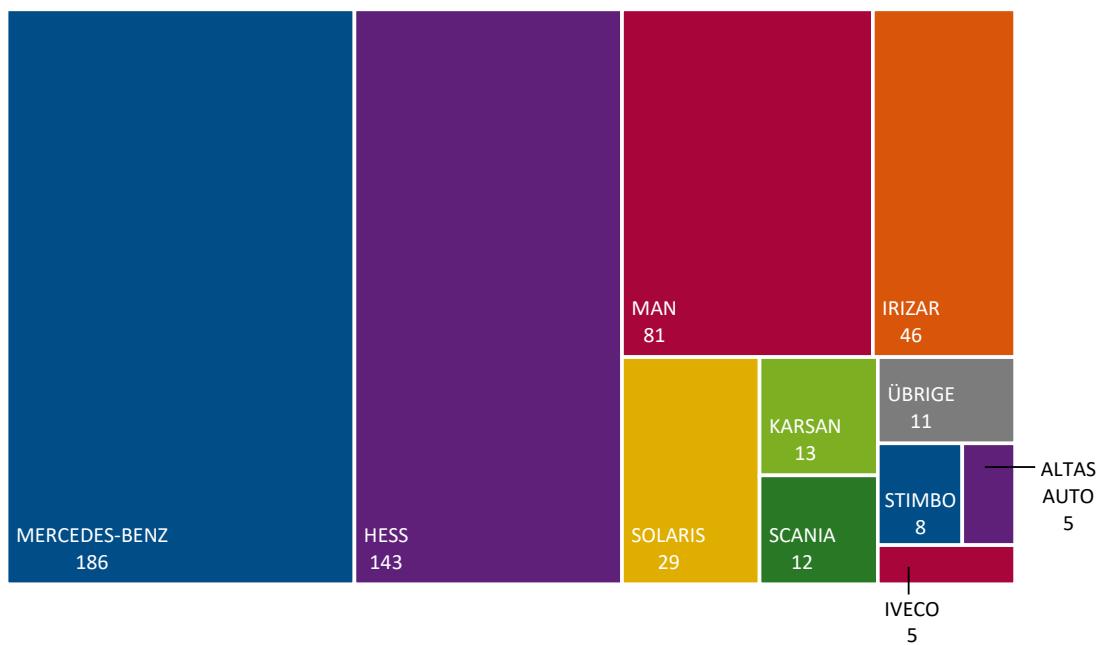
Grafik INFRAS. Quelle: BAV 2025. Stand 15.08.2025

¹ Werte beziehen sich auf den Bestand und die Neuzulassungen von Linienbussen (Gelenkbusse, Standardbusse, Kleinbusse) exklusiv Voll-Trolleybusse. Batterie-Trolleybusse welche mehr als 50% fahrleitungslos verkehren zählen zu den Elektrobussen.

Derzeit sind in der Schweiz rund 7'200 Linienbusse registriert. Davon werden 511 Busse vollständig über Oberleitungen (Voll-Trolleybusse) betrieben. Zusätzliche 687 Busse sind batterie-elektrisch angetrieben. Damit macht der Bestand an batterieelektrischen Bussen in der Schweiz knapp 10% der gesamten Linienbusflotte aus (vgl. Abbildung 4). 77% davon wurden 2022 und später in Verkehr gesetzt. Derzeit sind nur 1 Brennstoffzellenbus (BZEB) und 2 Batteriebusse mit Brennstoffzellen Range-Extender (BZ-REX) registriert. Diesel- und Diesel-Hybridbusse machen den Grossteil des verbleibenden Bestands aus, mit einem Anteil von 68% bzw. 14%.

In der Schweiz spielen HESS, Mercedes-Benz und MAN eine wichtige Rolle im E-Bus-Markt. Diese drei Marken machen zusammen 74% des E-Busbestandes in der Schweiz aus. Danach kommen Irizar mit 8%, Solaris mit 5%, Karsan mit 2% und Scania mit 2%. Bisher spielen chinesische Hersteller in der Schweiz (noch) keine Rolle.

Abbildung 5: E-Busbestand der Schweiz nach Marke



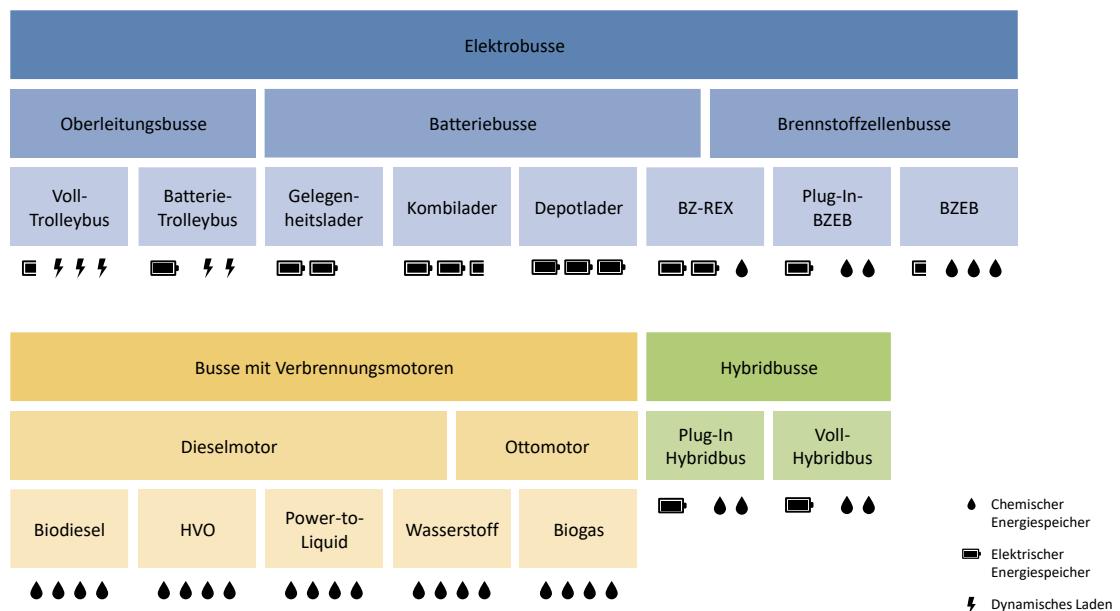
Bemerkung: Die Zahlen in der Grafik geben den Bestand an E-Bussen je Marke in der Schweiz an.

Grafik INFRAS. Quelle: ASTRA 2025. Stand 03.01.2025.

2.2. Überblick Antriebskonzepte und Batteriebusse

Die fossilfreien Antriebstechnologien sind in Abbildung 6 dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden die relevanten Entwicklungen der einzelnen Antriebskonzepte, mit Fokus auf Batteriebusse, näher betrachtet.

Abbildung 6: Antriebskonzepte in der Übersicht



BZ-REX: Brennstoffzellen Range-Extender, BZEB: Brennstoffzellenbus, HVO: Hydrierte Pflanzenöle

Grafik INFRAS

Für die Nachladung von E-Bussen sind eine Vielzahl von Konzepten im Einsatz. Im Wesentlichen wird zwischen Depotladern, Kombiladern und Gelegenheitsladern unterschieden (Abbildung 7):

- *Depotlader* verfügen über grosse Batterien und werden vollständig im Depot geladen. Die gängigsten Lademöglichkeiten sind Steckerladung mit CCS Combo 2 sowie Dachladung mit Pantographen.
- Zum Ansatz *Kombilader* zählen Konzepte, welche im Zwischenbereich zwischen Depotlader und statischem Gelegenheitslader liegen. Sie verfügen über grosse Batterien, werden im Depot geladen, können gelegentlich an Haltestellen mit Pantographen nachgeladen werden.
- *Gelegenheitslader (statisch)* verfügen über kleine Batterien und werden an den Haltestellen nachgeladen. Das Gelegenheitsladen unterwegs erfolgt in der Regel über einen Pantographen. In der Schweiz werden aktuell zwei Systeme (Panto-up und Panto-down) zu je ca. 50% eingesetzt. Weiter gibt es auch wenig verbreitete Ladetechnologien, wie z.B. das Grid-

eMotion Flash (TOSA), die Seiten-Docking-Station oder das induktive Laden. Letzteres hat sich in der Schweiz bisher nicht etabliert.

- *Gelegenheitslader (dynamisch)* laden über Fahrleitungen (Voll-Trolleybusse oder Batterie-Trolleybusse) und werden hier nicht weiter behandelt.

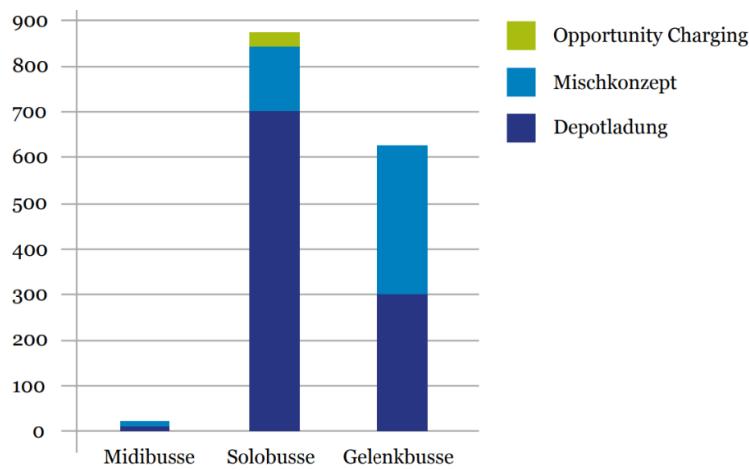
Abbildung 7: Ladekonzepte für Batteriebusse

| Depotlader <i>Stationäres Laden/Nachladen im Depot</i> | Kombilader <i>Kombination der Konzept Depot- und Gelegenheitslader</i> | Gelegenheitslader statisch <i>Stationäres Laden an End-/Zwischenstationen</i> | Gelegenheitslader dynamisch <i>Laden über Fahrleitung (Batterietrolleybus oder IMC)</i> |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grosse, energieoptimierte Batterie (max. 3 – 3.5 t bei 12 m Bus) ▪ Reichweite 12 m-Bus pro Ladung: heute ca. 190 km, längerfristig bis 400 km ▪ Ladeleistung im Depot i.d.R. mit 150 kW ▪ Ladedauer 3-5 h nachts (je nach Einsatzlänge) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grosse, energieoptimierte Batterie ▪ Stationäres Laden im Depot plus Nachladen an Endhaltestellen ▪ Grosse Reichweite bereits heute möglich (bei genügend Ladezeit an Endhaltestellen) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleine, leistungsoptimierte Batterie (< 1 t) ▪ Reichweite pro Ladung ca. 30 km ▪ Ladeleistung 450/600 kW ▪ Ladedauer: i.d.R. 3-5 Min. (abhängig von Linienlänge) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleine, leistungsoptimierte Batterie (< 1 t) ▪ Elektrifizierter Streckenanteil von 50 – 60% ▪ Ladeleistung 120 kW |

Grafik INFRAS.

Die ersten Elektrobus-Projekte wurden vorwiegend als Gelegenheitslader mit kleinen, leistungsoptimierten Batterien und Ladeinfrastruktur an End- und/oder einzelnen Zwischenhaltestellen entlang der Strecke ausgeführt (z.B. TPG in Genf). Seit einiger Zeit setzen die TU vermehrt auf Depotlader. Verantwortlich dafür ist der technologische Fortschritt bei den Batterien, der zu einer deutlichen Steigerung der Reichweiten pro Ladung führt.

Abbildung 8: Anzahl geförderter Elektrobusse 2018-2023 in Deutschland nach Ladekonzepten



Grafik INFRAS. Quelle: PwC 2024

Heute dominieren sowohl im europäischen Raum als auch in der Schweiz immer mehr E-Busse mit grossen Batterien, die ausschliesslich im Depot geladen werden (sog. Depotlader). Bei den in Deutschland geförderten Modellen (Stand 2018–2023) wird deutlich, dass der Gelegenheitslader eine untergeordnete Rolle spielt, während der Kombilader – insbesondere bei den Gelenkbussen – zunehmend an Bedeutung gewinnt (vgl. Abbildung 8). Beispielsweise setzen die BVG in Berlin seit kurzem auf Linien mit längeren Einsatzzeiten auch Gelenkbusse als Kombilader mit einzelnen dezentralen Ladestationen ein.

Für anspruchsvolle Strecken mit langen Tageseinsätzen, für welche die Reichweiten ohne Nachladen (noch) nicht ausreichen, kommt zudem der Kombilader (Depotlader, der auch auf der Strecke nachlädt) zum Einsatz. In der Schweiz wurden Kombilader beispielsweise in Schaffhausen und Yverdon beschafft.

Abbildung 9: Überblick über verschiedene Ladekonzepte von Batteriebussen in der Schweiz

| Stand 2025 | Depotlader | Kombilader | Gelegenheitslader | Strategie (ohne Trolleybusse) (statisch) |
|---|---------------|---|---|---|
| Rein zentrale Ladeinfrastruktur | VBL |  | | Bis 2040 emissionsarme Flotte |
| | VBSG |  | | Bis ca. 2035 voll elektr. /alt. Antr. |
| | VBZ |  | | Bis 2030 voll elektrisch |
| | asm |  | | Bis 2040 elektrische Flotte |
| | sti |  | | Bis 2040 elektrische Flotte |
| Sowohl zentrale als auch dezentrale Ladeinfrastruktur | BVB |  |  | Bis 2027 voll elektrisch |
| | PostAuto AG |  |  | Bis 2040 fossilfreie Flotte |
| | tl (Lausanne) |  |  | Bis 2030 voll elektrisch |
| | vbsh |  |  | Bis 2028 dieselfreier Stadtverkehr |
| | VMCV |  |  | Bis ca. 2035 klimaneutral |
| | ZVB |  |  | Bis 2040 fossilfreie Flotte |
| | Bernmobil |  |  | Bis 2035 CO ₂ -neutrale Flotte |
| Rein dezentral | TPG | |  | Bis 2030 voll elektrisch |

Grafik INFRAS. Quelle: Interviews mit TU, Internetrecherche. Bemerkung: Kein Anspruch auf Vollständigkeit. Die Angaben zeigen, welche Ladekonzepte bereits umgesetzt sind oder im Rahmen der jeweiligen Dekarbonisierungsstrategien geplant werden. Es ist jedoch möglich, dass im Rahmen von Pilotprojekten oder während Übergangsphasen vereinzelt auch andere Ladekonzepte bei den Transportunternehmen zum Einsatz kommen. Dynamische Gelegenheitslader/Trolleybusse sind nicht berücksichtigt.

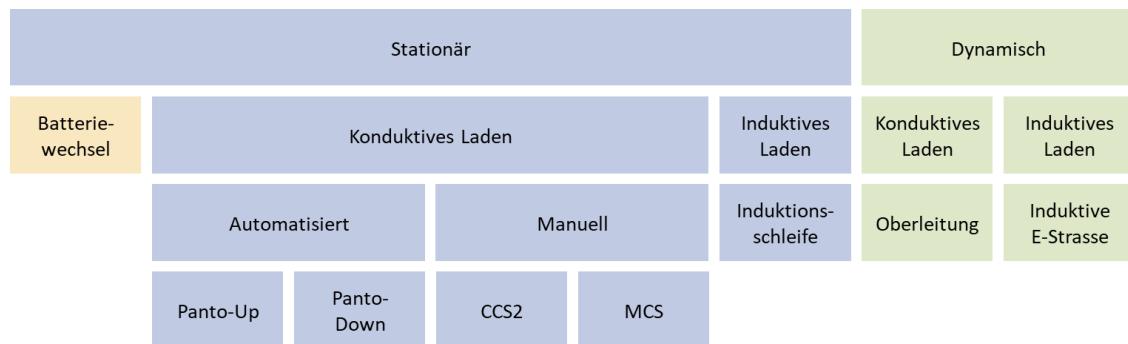
2.2.1. Ladeschnittstellen

Abbildung 10 zeigt die Möglichkeiten des Ladens von Elektrobussen. Die gängigsten Ladeschnittstellen umfassen das konduktive Laden über einen CCS Combo 2-Stecker sowie das Dachladen mit einem aufsteigenden («Panto-Up» auf dem Fahrzeugdach montiert, erhebt sich zu den Lademasten) oder absteigenden («Panto-Down» an einem Masten montiert, senkt sich zum Fahrzeug) Pantographen. Im öffentlichen Verkehr wurde das Laden über Stecker als

Mindeststandard übernommen, um einen interoperablen Betrieb zu gewährleisten, insbesondere für das Laden in Depots.

Gelegenheitsladungen werden in der Regel mithilfe von Pantographen durchgeführt. In der Schweiz werden beide Systeme (Panto-up und Panto-down) zu ca. 50% bei den verschiedenen TU eingesetzt. Lösungen mit Pantographen kommen auch bei Depotlader-Konzepten vor und sind vor allem im Hinblick auf automatisierte Abläufe in den Betriebshöfen interessant. Es bestehen auch noch andere, wenig verbreitete Ladetechnologien, wie z.B. die Seiten-Docking-Station, induktives Laden oder das Grid-eMotion Flash (TOSA-System), die jedoch selten eingesetzt werden.

Abbildung 10: Ladeschnittstellen in der Übersicht



Grafik INFRAS.

Erfahrungen mit Pantographen

Diverse Transportunternehmen haben sich für das Panto-Up-Konzept entschieden (u.a. ZVB, vbsh und BVB). Die Erfahrung zeigt, dass im Falle eines Defekts an den Stromabnehmern nur ein Bus repariert werden muss, während der Betrieb auf der gesamten Linie fortgesetzt werden kann. Die Anpassung des Depots mit Stromabnehmern zur Ladung ist einfacher zu handhaben und kostengünstiger als das Panto-Down-Konzept. Bei den BVB wird diese Lösung im Depot eingesetzt und das autonome Parken im Depot mit Panto-Up ist geplant.

Es gibt auch TU, die sich für das Panto-Down-Konzept (z.B. PostAuto und Bernmobil) entschieden haben. Grund ist die höheren Batteriekapazität für lange Strecken, bei denen die Reichweite ein entscheidender Faktor ist. PostAuto setzt Depotlader mit Stecker für das Laden unterwegs ein sowie Kombilader mit Panto-Down als ergänzende Lösung: Mehrere Busse können mit minimalen Anpassungen kostengünstig damit ausgerüstet werden.

Tabelle 1: Pantographen in der Übersicht

| Konzepte | Vorteile | Nachteile |
|------------|---|---|
| Panto-down | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringeres Gewicht des Busses (keine Stromabnehmer) ▪ Weniger Wartungsaufwand an den Fahrzeugen ▪ Kostenvorteil (geringere Anzahl von Teilen) ▪ Höhere Batteriekapazität möglich ▪ Grössere Positionstoleranz | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Wartungskosten für die Ladestationen. ▪ Keine Redundanz bei Wartung oder technischem Versagen. |
| Panto-up | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringere Auswirkungen bei Ausfall eines Stromabnehmers ▪ Schlankere Lademasten | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höheres Gewicht des Busses ▪ Höhere Gesamtinvestition (mehrere Stromabnehmer erforderlich). ▪ Höhere Wartungskosten und Abnutzung des Stromabnehmers ▪ Geringere Positionstoleranz |

Tabelle INFRAS. Bemerkung: Für Kombilader wird die gleiche Batteriekapazität wie für Depotlader angenommen.

Induktives Laden

Diese Technologie ermöglicht das kabellose Laden von Elektrobussen, indem Energie über Magnetfelder von einer Ladeplatte im Boden auf eine Empfängerspule im Bus übertragen wird. Die Technologie kann für gelegentliches Laden an Haltestellen oder Endpunkten, an denen der Bus für einige Minuten hält, eingesetzt werden.

Zu den Vorteilen des induktiven Ladens zählen die Berührungslosigkeit (kein mechanischer Verschleiss), die Automatisierung des Ladevorgangs und die Platzersparnis. Die Nachteile gegenüber konduktiven Lösungen sind die höheren Ladeverluste, die Empfindlichkeit gegenüber Fehlpositionierung und Umweltbedingungen, die teurere Installation der Ladeinfrastruktur, insbesondere die Einbettung der Ladeplatten in die Fahrbahn sowie die auf 250 kW begrenzte Leistung. Ausserdem gibt es noch keine weltweiten Standards für induktives Laden. Aus diesen Gründen haben sich diese Systeme nicht durchgesetzt. Eine Marktdurchdringung bei Linienbussen ist derzeit nicht erkennbar und wird mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft nicht eintreten.

Megawatt Charging System

Das Megawatt Charging System (MCS) steht kurz vor der finalen Normierung und wird mit einer neuen Steckerspezifikation eine Ladeleistung bis zu 3.75 MW erlauben. Mit dem heutigen Schnellladestandard CCS kann mit maximal 350 kW geladen werden (im Depot wird in der Regel eine Ladeleistung von 150 kW ohne Kühlung eingesetzt). Der Betrieb von MCS erfolgt mit Niederspannung von bis zu 1250 V bei einem maximalen Ladestrom von 3000 A. MCS eignet

sich sowohl für geplantes Laden als auch Gelegenheitsladen und kann mit Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Batterien sichergestellt werden. Diese Leistungswerte sind entscheidend für das schnelle Laden grosser Batterien. MCS-Stecker (definiert in IEC 63379) und -Kabel sind aufgrund der hohen Ströme und Spannungen relativ schwer und müssen effektiv gekühlt werden, um Überhitzung zu vermeiden und eine sichere Handhabung zu gewährleisten.

Das MCS ist primär für den Schwerlastverkehr, Schiffe und andere Fahrzeuge mit sehr grossem Energiebedarf auf Langstrecken ausgelegt. Für Linienbusse, die meist in urbanen oder regionalen Bereichen mit regelmässigen Ladezyklen operieren, ist MCS unter normalen Bedingungen weniger geeignet, da der Energiebedarf von Linienbussen im Vergleich zu Langstrecken-Lkw typischerweise geringer ist und die vorhandenen Ladetechnologien bzw. Ladeleistungen 150–450 kW (z.B. CCS oder Pantographenlösungen) in der Regel ausreichen.

Die Implementierung des MCS-Standards erfordert eine leistungsstarke und kostenintensive Ladeinfrastruktur mit Batteriespeichern als Zwischenpuffer. Für den Betrieb von Linienbussen wäre ein solcher Aufbau jedoch in der Regel nicht wirtschaftlich. MCS könnte aber in sehr spezifischen Fällen interessant sein, z.B. für Langstreckenbusse im Überlandverkehr bzw. internationalen Verkehr.

Batteriewechsel

Der Batteriewechsel ermöglicht den Austausch einer entladenen Fahrzeugbatterie gegen eine geladene Batterie an Wechselstationen. In China wurde der Batteriewechsel bei 60 Elektrobusen in einem Pilotprojekt während der Olympischen Spiele 2008 in Peking getestet. Die Technologie hat sich jedoch v.a. bei den schweren Nutzfahrzeugen weiterentwickelt. Im Jahr 2023 waren 14% aller neuzugelassenen emissionsfreien Schwernutzfahrzeuge in China mit Batteriewchsel kompatibel, jedoch keine Busse. In Indien gibt es einige Projekte, die sich auf den Batteriewchsel bei Elektrobussen konzentrieren, insbesondere im Überlandverkehr. Aktuell entwickelt Indien Standards für austauschbare Elektrobusbatterien, um die Interoperabilität zu gewährleisten (ICCT 2024a). In Europa werden einzelne Projekte seit 2020 gefördert, wobei der Fokus auf Zwei- und Dreirädern (MiGriS, ECOSWAP) sowie Lkw (eHaul, UniSwapHD) liegt.

Der Batteriewechsel bei Linienbussen im öffentlichen Verkehr hat sich bislang nicht durchgesetzt, obwohl er auf den ersten Blick einige Vorteile bietet. Ein wesentlicher Grund dafür ist der hohe technische Aufwand und die damit verbundenen Kosten. Es fehlen einheitliche Standards für Batterien und Wechselmechanismen, da jeder Hersteller eigene Systeme verwendet. Dadurch wird die Implementierung erschwert und die Infrastrukturkosten für Wechselstationen steigen erheblich. Hinzu kommen Effizienzprobleme. Zwar könnte der Wechsel theoretisch schneller sein als das Laden, doch in der Praxis ist der Prozess oft komplizierter und zeitaufwendiger, etwa durch die genaue Positionierung des Busses. Darüber hinaus müssten stets

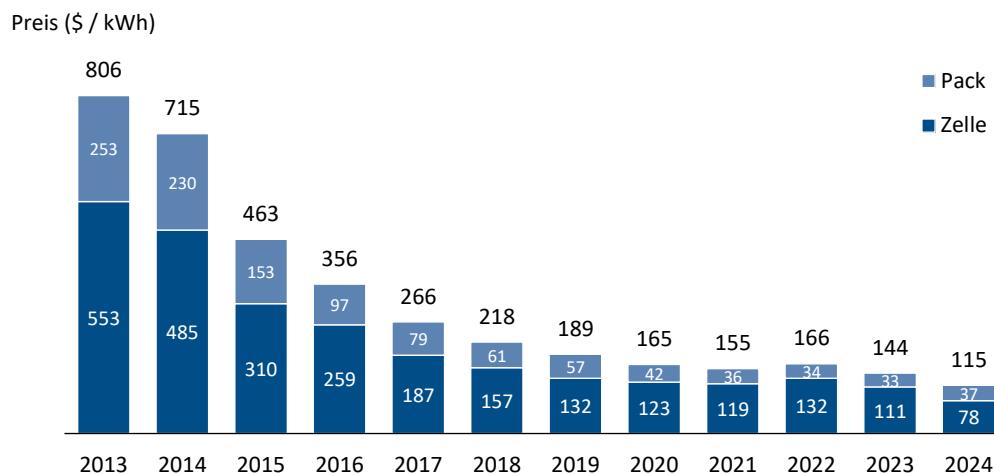
ausreichend zusätzlich geladene Batterien vor Ort verfügbar sein, was mit zusätzlichem Platzbedarf und höheren Kosten verbunden ist. Ein weiterer Faktor sind Fortschritte bei alternativen Technologien. Schnellladelösungen, wie sie z.B. mit Pantographen an Endstationen eingesetzt werden, erlauben das Laden innerhalb weniger Minuten und sind deutlich einfacher in der Umsetzung. Zudem hat die Verbesserung der Batterietechnologie dazu geführt, dass die Reichweite oft ausreicht, und einen Batteriewechsel überflüssig macht. Und das Laden der Batterien ist flexibler, da es oft während Pausen oder über Nacht erfolgen kann, ohne den Fahrplan zu stören.

Insgesamt hat der Batteriewechsel bei Linienbussen viele theoretische Vorteile, doch die praktischen Herausforderungen und die Konkurrenz durch verbesserte Batterien und Schnellladetechnologien machen diese Lösung in der Realität wenig attraktiv. Es ist somit nicht zu erwarten, dass diese Technologie in Zukunft bei Linienbussen eingesetzt wird.

2.2.2. Batterien: Aktuelle Marktsituation und bisherige Entwicklung

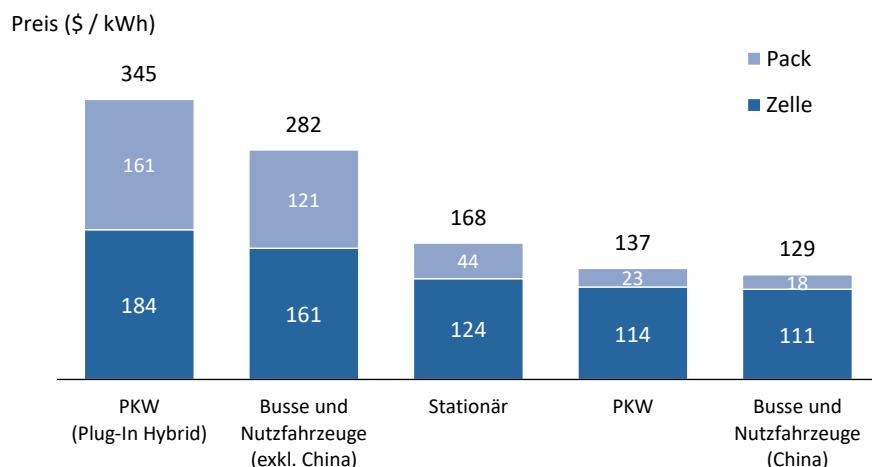
Die Preise für Lithium-Ionen-Batterien, den heute am weitesten verbreiteten Batterietyp, sind 2024 so stark gefallen wie seit 2017 nicht mehr und sind gegenüber 2023 um 20% auf ein Rekordtief von 115 \$/kWh im Jahr 2024 gesunken (BloombergNEF 2024b). Zu den Faktoren, die diesen Preisrückgang antreiben, gehören:

- Verlangsamung des Absatzwachstums bei Elektrofahrzeugen: In den letzten zwei Jahren haben die Batteriehersteller ihre Produktionskapazitäten in Erwartung einer steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen stark ausgebaut. Der Markt für Elektrofahrzeuge ist jedoch langsamer als in den letzten Jahren gewachsen.
- Überkapazitäten in der Zellproduktion: Die globale Produktionskapazität für EV-Batteriezellen, vor allem in China, ist stark angestiegen. Derzeit gibt es mit 3.1 TWh voll in Betrieb genommener jährlichen Produktionskapazität für Batteriezellen weltweit eine Überkapazität. Das ist mehr als das 2.5-fache der Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien im Jahr 2024.
- Günstigere Materialien: Sinkende Kosten für Metalle und Komponenten sowie die verstärkte Nutzung erschwinglicherer Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) haben den Preisverfall zusätzlich beschleunigt.
- Wettbewerbsdynamik: Kleinere Batteriehersteller sind gezwungen, ihre Preise und Margen zu senken, um mit grösseren Anbietern konkurrieren zu können, was den Abwärtstrend bei den Preisen verstärkt.

Abbildung 11: Volumengewichteter Durchschnittspreis von Lithium-Ionen-Zellen und Batteriepacks

Grafik INFRAS. Quelle: BloombergNEF 2024b. Bemerkung: Historische Preise umgerechnet auf den realen Dollarwert im Jahr 2024.

Die Zahlen stellen einen Durchschnittswert für mehrere Batterieendanwendungen dar, darunter E-Autos, Busse und stationäre Speicherprojekte. Die Preise für E-Autos lagen im Jahr 2024 bei 97 \$/kWh. Es ist anzumerken, dass Batterien für Busse in den letzten Jahren ebenfalls günstiger geworden sind, aber in absoluten Zahlen immer noch deutlich teurer sind als Batterien für PKW. Der Preisunterschied liegt hauptsächlich im aufwändigeren Batteriemanagement- und Kühlsystem. Zudem werden Busbatterien auch künftig in deutlich geringeren Mengen als im PKW-Bereich hergestellt. Folglich spielt der Skaleneffekt nicht in gleichem Masse (vgl. Abbildung 12).

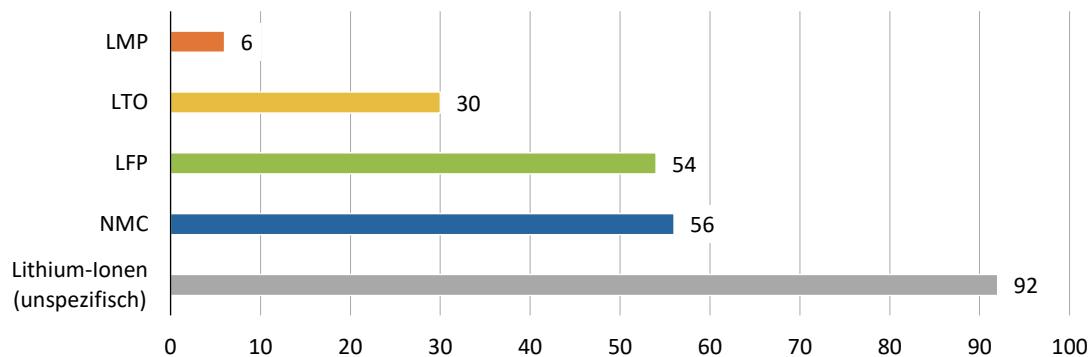
Abbildung 12: Durchschnittspreis von Lithium-Ionen-Zellen und Batteriepacks nach Anwendung

Grafik INFRAS. Quelle: BloombergNEF 2022

Verbreitung unterschiedlicher Batteriechemien

Die heute am weitesten verbreiteten Batterietypen NMC und LFP unterscheiden sich in ihren Kosten, wobei letztere deutlich günstiger sind. LTO-Batterien, die vor allem für hohe Ladeleistungen geeignet sind, werden in Serienbussen selten eingesetzt (z.B. Grid-eMotion Flash TOSA). Von den heute in Deutschland verfügbaren rund 230 Modellen sind 56 mit NMC-Batterien, 54 mit LFP-Batterien und 30 mit LTO-Batterien ausgestattet. Dabei ist zu beachten, dass für fast die Hälfte der Modelle keine Angaben zum Lithium-Ionen-Batterietyp vorliegen (vgl. Abbildung 13). Die Verfügbarkeit von E-Bus-Modellen lässt sich in etwa analog auf den Schweizer Markt übertragen.

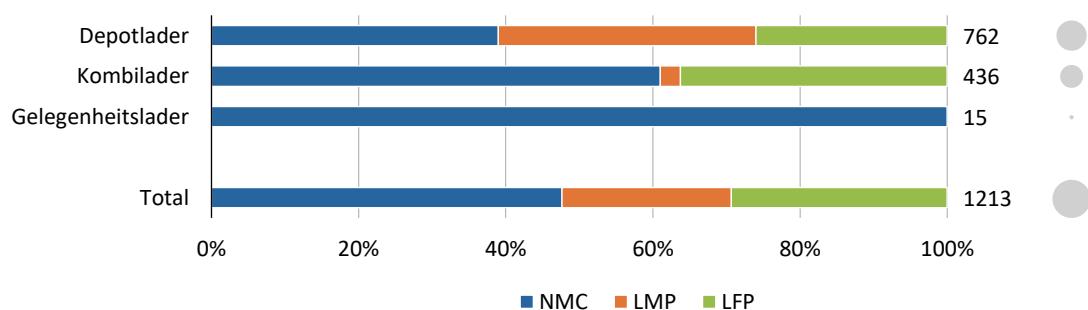
Abbildung 13: Verteilung der geförderten Busse 2018–2023 nach Batterietechnologie in Deutschland (n=228)



Grafik INFRAS. Quelle: PwC 2024

Die rund 1'200 Elektrobusse, die im Zeitraum 2018–2023 in Deutschland gefördert wurden, sind zu ca. 50% mit NMC-Batterien, zu ca. 30% mit LFP-Batterien und zum Rest mit LMP-Batterien (Lithium-Metall-Polymer-Festbatterien) ausgestattet (keine LTO-Batterien). Die Gelegenheitslader waren alle mit NMC-Batterien ausgestattet (vgl. Abbildung 14).

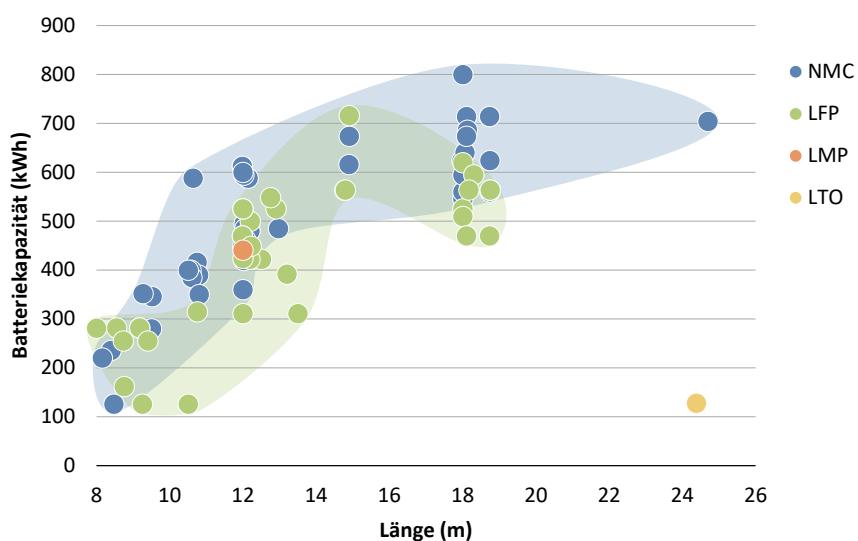
Abbildung 14: Verteilung und Anzahl der geförderten Busse 2018–2023 nach Zellchemie in Deutschland



Grafik INFRAS. Quelle: PwC 2024

Abbildung 15 zeigt das Angebot an batterieelektrischen Bussen in Westeuropa (Omnibusspiegel 2025). Nur wenige Hersteller setzen standardmäßig auf LMP- oder LTO-Batteriechemien. NMC-Batterien kommen bei 50% der Modelle standardmäßig zum Einsatz, LFP-Batterien bei 41%. In 5% der Modelle werden sowohl NMC- als auch LFP-Batterien angeboten. Bei 12- und 18-Meter-Bussen liegen die durchschnittlichen Batteriekapazitäten der LFP-Modelle noch 10% bzw. 17% unter denen der NMC-Modelle.

Abbildung 15: Batteriekapazität nach Fahrzeuggrösse und Zellenchemie

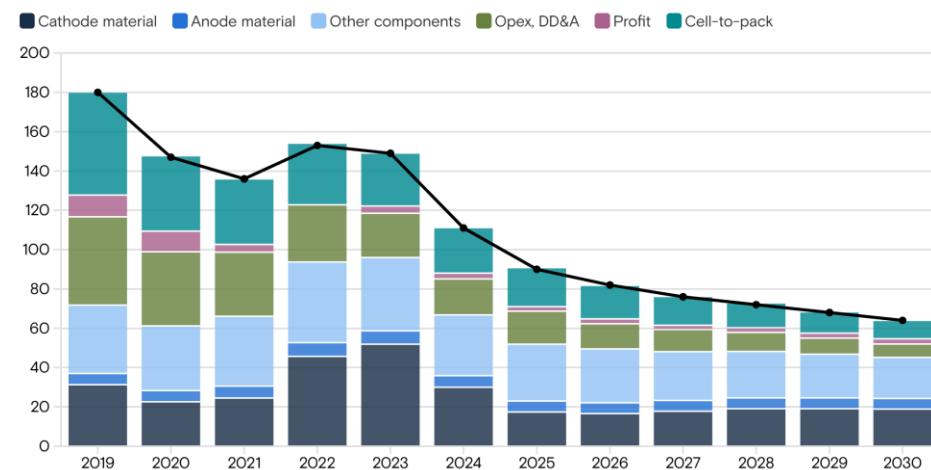


Aufgezeichnet werden aktuell verfügbare Busmodelle (Midi-, Standard-, Gelenk-, und Doppelgelenkbusse) sowie angekündigte Konfigurationen, die bis April 2026 verfügbar sein sollen.

Grafik INFRAS. Quelle: Omnibusspiegel 2025. Stand April 2025.

2.2.3. Batterien: Erwartete Weiterentwicklung

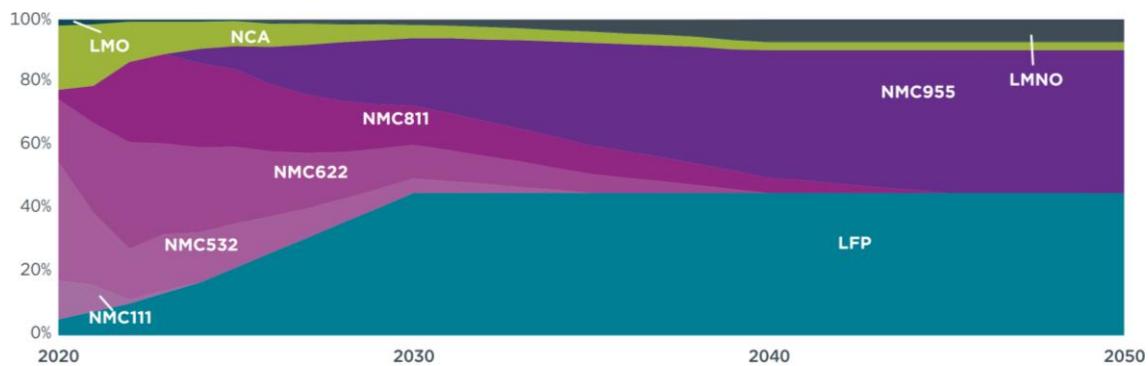
Mit Blick auf die Zukunft werden Investitionen in Forschung und Entwicklung, Verbesserungen der Fertigungsprozesse und Kapazitätserweiterungen in der gesamten Lieferkette dazu beitragen, die Batterietechnologie zu verbessern und die Preise im nächsten Jahrzehnt weiter zu senken. Darüber hinaus werden Technologien der nächsten Generation wie Silizium- und Lithium-Metall-Anoden, Festkörperelektrolyte, neue Kathodenmaterialien und neue Zellherstellungsprozesse eine wichtige Rolle bei der Ermöglichung weiterer Preissenkungen im kommenden Jahrzehnt spielen. Langfristig wird erwartet, dass die Preise für Batteriepacks bis 2030 auf bis zu 69 \$/kWh sinken könnten (BloombergNEF 2024b). Das würde die Kosten von Batteriesystemen für Linienbusse reduzieren. Allerdings könnten geopolitische Unsicherheiten, politische Änderungen sowie Produktionsengpässe die Prognose beeinträchtigen.

Abbildung 16: Entwicklung Batteriepreise

Globale Durchschnittspreise auf Pack-Ebene für alle Elektrofahrzeuggrößen in USD/kWh. Werte ab 2024 sind prognostiziert.

Grafik INFRAS. Quelle: Goldman Sachs Research 2024

In den letzten Jahren ist der Marktanteil von LFP-Batterien gestiegen und erreichte im Jahr 2024 einen Anteil von 50% an der weltweiten Nachfrage nach Batterien für E-Fahrzeuge (IEA 2025). 95% der in China verkauften Elektro-LKW, -Busse und -LNF sind mit LFP-Batterien ausgestattet; außerhalb Chinas liegt der Anteil bei 30%. LFP-Batterien werden aber nicht nur von chinesischen Herstellern angeboten. Die erste Gigafabrik von Morrow Batteries AS für LFP ging im Jahr 2024 in Norwegen in die Testproduktion; die kommerzielle Produktion soll Ende 2025 starten (BusinessPortal Norwegen 2025).

Abbildung 17: Entwicklung Batteriechemien

Prognose der Batteriechemien für Elektrofahrzeuge aller Größen für Länder, in denen NMC derzeit dominiert: EU, USA, Großbritannien, Australien, Kanada, Japan, Mexiko, Südkorea sowie osteuropäische Länder.

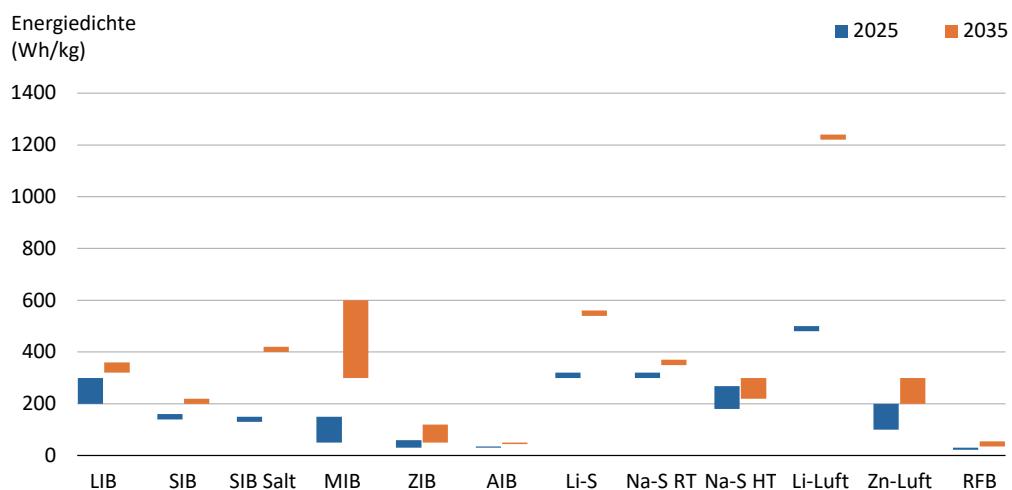
Grafik INFRAS. Quelle: ICCT 2024b

Dennoch ist die Produktionskapazität in Europa auf NMC ausgerichtet. Derzeit beträgt sie pro Jahr rund 40 GWh für NMC und 2 GWh für LFP. Mit den angekündigten neuen Produktionsstandorten soll sie bis 2030 auf etwa 700 GWh für NMC und 100 GWh für LFP steigen (VDI/VDE-IT 2024). Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass sich der Marktanteil von LFP-Batterien in Europa bis 2050 stabilisieren wird (vgl. Abbildung 17).

Weitere Batteriechemien

Der Wettbewerb zwischen Automobilherstellern, Batterieproduzenten und Anbietern stationärer Energiespeicher treibt die Entwicklung von Batterien mit niedrigeren Kosten, besserer Leistung und ohne teure Materialien voran. Es wird erwartet, dass im Laufe dieses Jahrzehnts eine Vielzahl von Unternehmen Batterie-Innovationen auf den Markt bringen wird.

Abbildung 18: Übersicht der Energiedichte neuer Batterietechnologien auf Zellenebene



LIB: Lithium-Ionen, SIB: Sodium-Ionen, SIB Salt: Sodium-Ionen Salzwasser, MIB: Magnesium-Ionen, ZIB: Zinc-Ionen, AIB: Aluminium-Ionen, Li-S: Lithium-Schwefel, Na-S RT: Sodium-Schwefel Raumtemperatur, Na-S HT: Sodium-Schwefel Hochtemperatur, Li-Luft: Lithium-Luft, Zn-Luft: Zinc-Luft, RFB: Redox Flow.

Grafik INFRAS. Quelle: Fraunhofer ISI 2024a.

Eine neue Generation von Technologien für Kathoden, Anoden und Elektrolyte steht bereit, um die nächste Batteriegeneration einzuleiten. Lithium-Ionen-Batterien haben sich in den meisten Branchen als Standard etabliert. Historisch gesehen haben Fortschritte in der Kathodentechnologie massgeblich zur Verbesserung der Energiedichte beigetragen. Allerdings stossen die derzeitigen Kathodengenerationen an ihre theoretischen Grenzen der Energiedichte. Unternehmen, die an Silizium-basierten Anoden, Lithium-Metall-Anoden und Festkörperelektrolyten arbeiten, ziehen die meiste Finanzierung an, da diese Technologien ein erhebliches Potenzial bieten, die Energiedichte weiter zu verbessern (vgl. Abbildung 18).

Der Erfolg neuer Technologien wird davon abhängen, wie schnell sie skaliert und in bestehende Fertigungsprozesse integriert werden können. Während Festkörperbatterien in diesem Jahrzehnt allmählich in die Produktion gehen, ist eine Massenproduktion für kostengünstige Fahrzeuge kurzfristig eher unwahrscheinlich. Gleichzeitig machen Innovationen wie Silizium-basierte Anoden und Trocken-Elektroden-Beschichtungen Fortschritte. Neue Technologien werden zunächst in leistungsorientierten Anwendungen wie der Luftfahrt und dem Militär eingesetzt, bevor sie auf den Massenmarkt für Elektrofahrzeuge übergehen, der preissensibel ist.

Tabelle 2: Übersicht alternativer Batterietechnologien

| | Technologie | Technologiereife | Marktpotenzial | Nachhaltigkeitsvorteile |
|---------------------------|--------------------------|------------------|----------------|-------------------------|
| Lithium-Ionen-Batterien | LIB | grün | grün | gelb |
| Metall-Ionen-Batterien | SIB (Na) | grün | grün | grün |
| | SIB Salt (Na Salzwasser) | grün | orange | grün |
| | MIB (Mg) | gelb | gelb | grün |
| | ZIB (Zn) | gelb | gelb | grün |
| | AIB (Al) | gelb | gelb | grün |
| Metall-Schwefel-Batterien | Li-S | gelb | gelb | gelb |
| | Na-S RT | orange | orange | grün |
| | Na-S HT | grün | rot | grün |
| Metall-Luft-Batterien | Li-Luft | rot | rot | gelb |
| | Zn-Luft | orange | rot | grün |
| Redox-Flow-Batterie | RFB | grün | orange | grün |

LIB dient als Referenztechnologie. Für die Kriterien *Technologiereife* und *Marktpotenzial* kennzeichnet Grün ein ähnliches Niveau wie LIB, Gelb ein geringeres, Orange ein viel geringeres und Rot ein sehr viel geringeres. Beim Kriterium *Nachhaltigkeitsvorteile* kennzeichnet Grün grössere Vorteile gegenüber LIB und Gelb ähnliche.

Tabelle INFRAS. Quelle: Fraunhofer ISI 2024a.

Eine Studie des Fraunhofer-Instituts (ISI) untersuchte potenzielle Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien (LIB) für die Produktion in Deutschland bis ca. 2045. Einige dieser Technologien bieten eine bessere Verfügbarkeit von Ressourcen, sind aufgrund ihrer geringeren Energiedichte jedoch in ihren Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. Für SNF kommen lediglich Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S) und Magnesium-Ionen-Batterien (MIB) in Frage, die ab 2035 bzw. ab 2040 eingesetzt werden könnten (Fraunhofer ISI 2023). Li-S- und MIB-Batterien könnten gegenüber LIB-Batterien bei der gravimetrischen Energiedichte und den Kosten Vorteile bieten. Einschränkungen bestehen hingegen bei der volumetrischen Energiedichte beider Technologien.

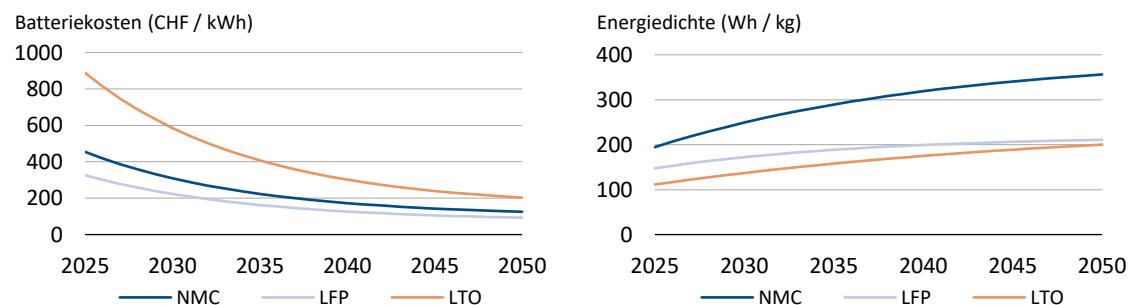
sowie bei der Zyklenstabilität von Li-S. Obwohl mehrere Batteriehersteller angekündigt haben, bis 2030 die Produktion aufzunehmen, verzögert sich der Übergang von der Pilot- zur Massenproduktion (Fraunhofer ISI, 2024b). Trotz des grossen Interesses der Fahrzeugindustrie, die klare Vorteile in der Nichtbrennbarkeit, Schnellladefähigkeit und Langlebigkeit sieht (VDE Renewables 2025), bleibt die Zukunft von Feststoffbatterien in mobilen Anwendungen noch unsicher (Fraunhofer ISI 2024b).

Zu erwartende Entwicklungen der Kosten und Energiedichten

Die Entwicklung der Batterien erfolgte in den letzten Jahren sehr dynamisch und wird weiter vorangehen. Einerseits nimmt die Energiedichte (Wh/kg) und damit die Reichweite laufend zu. Die in den nächsten 10 bis 15 Jahren zu erwartenden Energiedichten werden deutlich über den heutigen Werten liegen (vgl. Abbildung 19, rechts). Neben der Weiterentwicklung der altbewährten Lithium-Ionen-Batterien, versprechen auch neue Technologien wie Feststoffbatterien, Silizium-Anoden-Batterien oder LMNO-Batterien eine höhere Energiedichte.

Für alle Batterie-Typen werden in den nächsten 10–15 Jahren spürbare Preissenkungen (CHF/kWh) erwartet. Abbildung 19 (links) zeigt die erwarteten Entwicklungen bis 2040 aufgrund aktueller Prognosen. Die Prognosen basieren auf einer wissenschaftliche Metastudie (Fraunhofer ISI 2024c), die mit aktuellen Werten verschiedener Hersteller validiert bzw. kalibriert und im E-Bus-Tool von INFRAS modelliert wurden (INFRAS 2025).

Abbildung 19: Entwicklung Kosten und Energiedichten von Batterien



Bemerkung: Batteriekosten inklusiv Systeme, Integration und Entsorgung.

Grafik INFRAS. Quelle: E-Bus-Tool (INFRAS 2025).

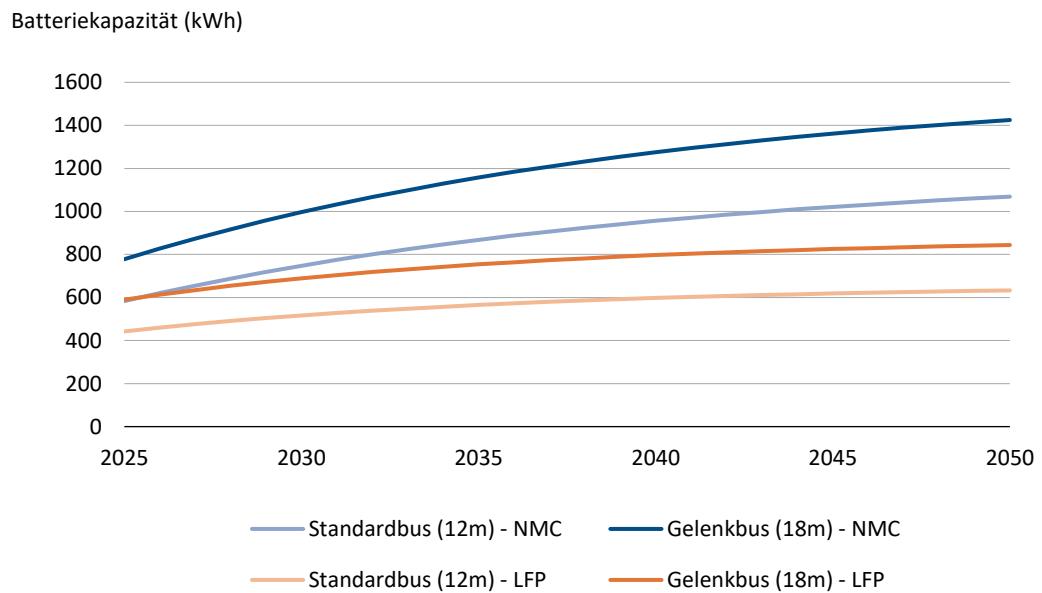
Zu erwartende Entwicklung der Reichweiten

Die Reichweite hängt von zwei Faktoren ab: der Batteriekapazität (bzw. wieviel Energie auf die Batterien geladen und davon genutzt werden kann) und dem durchschnittlichen Energieverbrauch pro km, einschliesslich dem Energieaufwand für das Heizen, Lüften und Kühlen des Innenraums sowie für die diversen Bordgeräte und Monitore.

Tabelle 3: Annahmen zu Batteriekapazitäten für 2026

| Bustyp | Bruttokapazität (100%) | Nutzbare Kapazität (70%) | Bemerkung |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|--|
| Standardbus (12m) | 620 kWh | 430 kWh | |
| Gelenkbus (18m) | 820 kWh | 570 kWh | Ein auf dem Fahrzeugdach montierter Pantograph reduziert die Batteriekapazität je nach Hersteller um bis zu 15%, weil weniger Platz für das Verbauen von Batteriezellen vorhanden ist. |

Tabelle INFRAS. Quelle: E-Bus-Tool (INFRAS 2025) bzw. Hersteller-Angaben.

Abbildung 20: Zu erwartende Entwicklung der Brutto-Batteriekapazität von Standard- und Gelenkbussen

Grafik INFRAS. Quelle: E-Bus-Tool (INFRAS 2025).

Die Batteriekapazität setzt sich aus dem Gewicht der Batterien und der gravimetrischen Energie dichte zusammen. Aufgrund des technologischen Fortschritts nimmt die Kapazität mit der Zeit zu, was bedeutet, dass ein heute beschaffter Bus eine deutlich geringere Reichweite hat als beispielsweise ein im Jahr 2030 beschaffter Bus. Die aktuellen Annahmen zu Batteriekapazitäten sind aus der Tabelle 3 ersichtlich. Für den eigentlichen Fahrbetrieb können nicht 100% der Brutto-Energiekapazität einer Batterie genutzt werden. Um eine möglichst lange Lebensdauer der Batterie zu erreichen, darf die Batterie nicht ganz entladen werden². Ebenfalls reduziert die Alterung die Ladekapazität. Die für den Fahrbetrieb nutzbare Kapazität inkl. Heizung, Lüftung und Klima (HLK) sowie Betrieb weitere Nebenaggregate wie Bordcomputer und

² Hinweis: Das Batteriemanagementsystem des Fahrzeugs verhindert eine komplette Entladung aktiv (min. brutto-SOC > 10%).

Bildschirme liegt deshalb je nach Hersteller bei maximal 70-80%. Die Tabelle 4 zeigt die Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch. Für die Dimensionierung der Reichweiten ist nicht der durchschnittliche, jährliche Verbrauch, sondern der Spitzenverbrauch an kalten Wintertagen (Zusatzheizung) bzw. heissen Sommertagen (Klimaanlage) heranzuziehen³. Der Spitzenverbrauch liegt bis zu 25% über dem Durchschnittsverbrauch.

Tabelle 4: Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch pro km für 2026

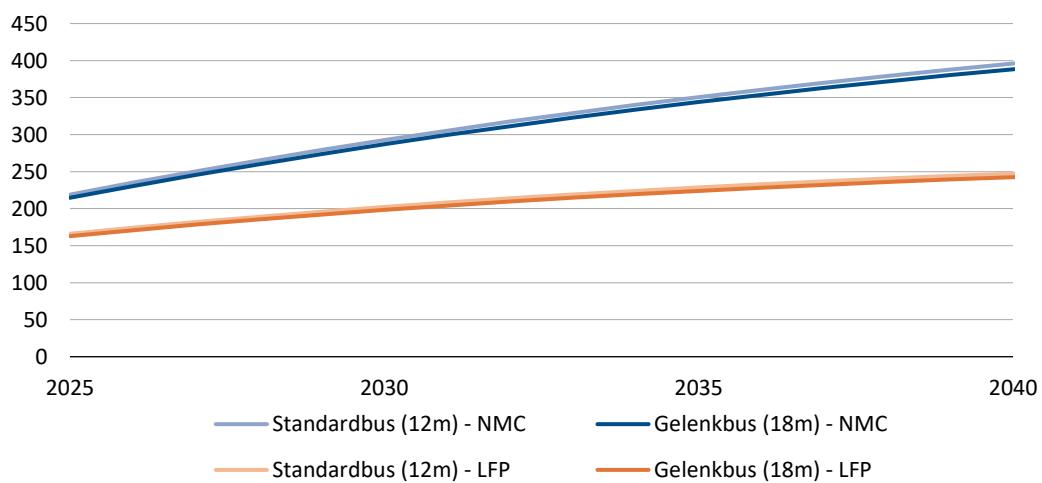
| Bustyp | Durchschnittsverbrauch | Spitzenverbrauch | Bemerkungen |
|-------------------|------------------------|------------------|---|
| Standardbus (12m) | 1.48 kWh/km | 1.85 kWh/km | Spitzenverbrauch 25% höher als Durchschnittsverbrauch. |
| Gelenkbus (18m) | 2.01 kWh/km | 2.51 kWh/km | Der spezifische Energieverbrauch dürfte sich in den nächsten Jahren dank leichterem Chassis sowie effizienteren HLK- und Batterieheizsystem verbessern. |

Durchschnitts- und Spitzenverbrauch in einer durchschnittlichen schweizerischen Verkehrssituation. Stadtverkehr mit ca. 2% höherem Energieverbrauch als der durchschnittlichen Verkehrssituation, Regionalverkehr mit ca. 6% niedrigerem. Starke Steigungen in Berggebieten können den Verbrauch (trotz Rekuperation) weiter um ca. 20% erhöhen.

Tabelle INFRAS. Quelle: E-Bus-Tool (INFRAS 2025) bzw. Erfahrungswerte der Transportunternehmen.

Abbildung 21: Angenommene Entwicklung der Reichweite von Standard- und Gelenkbussen

Reale Reichweite pro Ladung (km)



Unter Berücksichtigung des Spitzenverbrauchs in einer durchschnittlichen schweizerischen Verkehrssituation.

Grafik INFRAS. Quelle: INFRAS E-Bus-Tool (INFRAS 2025).

³ Erfahrung ZVB: Die Klimatisierung benötigt deutlich weniger Energie als die Heizung (auch mittels Wärmepumpe).

Dies wird auch von verschiedenen TU anhand realer Verbrauchsdaten bestätigt, wobei im Einzelfall mit noch höheren Spitzenverbräuchen bis zu +50% zu rechnen ist. Der Einsatz von effizienten Wärmepumpenheizungen wird den Spitzenverbrauch weiter reduzieren. Mit diesen Annahmen werden sich – zusammen mit den absehbaren Verbesserungen bei den Energiedichten der Batterien – die Reichweiten von Depotlader Bussen weiterentwickeln (vgl. Abbildung 21). Damit erreicht ein Gelenkbus dank der grösseren Batterie trotz eines höheren Energieverbrauchs eine ähnliche Reichweite wie ein Standardbus.

Wie werden Batterien heute und in Zukunft in Bussen verbaut?

Unter den Top E-Bus-Modellen (z.B. MAN) im aktuellen Schweizer Bestand sind die Batterien grundsätzlich auf dem Dach montiert. Bei dem Mercedes-Benz eCitaro und Solaris Urbino sind zusätzliche Batterien im Heck eingebaut, wo in der Dieselvariante der Verbrennungsmotor untergebracht ist (Mercedes-Benz Buses 2019). Die Hersteller BYD, VDL, Alexander Dennis und SWITCH haben ab 2022 erste Demonstrationsbusse mit unterflur montierten Batterien vorgestellt, die jetzt als Serienmodellen erhältlich sind.

Zu den Vorteilen zählen ein niedrigerer Schwerpunkt und ein geringeres Fahrgestellgewicht (-10%) aufgrund der reduzierten Dachlast. Dies verbessert die Stabilität und Manövrierfähigkeit des Busses und senkt den Energieverbrauch (BYD Europe B.V; VDL Bus & Coach 2024). Zudem ist die Batteriekapazität von Pantograph-Modellen nicht durch die Konkurrenz um Platz auf dem Dach eingeschränkt. Unterflurbatteriepacks werden mechanisch vom Chassis isoliert, um mögliche Schäden bei einer Kollision zu minimieren (Alexander Dennis 2023). Es bleibt jedoch abzuwarten, ob die Verlagerung der Batterie näher an den Kollisionsbereich einen Einfluss auf die Sicherheit hat. Bisher kommen ausschliesslich LFP-Batterien zum Einsatz aufgrund ihrer höheren Brandsicherheit.

Durch die Anwendung der Cell-to-Pack-Technologie⁴ kann die Energiedichte der LFP-Batterien auf Pack-Ebene erhöht werden, wodurch sie sich der Energiedichte von NMC-Batterien annähern. Dieser Trend wird durch die Cell-to-Chassis-Technologie weiterentwickelt, bei der die Batteriezellen direkt in das Fahrgestell integriert werden. Diese bietet zusätzliche Verbesserungen der Energiedichte, bringt jedoch auch neue Herausforderungen in Bezug auf Integration, Wartung und Brandsicherheit mit sich.

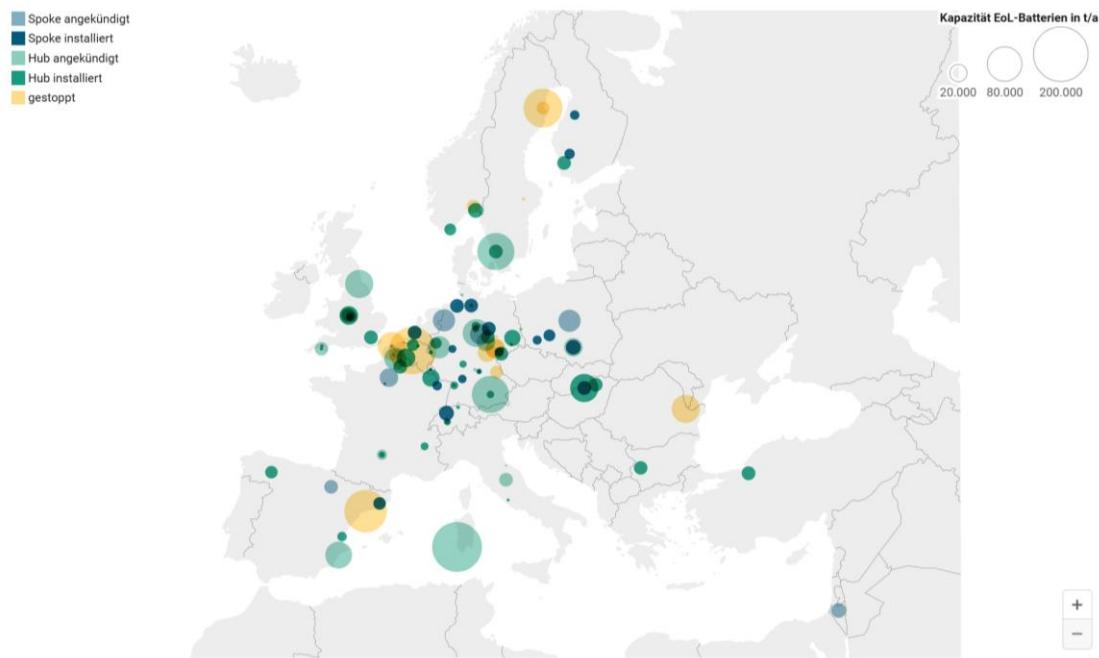
⁴ Normalerweise werden Zellen zunächst zu Modulen und anschliessend zu Packs verbaut. Mit der Cell-To-Pack Bauweise werden Zellen direkt in das Batteriegehäuse integriert, was die Packungsdichte bzw. Energiedichte auf Pack-Ebene verbessert.

2.2.4. Rohstoffe und Nachhaltigkeit

Die neue EU-Batterieverordnung 2023/1542, die die bisherige Batterierichtlinie 2006/66/EG ersetzt, trat 2024 in allen EU-Mitgliedstaaten in Kraft und spielt eine wichtige Rolle, um die Nachhaltigkeit von Batterien deutlich zu erhöhen. Die EU-Batterieverordnung ist ein Eckpfeiler des European Green Deal und soll die Kreislaufwirtschaft, die Ressourcennutzung und -effizienz sowie den Lebenszyklus von Batterien im Hinblick auf Klimaneutralität und Umweltschutz verbessern. Die vorgesehenen Recyclingquoten beinhalten Ziele für Lithium-Ionen-Batterien von 70% bis 2030 sowie Verwertungsquoten von 95% für Kobalt, Kupfer und Nickel und 80% für Lithium bis Ende 2030. Der digitale Batteriepass wird in der EU ab dem 18. Februar 2027 verpflichtend eingeführt.

Eine Analyse des Fraunhofer ISI zeigt, dass Recycling eine entscheidende Rolle für die Rohstoffverfügbarkeit und die LIB-Produktion in Europa spielen kann (vgl. Abbildung 22). Die bis 2030 angekündigten Recyclingkapazitäten in Europa übersteigen die prognostizierten Produktionskapazitäten. Gleichzeitig führen Unsicherheiten beim Hochlauf der Produktion dazu, dass auch Recyclingprojekte häufig verschoben oder ganz gestoppt werden (Fraunhofer ISI 2025).

Abbildung 22: Recyclingstandorte für Lithium-Ionen-Batterien in Europa



Grafik INFRAS. Quelle: Fraunhofer ISI 2025. Datenstand Juli 2025.

Ein schnellerer Anstieg des Marktanteils von LFP-Batterien verringert die Nachfrage nach Nickel und Kobalt, während die grossflächige Anwendung von Natrium-Ionen-Batterien die Nachfrage nach Lithium, Kobalt und Graphit verringern würde. Langfristig reichen die weltweiten Mineralreserven aus, um die Nachfrage nach Batterien zu decken (vgl. Abbildung 23).

Abbildung 23: Globaler Rohstoffbedarf für Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit je Szenario



Grafik INFRAS. Quelle: ICCT 2024b

Lithium wird vor allem in Australien und Chile, aber auch in China und Argentinien sowie weiteren Ländern gewonnen. Es ist davon auszugehen, dass mit einer Zunahme der Elektromobilität auch der Lithiumverbrauch ansteigen wird. Um diesen Bedarf zu decken, müssen bis in einigen Jahrzehnten zwingend neue Lithiumquellen erschlossen werden, da Lithium auch künftig von zentraler Bedeutung bleiben wird. Zwar ist die Natrium-Ionen-Batterie eine Alternative, sie wird der Lithium-Variante aber nicht komplett den Rang ablaufen, höchstens eine Ergänzung darstellen und bei hoher nötiger Speicherdichte wird Lithium führend bleiben. Allerdings ist die Rohstoffsituation beim Lithium nicht allzu kritisch. Es gibt noch grosse Ressourcen, neue Abbau-, sowie neue Aufbereitungsmöglichkeiten, und der starke Preisanstieg ist auch überwunden (Rönsch 2024).

Über die Hälfte des weltweiten Bedarfs an Kobalt wird in der Demokratischen Republik Kongo abgebaut; auch in Kanada, China und Russland wird es gewonnen. Es ist davon auszugehen, dass die Kobaltressourcen noch lange nicht erschöpft sind. Um die negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen und Nebenwirkungen vom Abbau zu verhindern, sind mehrere Ansätze notwendig, die gesetzlich geregelt werden müssen, weil es der Markt allein nicht regeln wird. Kritische Rohstoffe könnten durch andere ersetzt werden. Kobalt spielt in neuen Zellchemie-Arten von Batterien eine immer geringere Rolle und wird in den etablierten Recyclingprozessen zu einem sehr grossen Teil zurückgewonnen.

Graphit wird in verschiedenen Ländern produziert. Grösster Produzent ist China. Wegen der steigenden Nachfrage nach erneuerbaren Energien und Batterien ist mittelfristig von einer Nachfragesteigerung auszugehen. Die Konzentration der Produktion in China wird als geopolitisches Risiko eingeschätzt. An möglichen Alternativen für Graphit wird geforscht, einerseits um die Kapazität der Batterien zu verbessern, andererseits aber auch, um bei einer allfälligen Knappheit von Graphit eine Alternative zu haben.

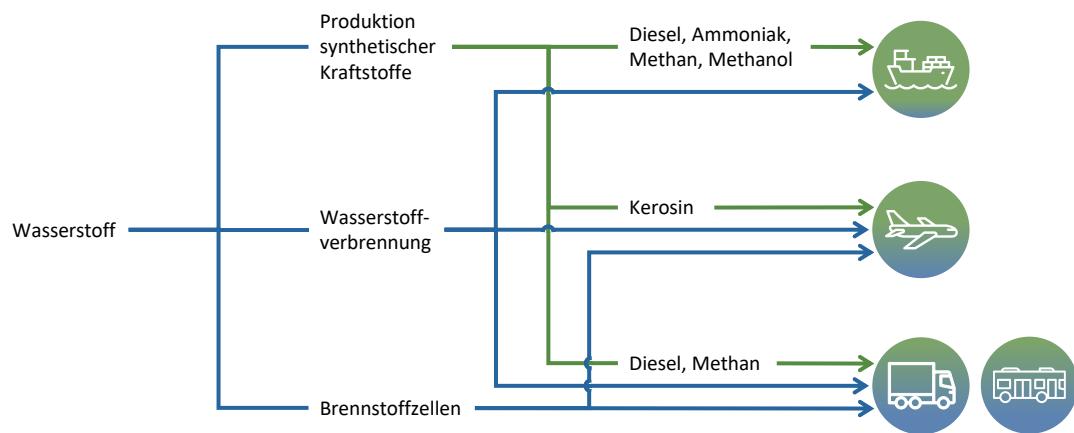
Seltene Erden umfassen 15 chemische Elemente, die trotz ihres Namens geologisch gar nicht so selten sind. Sie wurden lange fast ausschliesslich in China produziert. 2011 hat China den Export dieser Materialien erschwert, was zu massiven Preisanstiegen auf dem Weltmarkt geführt hat. Darum werden Seltene Erden inzwischen auch in den USA und Australien gefördert. In E-Bussen werden sie für die Permanentmagnete in den Elektromotoren eingesetzt, aber nicht in Batterien. Seitdem die Produktion nicht mehr nur in China stattfindet, haben die geopolitischen Risiken abgenommen. Wegen der zunehmenden Nachfrage werden Recyclingprozesse immer relevanter.

E-Busse brauchen wegen der Batterie und dem Elektromotor andere Rohstoffe als Dieselbusse. Manche Rohstoffe, die in Batterien oder Elektromotoren verwendet werden, könnten künftig knapp werden. Darum ist es wichtig, solche Wertstoffe im Kreislauf zu recyceln. Im Rahmen der Beschaffung von Batteriebussen soll deshalb der Besteller von den Lieferanten einen Nachhaltigkeitsnachweis verlangen, speziell für Rohstoffe aus Entwicklungsländern. Zudem gilt es zu bedenken, dass auch für Dieselmotoren, gewisse Rohstoffe verwendet werden, deren Abbau mit negativen ökologischen und sozialen Folgen verbunden sein können (z.B. in Kurbelwellen, Zündkerzen oder Katalysatoren).

2.3. Strombasierte Treibstoffe

Zu den strombasierten Treibstoffen gehören Wasserstoff (H_2) sowie Power-to-Liquid-Treibstoffe (PtL = synthetische Treibstoffe). Wasserstoff kann direkt (als Wasserstoff) oder indirekt (als e-Fuels) eingesetzt werden.

Abbildung 24: Produktion und Anwendung von strombasierten Treibstoffen im Verkehrssektor



Grafik INFRAS. Quelle: NOW GmbH 2024

2.3.1. Wasserstoff

In Abhängigkeit von der Art der Herstellung wird Wasserstoff in verschiedene Farben eingeteilt (vgl. Abbildung 25). Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt. Die Energie dafür stammt bei grünem Wasserstoff ausschliesslich aus Strom, der aus Wind, Wasserkraft, Photovoltaik und generell erneuerbaren Ressourcen gewonnen wird. Bei dieser Produktion entsteht kein Kohlendioxid.

Wasserstoff kann grundsätzlich in der Schweiz produziert werden. Die Voraussetzung für grünen Wasserstoff ist ein Überschuss an erneuerbarem Strom. Aktuelle Prognosen zeigen, dass im Jahr 2030 rund 2 TWh und im Jahr 2050 rund 5-7 TWh grüner Wasserstoff in der Schweiz produziert werden könnten (BFE 2021, Polynomics 2023). Als Vergleich beträgt der Strombedarf des Strassenverkehrs gemäss INFRAS-Elektromobilitätszenarien-Szenarien rund 17 TWh im Jahr 2050. Die Gestehungskosten liegen im Jahr 2030 zwischen 4.4 CHF und 10.4 CHF pro kg H_2 (BFE 2022, Polynomics 2023). Heute liegt der Endkundenpreis an H_2 -Tankstellen in der Schweiz jedoch bei ca. 20 CHF/kg H_2 (H2 MOBILITY 2025).

Abbildung 25: Farben des Wasserstoffs

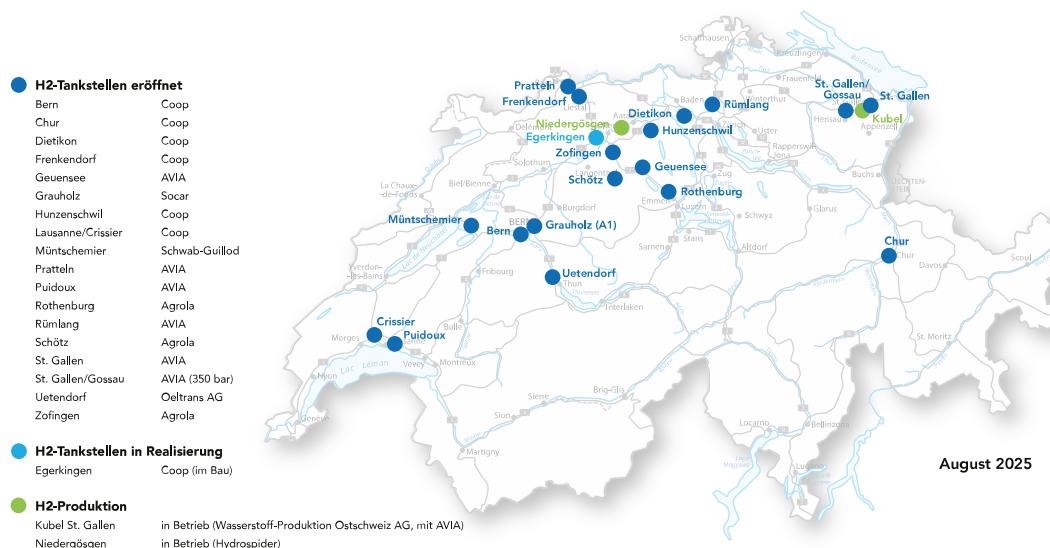
| Terminology | Technology | Feedstock/ Electricity source | GHG footprint* |
|--------------------------------|----------------------|--|---------------------------------------|
| PRODUCTION VIA ELECTRICITY | Green Hydrogen | Electrolysis | Wind, Solar, Hydro, Geothermal, Tidal |
| | Purple/Pink Hydrogen | | Nuclear |
| | Yellow Hydrogen | | Mixed-origin grid energy |
| PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS | Blue Hydrogen | Natural gas reforming + CCUS gasification + CCUS | Natural gas, coal |
| | Turquoise Hydrogen | Pyrolysis | Natural gas |
| | Grey Hydrogen | Natural gas reforming | |
| | Brown Hydrogen | Gasification | Brown coal (lignite) |
| | Black Hydrogen | | Black coal |

*GCG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Grafik INFRAS. Quelle: World Energy Council 2021

Damit sich der Treibstoff durchsetzen kann, werden Wasserstofftankstellen benötigt. In mobilen Anwendungen muss Wasserstoff in Tanks transportiert werden, wofür er aufwendig komprimiert oder durch starkes Abkühlen verflüssigt werden muss. Jede H₂-Tankstelle benötigt Anlagen zur Speicherung und Vorkonditionierung (Kühlung, Komprimierung) des Wasserstoffs sowie eine integrierte Tanksäule bestehend aus Dispenser und Füllkupplung.

Abbildung 26: H₂-Tankstellen der Schweiz

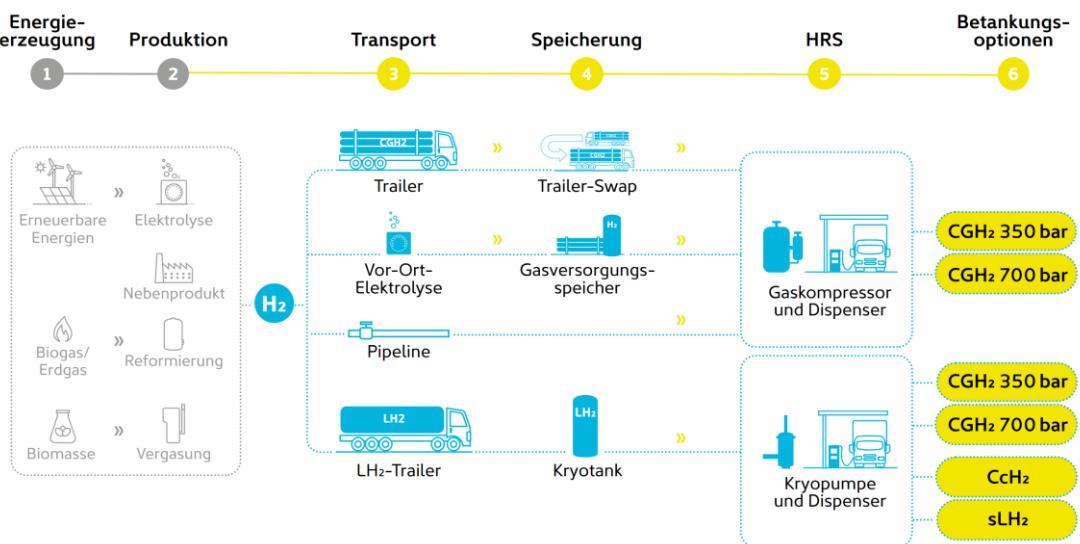


Grafik INFRAS. Quelle: Förderverein H2 Mobilität Schweiz 2025

Wird H₂ vor Ort produziert, wird zusätzlich ein Elektrolyseur benötigt. Derzeit gibt es in der Schweiz rund 20 öffentliche H₂-Tankstellen. Im Vergleich dazu gibt es etwas mehr als 3'300 konventionelle Tankstellen.

Aufgrund der Betriebssicherheit setzen TU häufig auf eigene Wasserstofftankstellen, die aber einen hohen Platzbedarf und hohe Investitionskosten erfordern (NOW GmbH 2022). Meistens wird über Trailer komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) in Mitteldrucktanks (200 – 300 bar) angeliefert und gespeichert. Beim Austausch der Trailer wird ein zusätzlicher freier Abstellplatz benötigt. Für grössere Abnahmemengen ist auch der Transport über H₂-Pipelines möglich, sofern sich ein Produzent in der Nähe befindet oder die Erzeugung vor Ort möglich ist.

Abbildung 27: Wasserstoffproduktion und Verteilung



Abkürzungen: HRS: Wasserstoff-Tankstelle (Hydrogen Refuelling Station), CGH₂: komprimierter gasförmiger Wasserstoff (Compressed Gaseous Hydrogen), LH₂: flüssiger Wasserstoff (Liquid Hydrogen), CcH₂: Kryo-komprimierter Wasserstoff (Cryo-compressed Hydrogen), sLH₂: unterkühlter flüssiger Wasserstoff (subcooled Liquid Hydrogen)

Grafik INFRAS. Quelle: Grafik H2 MOBILITY 2022

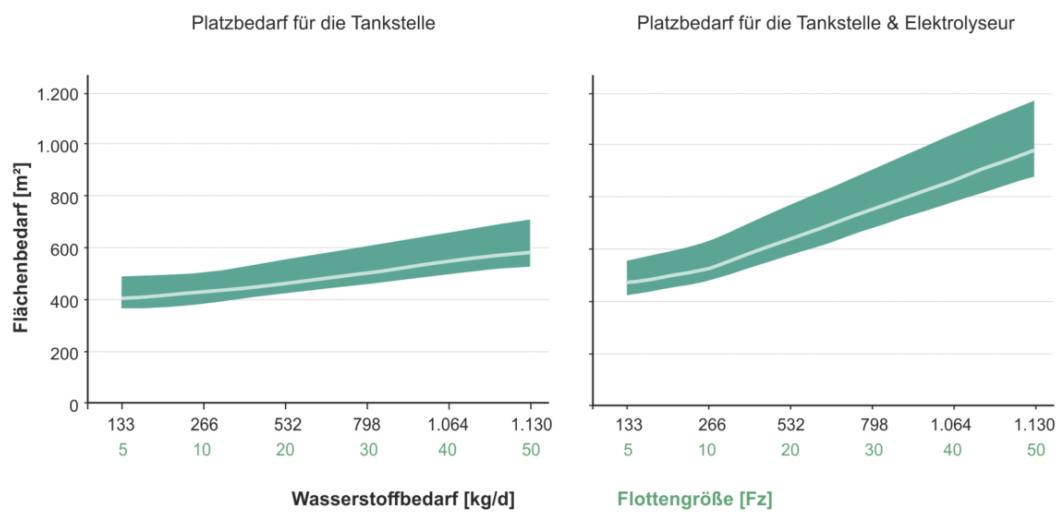
TU rüsten in der Regel Hochdruckkompressoren redundant aus, um die Tankstelleverfügbarkeit zu gewährleisten, und passen die Kapazität des Hochdruckspeichers an den Spitzenwasserstoffbedarf an, damit Busse direkt nacheinander betankt werden können. Für eine Busflotte von 5 Brennstoffzellenbussen ist mit einem Flächenbedarf von etwa 400 m² und Investitionskosten von etwa 1.7 Mio. CHF zu rechnen (vgl. Abbildung 29 und Abbildung 30).

Abbildung 28: Wasserstofftankstelle der Stuttgarter Strassenbahnen AG



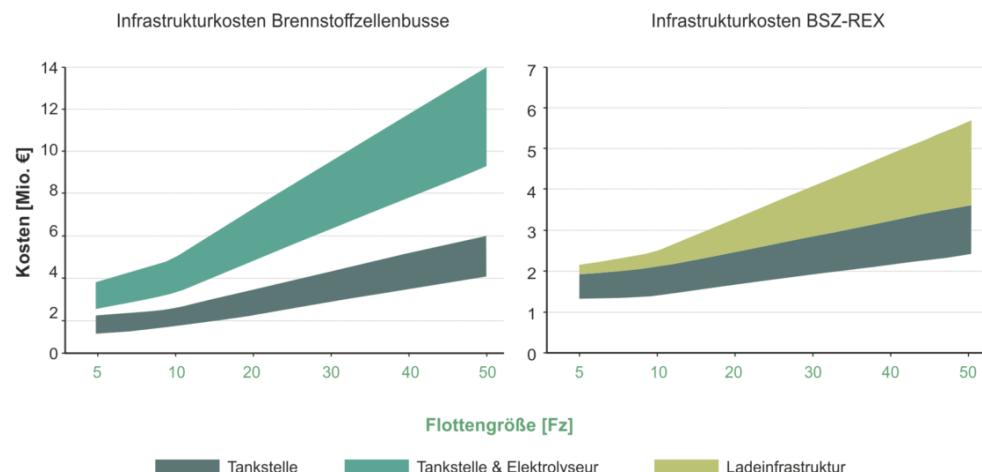
Grafik INFRAS. Quelle: Schwelm Anlagentechnik GmbH

Abbildung 29: Platzbedarf für H₂-Infrastruktur



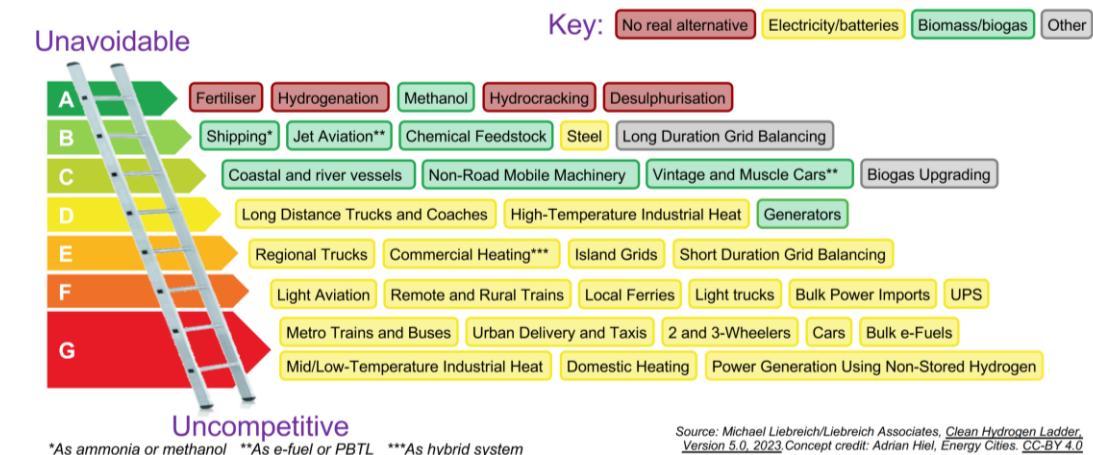
Grafik INFRAS. Quelle: Sphera Solutions GmbH, NOW GmbH 2025

Der Platzbedarf und die Investitionskosten der Tankstelle steigen mit dem Wasserstoffbedarf bzw. der Flottengröße. Wird auf Vor-Ort-Elektrolyse gesetzt, sind mit zusätzlichem Platzbedarf, Investitions- und Betriebskosten zu rechnen, die mit zunehmender Flottengröße erheblich steigen. Beim Einsatz von Plug-In-Brennstoffzellenbussen, auch Range-Extender (REX) genannt, sind zusätzliche Ladeinfrastrukturkosten zu berücksichtigen.

Abbildung 30: Investitionskosten für H₂-Infrastruktur

Grafik INFRAS. Quelle: Sphera Solutions GmbH, NOW GmbH 2025

Grüner Wasserstoff ist eine wichtige Technologie, die im Zusammenhang mit der Klimadiskussion unverzichtbar ist. Bis 2030 ist Wasserstoff in geringen Mengen in der Schweiz verfügbar und bis 2040 dürfte Wasserstoff global in grösseren Mengen verfügbar sein. Wasserstoff (oder e-Fuels, die eine höhere volumetrische Energiedichte aufweisen) soll jedoch für Anwendungen eingesetzt werden, in denen eine volle Elektrifizierung mittels Batterien oder Fahrleitungen technisch bzw. wirtschaftlich nicht machbar ist, wie beispielsweise in der Luft- und Schifffahrt, für den langfristigen Energiespeicher oder in der Stahlindustrie und in der chemischen: die so genannten «No-Regret-Anwendungen». Im Luft- und Schiffsverkehr werden e-Fuels (höhere Energiedichte als Wasserstoff) benötigt, für die Wasserstoff ein wichtiger Ausgangsstoff ist.

Abbildung 31: Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

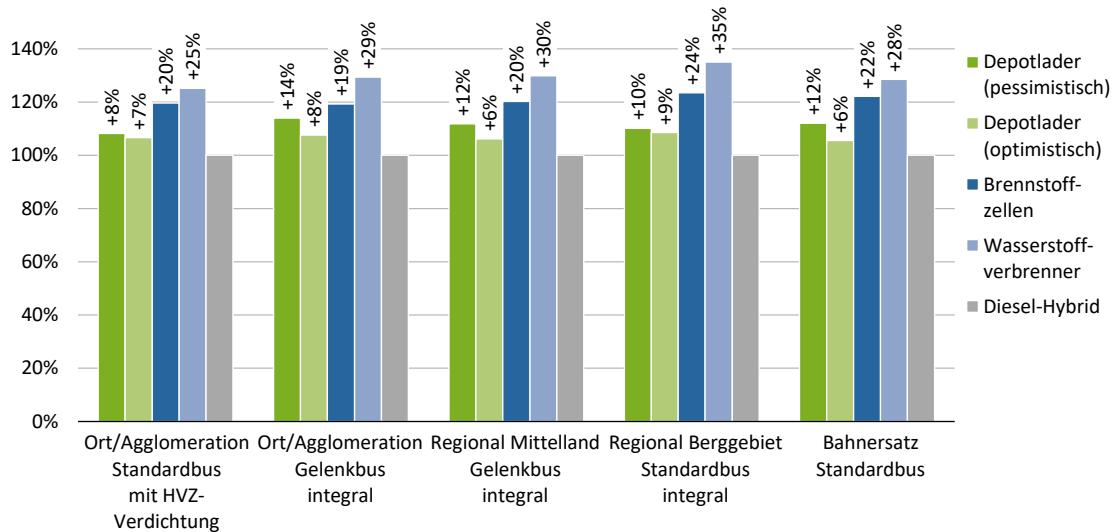
Grafik INFRAS. Quelle: Liebreich Associates 2023

2.3.2. Wasserstoffverbrennung im Technologievergleich

Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) können ab 2025 in der EU und voraussichtlich auch in der Schweiz als Zero Emission Vehicles (ZEV) zur Erfüllung der CO₂-Emissionsvorschriften angerechnet werden (Amtsblatt der Europäischen Union 2024). Dies ist ein wichtiger Treiber, da im Gegensatz zu anderen fossilfreien Antrieben vorhandenes Wissen genutzt werden kann – dank der hohen Ähnlichkeit zu Diesel- und CNG-Motoren. Nahezu alle SNF-Hersteller haben ab 2022 Wasserstoffantriebe in ihr Portfolio aufgenommen und entwickeln Demonstrationsprojekte, insbesondere für LKW und Kommunalfahrzeuge. Grundsätzlich sollte H₂-ICE in Nischenanwendungen mit hohem Leistungsbedarf eingesetzt werden. Hersteller planen die Markteinführung von Klein- und Vorserien zwischen 2025 und 2030. Derzeit wird nur die Umrüstung bestehender Omnibusse angeboten, eine kommerzielle Produktion ist nicht in Sicht. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff wird ein zusätzlicher entscheidender Faktor sein für die Verbreitung von H₂-ICE in der Schweiz.

Eine aktuelle Studie (INFRAS/EcoExistence 2025) vergleicht H₂-ICE in Linien- und Bahner satzbussen mit anderen fossilfreien Antriebstechnologien für ein Modelljahr 2030. Die Studie stützt sich auf die Grundlagenstudie des Bundes (INFRAS 2020) und wurde mit dem neuesten Stand der Technik ergänzt. Dabei wurden anspruchsvolle Fahrprofile in städtischen, regionalen und alpinen Einsatzszenarien berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass Wasserstoffverbrennerbusse von den fossilfreien Antrieben sowohl ökologisch als auch ökonomisch für die untersuchten Einsatzprofile am wenigsten geeignet sind. Aufgrund ihres geringen Gesamtwirkungsgrades verursachen sie die höchsten Primärenergieverbräuche und Umweltbelastungen. Selbst bei günstigen Annahmen zur Wasserstoffproduktion können sie deshalb nicht mit alternativen Technologien konkurrieren. Brennstoffzellenbusse sind in den untersuchten Einsatzprofilen, die hohe Anforderungen an die Reichweite von Bussen stellen, hinsichtlich der Klimawirkung nur wenig schlechter als Batteriebusse, weisen aber einen höheren Primärenergiebedarf und zusätzliche Umweltbelastungen auf. Batteriebusse schneiden in nahezu allen untersuchten Umweltindikatoren am besten ab, auch wenn für bestimmte Fahrprofile ein erhöhter Fahrzeugbedarf resultiert. Die Kostenberechnungen zeigen ein ähnliches Resultat: Selbst unter der Annahme, dass grüner Wasserstoff ab 2030 günstig verfügbar sein wird, ist der Wasserstoffverbrennerbus in allen betrachteten Einsatzprofilen die deutlich teuerste Option für das Jahr 2030. Am zweitteuersten ist der Brennstoffzellenbus, während die Batteriebusse die günstigste Option sind (vgl. Abbildung 32).

Abbildung 32: Vollkostenvergleich der verschiedenen Antriebstechnologien je Einsatzprofil im Jahr 2030



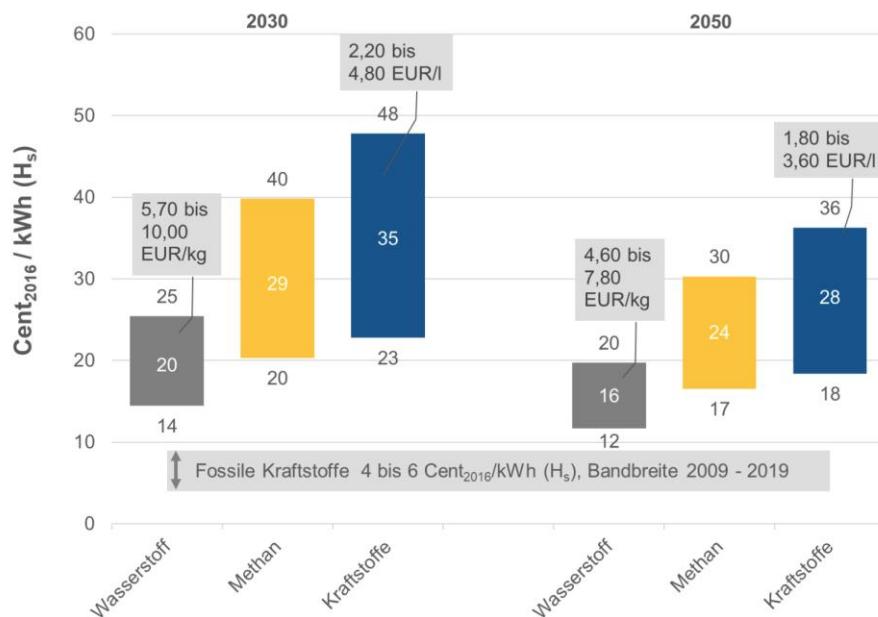
Grafik INFRAS. Quelle: INFRAS/EcoExistence 2025

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Batteriebusse die vorteilhafteste Technologie für die meisten Anwendungen darstellen, während Brennstoffzellenbusse eine mögliche Ergänzung für besonders anspruchsvolle Einsatzprofile sein können. Wasserstoffverbrennerbusse könnten allenfalls nur in spezifischen Nischenanwendungen zum Einsatz kommen. Aufgrund der mangelnden Fahrzeugverfügbarkeit und der Unsicherheit über die zukünftige Verfügbarkeit und Preisentwicklung von grünem Wasserstoff kommen H₂-ICE-Busse für die meisten TUs bei der Umstellung auf fossilfreie Busse auch längerfristig jedoch nicht in Frage.

2.3.3. E-Fuels

E-Fuels entstehen in Power-to-Liquid-Verfahren (PtL) und sind synthetische Kraftstoffe, die aus CO₂ und Wasserstoff hergestellt werden, eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie fossile Kraftstoffe (z.B. Diesel oder Benzin) haben und in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können. Die Verfügbarkeit von E-Fuels ist ein zentraler und relevanter Faktor für die erfolgreiche Anwendung dieser Kraftstoffe. Die Produktion von E-Fuels befindet sich bisher in der Pilotphase (IEA 2024b). Bis 2030 werden E-Fuels vermutlich kaum verfügbar sein, erst ab 2045 könnten diese eine Rolle spielen (BFE 2021). Für einen schnellen Markthochlauf fehlen zurzeit jedoch genügende Investitionen.

Abbildung 33: Prognostizierte Gestehungskosten von strombasierten Treibstoffen



Grafik INFRAS. Quelle: Prognos AG 2020

Die Gestehungskosten von E-Fuels variieren stark in Abhängigkeit von zentralen Annahmen, wie Produktionsregion, Kohlenstoffquelle und Technologiewahl (Umweltbundesamt 2025). Sie liegen jedoch klar über denen von fossilen Pendants: 2030 zwischen 2.20–4.80 CHF/L und 2050 zwischen 1.80–3.60 CHF/L, sofern sich der Markt auch in diese Richtung entwickelt und Skaleneffekte eintreten (BMWE 2020, Agora Verkehrswende 2023). Die Preise inklusive Transport, Bereitstellung und Gewinnmarge werden noch höher sein. Derzeit liegt z.B. der Preis für Wasserstoff an Tankstellen in der Schweiz bei ca. 19.50–20.50 CHF pro kg H₂ (Stand 24.10.25) und damit deutlich über den prognostizierten Gestehungskosten.

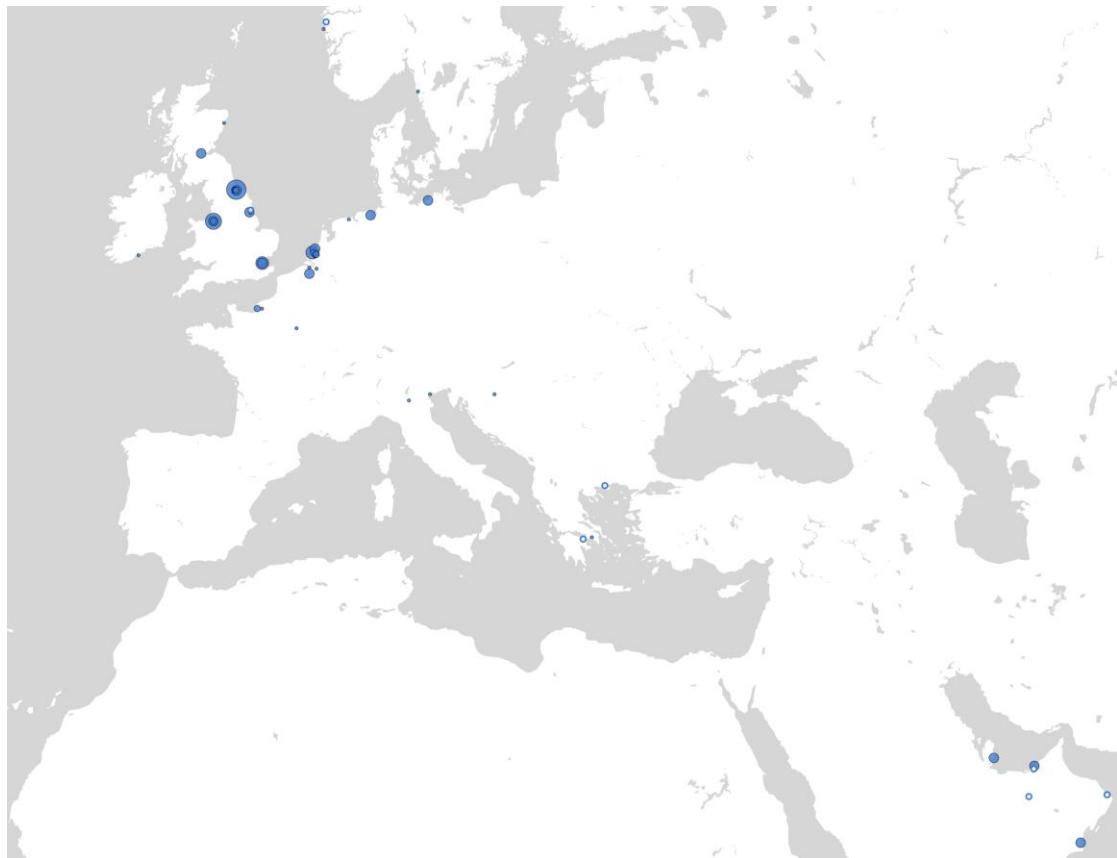
Angekündigte und bestehende Produktionsstandorte

In der Schweiz sind bisher keine Produktionsanlagen geplant, in Deutschland bestehen bereits einige Testanlagen. Eine davon wird vom Schweizer ETH-Start-up Synhelion seit Sommer 2024 betrieben, die seit 2016 an der Entwicklung von E-Fuels arbeiten. Erste symbolische Betankungen in der Schweiz sind bereits erfolgt (Synhelion 2025, SGV 2025). Die räumliche Nähe der Produktion ist von grundsätzlichem Vorteil und reduziert die technischen und ökologischen Herausforderungen des Transports. Andererseits können an sogenannten Gunststandorten durch erhebliche erneuerbare Energieressourcen möglichst niedrige Stromgestehungskosten realisiert werden, was angesichts des hohen Strombedarfs der E-Fuel-Produktion signifikante Kostenvorteile mit sich bringt (IEA 2023b, Agora Verkehrswende 2023). Diese Standorte

befinden sich hauptsächlich in der MENA-Region (Mittlerer Osten und Nordafrika). E-Fuels für die Schweiz dürften v.a. in dieser Region produziert werden (BFE 2021), was aufgrund der geopolitischen Lage eine hohe Zuverlässigkeit der Importe in Frage stellen könnte. Die Abhängigkeit der Importe bzw. die Versorgungsrisiken wäre vergleichbar mit den heutigen fossilen Treibstoffen.

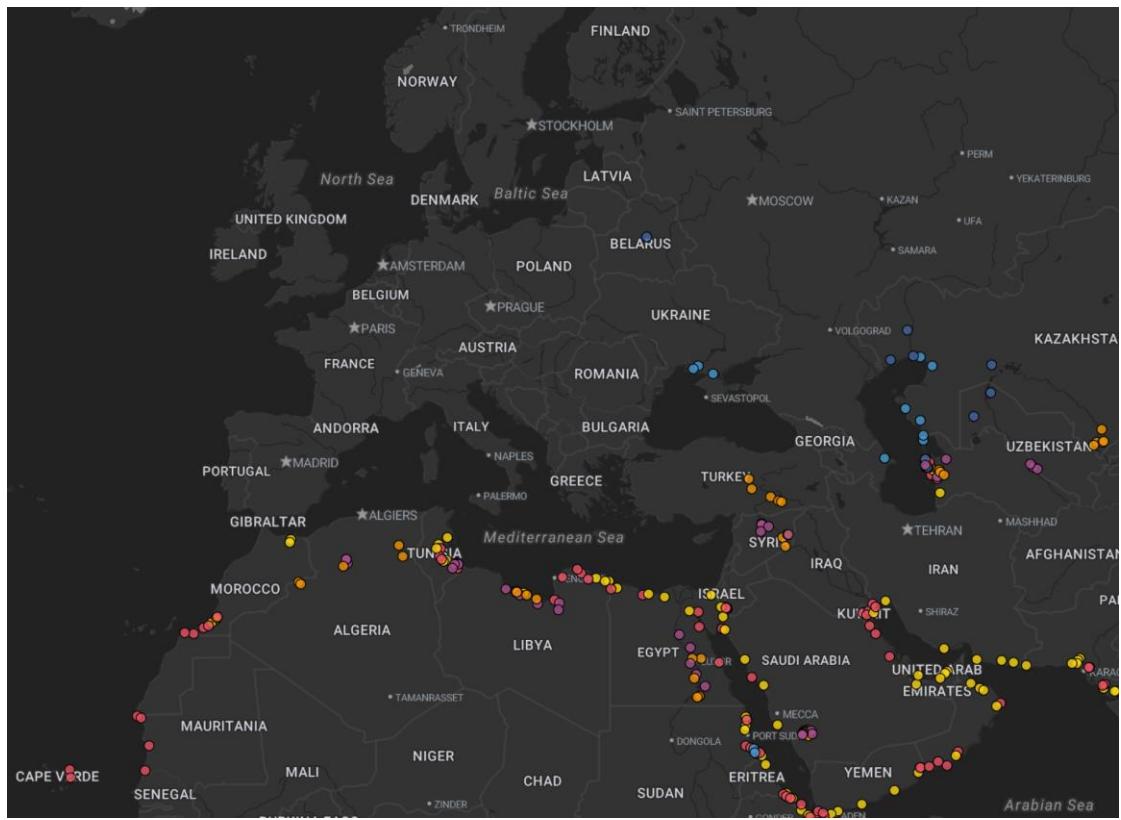
Hauptabnehmer von E-Fuels dürfte die Luft- und Schifffahrt sein, da die Potenziale zur Elektrifizierung in diesen Sektoren begrenzt sind (IEA 2023b). Für den Flugverkehr legt die EU-Verordnung «ReFuelEU Aviation» Beimischquoten von Sustainable Aviation Fuels (SAF) ab 2025 fest, die auch in der Schweiz übernommen wurden (BAZL 2025). Ab 2030 sollen 1.2% des Flugkraftstoffbedarfs synthetisch sein, sogenanntes PtL-Kerosin. Im Jahr 2050 steigt der PtL-Kerosin-Anteil auf 35% (European Commission 2025). Für die Seefahrt legt die EU-Richtlinie «FuelEU Maritime» Beimischquoten fest. Ab 2034 ist ein Mindestanteil von 2% an synthetischen Kraftstoffen vorgesehen, einschliesslich E-Fuels und grünem Wasserstoff (Europäischer Rat 2024).

Abbildung 34: E-Fuels: Angekündigte und bestehende Produktionsstandorte



Grafik INFRAS. Quelle: IEA 2024c. Stand 13.11.2024.

Abbildung 35: Gunststandorte für E-Fuel Produktion



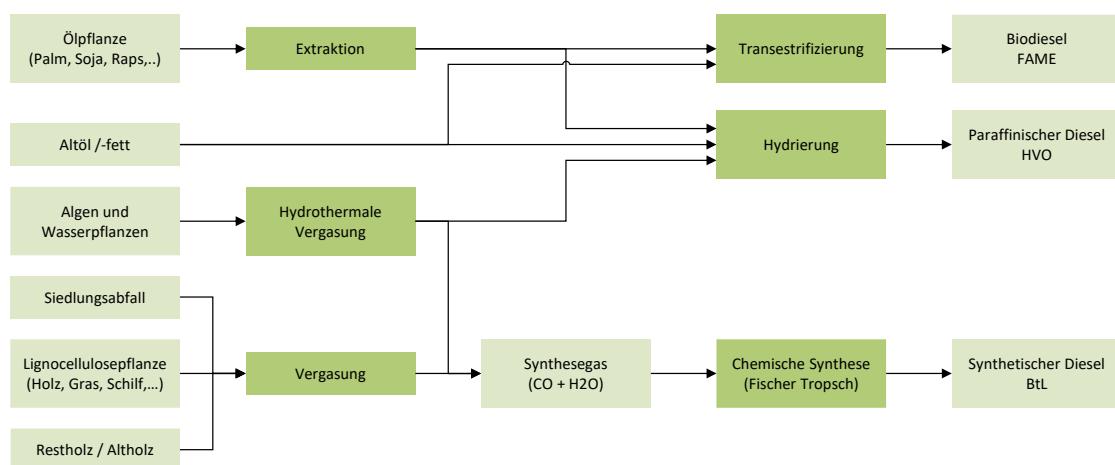
Kraftstoffgestehungskosten werden für Standorte an Binnen- und Küstengewässern modelliert. Grundlage sind die potenziellen Vollaststunden von gekoppelten PV- und Windenergieanlagen sowie die Transportkosten nach Deutschland. Die Farben kennzeichnen sowohl den Energietyp (PV, Wind, Mix) als auch den Standort (Binnen, Küste).

Grafik INFRAS. Quelle: Fraunhofer IEE

2.4. Biotreibstoffe

Zu den alternativen Treibstoffen gehören ebenfalls dieselähnliche flüssige Treibstoffe, die in herkömmlichen Dieselmotoren verwendet werden können (sogenannte Drop-In Fuels). Abbildung 36 fasst die verschiedenen Herstellungspfade und Rohstoffe in der Produktion biobasierten-alternativen Treibstoffe zusammen.

Abbildung 36: Rohstoffe und Produktionsprozesse verschiedener Biotreibstoffe



Grafik INFRAS. Quelle: INFRAS auf Basis IPCC 2011

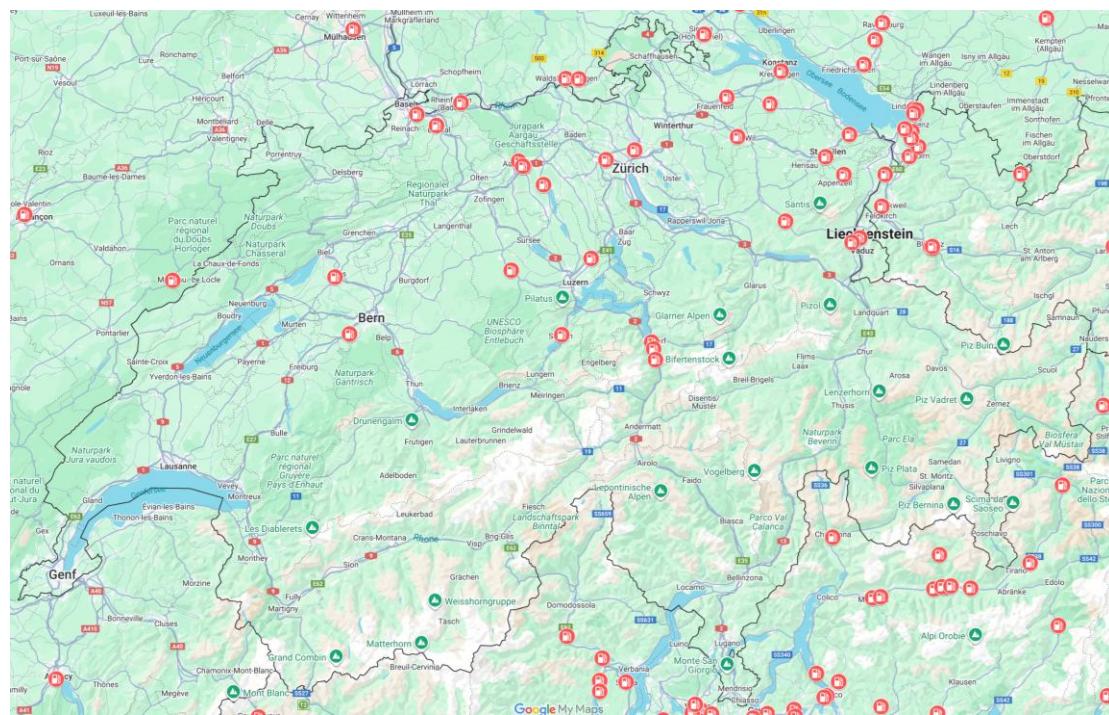
Zwei alternative Treibstoffe biogenen Ursprungs sind auf dem Schweizer Markt erhältlich: Fett-säure-Methylester (FAME) und hydriertes Pflanzenöl (HVO). Ersteres wird auch Biodiesel genannt und wird zu fossilem Dieselkraftstoff beigemischt und wird als B7 verkauft. Nach SN EN 590⁵ darf der Anteil von FAME maximal 7 Vol.-% ausmachen. Testkampagnen werden mit reinen FAME (B100) durchgeführt, aber aufgrund Materialkompatibilität ist dieser häufig nicht mit bestehenden Fahrzeugflotten kompatibel (Scania 2023). Auch wegen beschränktem Fliessverhalten bei Kälte und begrenzter Haltbarkeit ist der Verkauf in reiner Form (B100) nicht in naher Zukunft zu erwarten.

Hingegen ist der Verkauf von reinem HVO (HVO100) nach SN EN 15940⁶ in der Schweiz erlaubt und den Verbrauch von allen SNF-Herstellern freigegeben. Derzeit wird viel über HVO berichtet, da HVO100 in den EU-Ländern zunehmend an Tankstellen zugelassen wird (in Österreich und Italien ab 2023, in Deutschland und Frankreich ab 2024), aber auch schon vorher als Beimischung zu Diesel verfügbar war (z.B. HVO20 oder HVO50). In der Schweiz sind aktuell rund 25 Standorte mit HVO100-Tankstellen ausgerüstet (eFuelsNow 2025, vgl. Abbildung 37).

⁵ Schweizer Norm für Anforderungen und Prüfverfahren von Dieselkraftstoffen für Kraftfahrzeuge.

⁶ Schweizer Norm für Anforderungen und Prüfverfahren von paraffinischen Dieselkraftstoffen für Kraftfahrzeuge.

Abbildung 37: Tankstellen mit HVO100



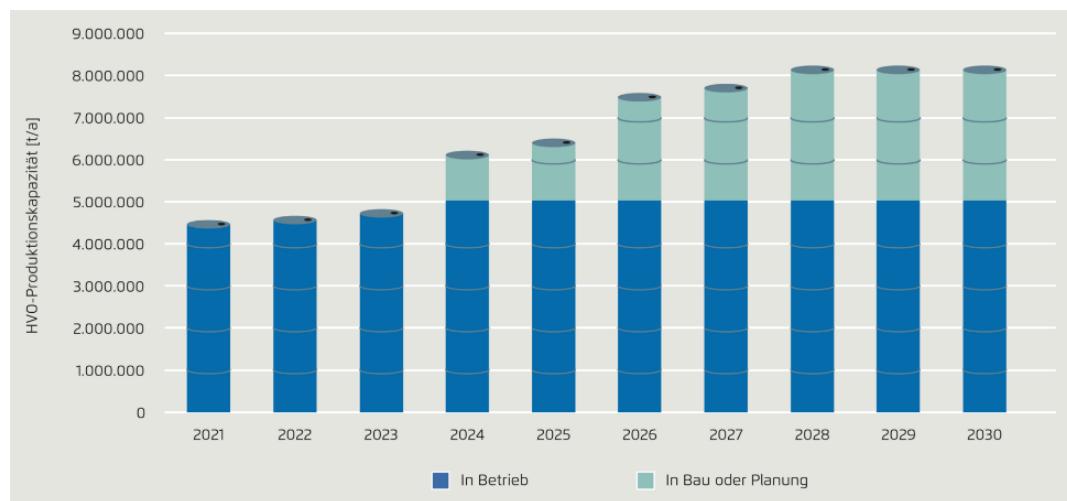
Grafik INFRAS. Quelle: eFuels Now 2025, Karte: GeoBasis-DE/BKG ©2009, Google ©2025.

HVO entsteht durch die Hydrierung pflanzlicher oder tierischer Fettstoffen und ist wie PtL ein paraffinischer Dieselkraftstoff. Seine Umweltauswirkung hängt stark von der Auswahl an Rohstoffen ab. Es sind 51% bis 89% CO₂eq Ersparnisse über den ganzen Lebenszyklus möglich (Agora Verkehrswende 2024)⁷. Nebenprodukte wie z.B. Palmölmühlenabwasser (POME) oder Abfallstoffe wie z.B. Altspeiseöl (UCO) weisen das grösste Treibhausgas-(THG-)Minderungspotenzial auf, sind jedoch nur sehr begrenzt verfügbar und kaum ausbaubar.

Die kurzfristige Auswirkung auf den Verkauf in reiner Form ist begrenzt, da der Treibstoff bereits in beigemischter Form die Produktionskapazität erschöpfte (Agora Verkehrswende 2024). Ein schneller und grossflächiger Markthochlauf ist durch die Rohstoffverfügbarkeit sowie die globalen Raffineriekapazitäten begrenzt. Selbst wenn zusätzliche Rohstoffmengen verfügbar wären, fehlen kurzfristig die notwendigen Anlagen, um diese in HVO umzuwandeln. In der EU steht 2024 eine Produktionskapazität von etwa 5 Mio. t zur Verfügung, weitere Anlagen (ca. 3 Mio. t) sind bis 2030 angekündigt. Im Vergleich dazu liegt die Dieselnachfrage in der EU im Jahr 2023 bei 252 Mio. t. Damit könnten bis 2030 rund 3% des jährlichen Energiebedarfs des Straßenverkehrs in EU gedeckt werden.

⁷ Unter den RED III zugelassenen Treibstoffen. Nicht zugelassene Herstellungspfade weisen teilweise Ersparnisse von nahezu null auf. LCA-Werte variieren stark zwischen verschiedenen Modellen (IEA Bioenergy 2018).

Abbildung 38: Existierende und geplante HVO/HEFA-Produktionskapazitäten in Europa

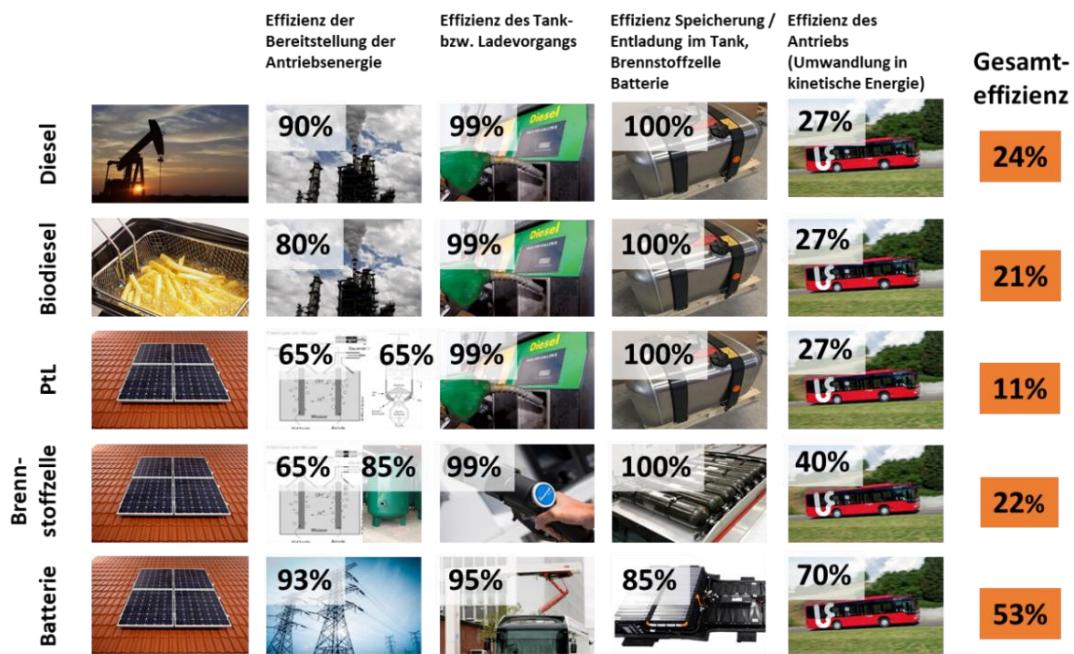


Grafik INFRAS. Quelle: Agora Verkehrswende 2024

Weitere Prozesse für die Produktion dieselähnlicher Treibstoffe befinden sich noch in der Entwicklung, wie z.B. Biomass to Liquid (BtL). Hier liegt der Fokus sowohl auf einer Ausweitung der potenziellen Rohstoffe als auch auf einer Reduzierung der THG-Emissionen in der Produktion. Bei Einsatz aller geeigneten Rohstoffe wäre 2030 bis zu 68% des jährlichen Energiebedarfs des Straßenverkehrs gedeckt (IEA 2023b). Jedoch wird mit zunehmender Konkurrenz um Rohstoffe aus anderen Sektoren gerechnet.

2.5. Energieeffizienz verschiedener Antriebstechnologien

Wenn man die Gesamteffizienz der Antriebsoptionen direkt gegenüberstellt, lässt sich eine Rangfolge der Antriebsoptionen erstellen (vgl. Abbildung 39): Elektroantriebe sind generell viel effizienter als Verbrennungsmotoren; gut 50% der Primärenergie fliesst in die Fortbewegung. Brennstoffzellenfahrzeuge sind höchstens halb so energieeffizient wie reine Batteriefahrzeuge. Grund dafür sind die Energieverluste, die bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und zurück zu Strom entstehen. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (Diesel oder Gas) weisen schon im direkten Betrieb eine relativ tiefe Energieeffizienz auf. Wenn noch eine tiefe Umwandlungseffizienz bei der Treibstoffproduktion hinzukommt – wie dies z.B. bei den synthetischen Treibstoffen aus Biomasse (Biomass to liquid; BtL) oder Strom (Power to liquid; PtL) der Fall ist – wird die Gesamteffizienz sehr tief.

Abbildung 39: Energieeffizienz verschiedener Treibstoff- bzw. Antriebsoptionen (Well-to-Wheel⁸)

Grafik INFRAS/OGS. Bemerkung: Die Gesamteffizienz errechnet sich durch die Multiplikation der Teileffizienz der Teilprozesse; Beispiel Diesel: 100% * 90% * 99% * 100% * 27% = 24%. Quelle: Eigene Bearbeitung INFRAS basierend auf PSI 2021.

2.6. Politische Rahmenbedingungen und Fördermittel

Ebene EU

Im Jahr 2019 hat die EU mit der Verabschiedung der Clean Vehicles Directive, EU-Richtlinie 2019/1161, Mindestziele für den Anteil sauberer (LEB) und emissionsfreier (ZEB) Busse bei Neuanschaffungen für öffentliche Auftraggeber festgelegt. Für den Zeitraum 2021-2025 gelten Mindestanteile zwischen 29 und 50%, für 2026-2030 erhöhen sich diese auf 43-75%. Mindestens die Hälfte davon müssen ZEB sein. Als ZEB gelten E-Busse (BEB, FCEB, Trolley) sowie Busse mit Verbrennungsmotor unterhalb von 1 gCO₂/kWh (z.B. H₂-ICE). Zu LEB zählen Hybridbusse sowie Verbrenner von Treibstoffen wie nachhaltige Biotreibstoffe, strombasierte Treibstoffe und Erdgas (European Commission 2019).

Mit Verschärfung der Heavy-Duty Vehicles Regulation vom Mai 2024, EU-Verordnung 2024/1610, werden Bushersteller verpflichtet, ab 2030 Mindestanteile von ZEB an

⁸ Betrachtungsmethode (wörtlich: «vom Bohrloch bis zum Rad»): Dabei wird die gesamte Wirkungskette für die Fortbewegung von der Gewinnung und Bereitstellung der Antriebsenergie bis zur Umwandlung in kinetische Energie untersucht. Somit ist der Energiebedarf zur Herstellung des Fahrzeugs, der Betankungsanlagen, der Brennstoffzellen oder der Batterien nicht inkludiert.

Stadtbusverkäufe sowie Mindestreduktionen an CO₂-Emissionen der Überland- und Reisebusflotte zu erreichen. Bis 2030 sollen 90% der verkauften Stadtbusse emissionsfrei sein, bis 2035 100%. Die CO₂-Emissionen von Überland- und Reisebussen sollen sich bis 2030 um 43% gegenüber 2025 reduzieren, bis 2035 um 64% und bis 2040 um 90%. ZEB werden in ähnlicher Weise definiert, jedoch mit einem Emissionsgrenzwert von 1 gCO₂/pkm (ICCT 2024c).

Bundes- und Kantonsebene

Der Bund übernimmt im regionalen Personenverkehr (RPV), den er gemeinsam mit den Kantonen bestellt, bei der Beschaffung von Elektrobussen 75% der Mehrkosten. Bei Bussen im übrigen konzessionierten Verkehr (Ortsverkehr, Angebote ohne Erschliessungsfunktion) übernimmt der Bund 30% der Mehrkosten. Für Busse ist eine Pauschale pro Fahrzeugtyp vorgesehen. Ab 2027 kann der Bund aufgrund der Sparmassnahmen nur noch E-Busse fördern, die im RPV eingesetzt werden⁹. Fördermittel aus dem myclimate-/KliK-Kompensationsprogramm können zusätzlich beantragt werden. Dabei wird der KliK-Beitrag zur Emissionsreduktion entsprechend der Wirkungsaufteilung zwischen den beiden Programmen reduziert.

Weiter ist die Abschaffung der Mineralölsteuerrückerstattung ab 2026 im Ortsverkehr vorgesehen. Die Umsetzung im RPV ist noch offen und abhängig vom politischen Prozess (Bericht EFD zum Entlastungspaket 27, Stand März 2025).

Für die Eingabe des Agglomerationsprogramms 6. Generation¹⁰ des ARE können Ladeinfrastrukturmassnahmen berücksichtigt werden. Beiträge an entsprechende Mehrkosten des Rollmaterials können ausgerichtet werden, falls erhebliche Infrastrukturstarkosten eingespart werden.

Weiter gibt es teilweise kantonale Förderungen für fossilfreie Busse, diese sind jedoch sehr unterschiedlich gestaltet. Die gesamte Finanzierung ist in der Regel durch das TU in einem Betriebsmittelgesuch inkl. aller Beiträge den betroffenen Bestellern aufzuzeigen.

⁹ Siehe <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/umwelt/forderung-elektrischer-antriebe.html>

¹⁰ Siehe <https://www.are.admin.ch/de/agglomerationsprogramme-6-generation>

3. Teil II: Vertiefung E-Busse und Umstellungsstrategien

3.1. Systemgrenze und Abgrenzung

Die technologischen Entwicklungen, die in Teil I aufgezeigt wurden, veranschaulichen den aktuellen Stand bzw. Fortschritt in verschiedenen Bereichen fossilfreier Antriebstechnologien. Insbesondere wird deutlich, dass Batteriebusse als Depot- und Kombilader derzeit die vielversprechendste Lösung zur Dekarbonisierung des Linienbusverkehrs darstellen.

Im zweiten Teil der Technologiestudie werden nun die Aspekte beleuchtet, die für Transportunternehmen von besonderer Relevanz sind und im Zuge der Umstellung auf E-Busse zunehmend an Bedeutung gewinnen. Denn die Flexibilität sinkt und die Fahrzeugdisposition wird komplexer, je höher der Elektrifizierungsgrad ist. Der Fokus liegt im Folgenden auf den meist verbreiteten Schlüsseltechnologien – Batteriebussen als Depotlader bzw. als Kombilader – mit Dieselbussen als Referenz, da diese aktuell noch den Grossteil der Flotte von vielen TU ausmachen. Statische und dynamische Gelegenheitslader, auch wenn sie für einige TU relevante Bestandteile der Dekarbonisierungsstrategie darstellen, werden im Folgenden nicht weiter vertieft.

3.2. Kostenentwicklung

3.2.1. Anschaffungskosten der Fahrzeuge

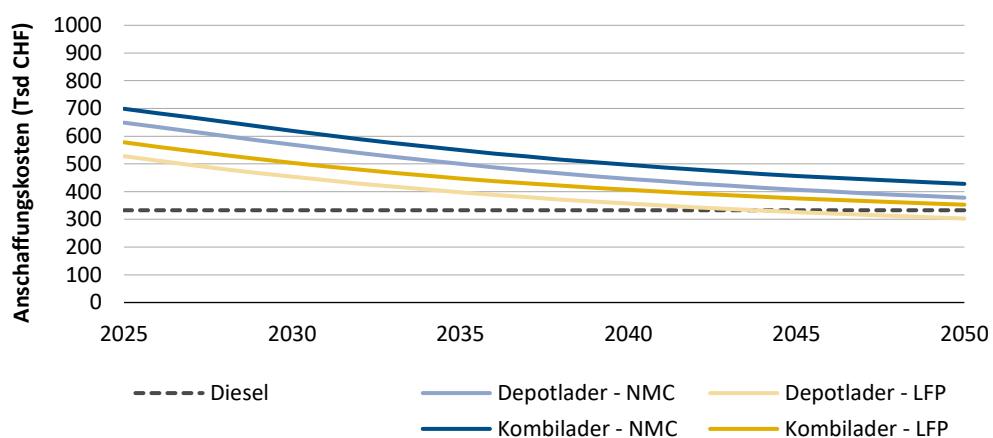
Abbildung 40 vergleicht die heutigen Anschaffungskosten der verschiedenen Bustypen je nach Antriebstechnologie für den Standardbus (oben) und den Gelenkbus (unten) und deren Entwicklung bis 2050 ohne Kosten für Batterieersatz. Wie sich die Dieselbuspreise längerfristig entwickeln werden, ist noch unklar. Aufgrund zukünftiger verschärfter Abgasnormen (Euro-7) und stark sinkender Stückzahlen ist auch ein Preisanstieg möglich bzw. denkbar. Im Durchschnitt sind die Batteriebusse im Jahr 2025 bei den Standardbusse um den Faktor 1.6 bis 2.1 bzw. bei den Gelenkbussen um 1.5 bis 1.9 teurer als die Dieselbusse. Bis 2040 reduzieren sich diese Faktoren auf 1.1 bis 1.5 bzw. 1.1 bis 1.4. Die aktuellen Anschaffungskosten basieren auf verschiedenen Daten von gekauften E-Bussen von TU in der CH. Die Prognosen bis 2050 wurden im E-Bus-Tool von INFRAS (2025) implementiert und basieren auf aktuellen wissenschaftlichen Publikationen.

Um sinnvolle, generische Aussagen zu erhalten, werden die Fahrzeugpreise im E-Bus-Tool von INFRAS detailliert modelliert. Das Modell nimmt die Preise von Dieselbussen verschiedener Größen als Basis. Für die anderen Antriebstechnologien werden, basierend auf den heutigen Marktpreisen, Zuschläge zu diesem Basispreis definiert. Bei Elektrobussen beinhalten diese Aufpreise noch keine Batterien. Diese werden separat berücksichtigt. Damit kann im Modell sehr einfach die Batteriegröße oder Zellchemie eines Busses verändert werden. Die

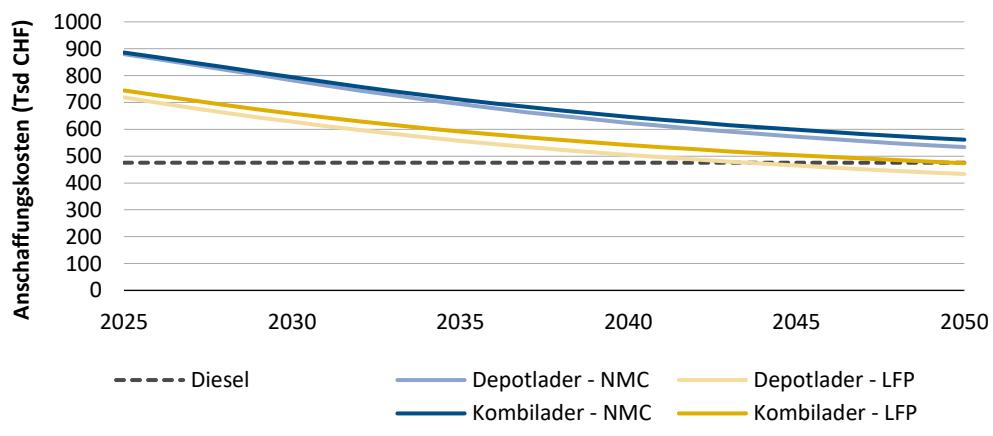
Entwicklung der Kosten hängt stark von der Antriebstechnologie ab. Dieselbusse sind lang etabliert und breit aufgestellt, sodass nur noch wenig Kostenoptimierungspotenzial besteht. Bei den Batteriebussen hingegen sind signifikante Lern- und Skaleneffekte möglich, die zu markanten Preisreduktionen führen werden (Fraunhofer ISI 2024c). So wird berücksichtigt, dass die Batteriekosten rascher sinken werden als jene für den Elektroantrieb.

Abbildung 40: Anschaffungskosten der Fahrzeuge im Zeitverlauf

Standardbus (12 m)



Gelenkbus (18 m)

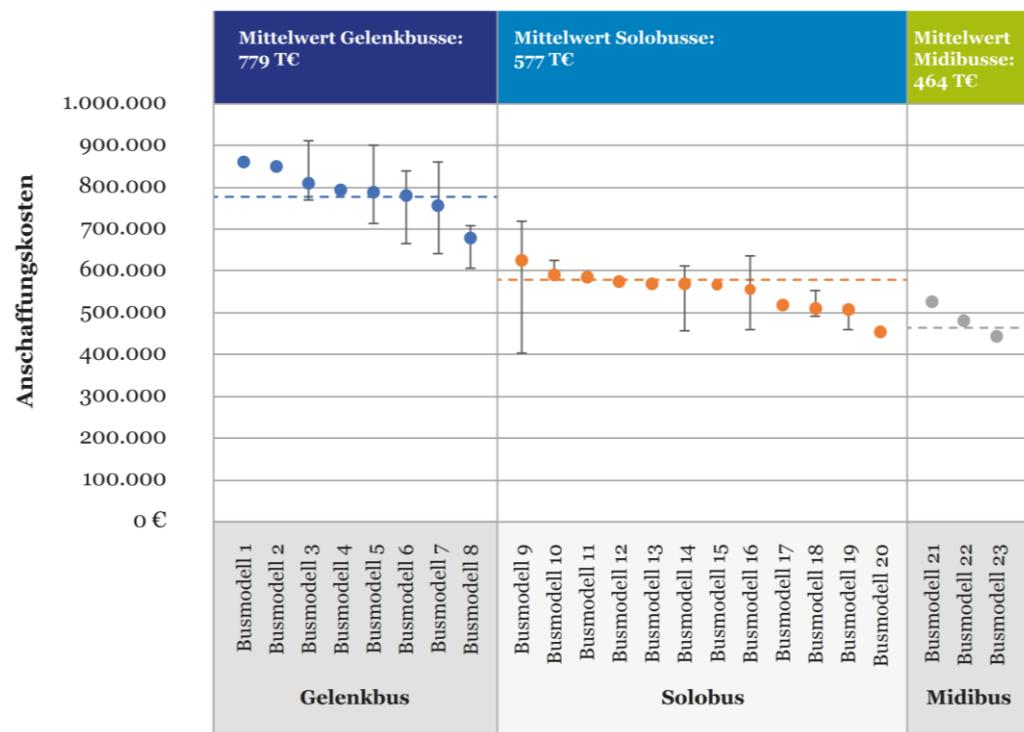


Grafik INFRAS. Quelle: INFRAS-e-Bus-Tool (INFRAS 2025). Für Kombilader wird die gleiche Batteriekapazität wie für Depotlader angenommen.

Die Anschaffungskosten für Busse mit verschiedenen Antrieben variieren in Realität jedoch recht stark. Gründe dafür können unterschiedliche Hersteller, Ausstattungen, Bauart, Batteriekapazität und -garantie oder Marktsituationen sein. Abbildung 41 zeigt die Anschaffungskosten der geförderten Busmodelle in Deutschland im Zeitraum 2018–2023. Die absoluten Werte liegen etwa 15% unter denen in der Schweiz, was zu erwarten ist. Die relativen Unterschiede

zwischen Gelenk- und Solobussen entsprechen den im e-Bus-Tool (INFRAS 2025) modellierten Kosten.

Abbildung 41: Anschaffungskosten E-Busse nach Busmodell in Deutschland (n=1'179)



Mittlere Anschaffungskosten und Spannbreite nach Busmodell aus Stammdaten der BMWK-geförderten Busse in Deutschland im Zeitraum 2018–2023. Stammdatenbank umfasst 527 Gelenkbusse, 682 Solobusse (Standardbusse), und 11 Midibusse. Busmodelle werden aus Datenschutzgründen anonymisiert.

Grafik INFRAS. Quelle: PwC 2024

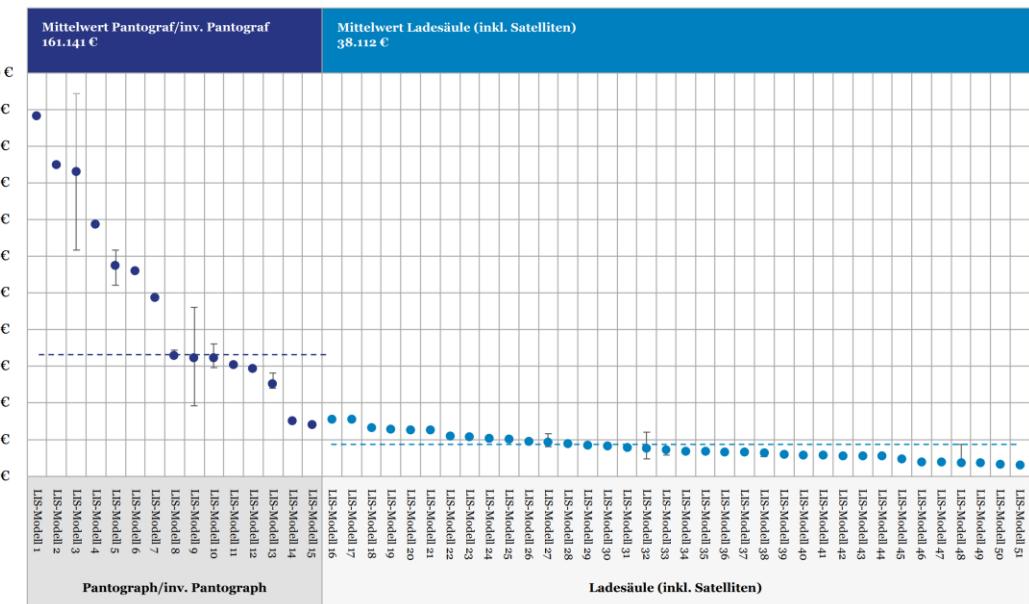
3.2.2. Kosten der Ladeinfrastruktur

Die notwendigen Investitionen in die Ladeinfrastruktur hängen von den lokalen Gegebenheiten der einzelnen Depots ab, insbesondere von den Kosten für die Mittelspannungszuleitung. Aktuelle Erfahrungen der TU zeigen, dass pro Ladepunkt mit einer Ladeleistung von 150 kW durchschnittliche Kosten von 150'000 bis 200'000 CHF (inkl. Trafo und Zuleitungen) anfallen. Anpassungen in der Werkstatt sind dabei nicht berücksichtigt.

Im Fall von einzelnen, dezentralen Schnellladestationen mit 450 kW für Kombilader fallen Gesamtkosten zwischen 800'000 und 1'000'000 CHF (stark von den Tiefbaurbeiten bzw. Netzanschluss abhängig). Einzelne Ladepunkte sind jedoch nicht skalierbar. Abbildung 42 zeigt die aktuellen Anschaffungskosten für Ladestationen in Deutschland (ohne Tiefbau, Stromanschluss usw.), die sich gut mit den Erfahrungen in der Schweiz decken. Nach heutigem Kenntnisstand

kann davon ausgegangen werden, dass die zukünftigen Kosten für die Ladeinfrastruktur stabil bleiben werden. Eine verlässliche Prognose über mögliche Veränderungen im Zuge der Marktentwicklung ist derzeit nicht möglich.

Abbildung 42: Anschaffungskosten (nur Hardware) der Ladestationen nach Segment in Deutschland



Bemerkung: Auf der X-Achse sind anonymisierte Ladestation-Modelle aufgeführt. Die Y-Achse zeigt die entsprechenden durchschnittlichen sowie maximalen Anschaffungskosten aus der Stammdatenbank (n = 916 Ladestationen). Pantograph (links) mit höheren Ladeleistungen zwischen 300 kW und 500 kW, Ladesäule (rechts) im Depot mit Stecker und Ladeleistungen zwischen 100 kW und 150 kW.

Grafik INFRAS. Quelle: PwC 2024.

Die Kosten für die Ladeinfrastruktur in Busdepots setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Neben den reinen Hardwarekosten für die Ladestationen spielen auch Installationsarbeiten, Netzanschlussgebühren sowie Software- und Betriebskosten eine entscheidende Rolle. Während die Errichtung einzelner Ladepunkte vergleichsweise teuer ist, zeigen sich bei grösseren Installationen Skaleneffekte, die die Kosten pro Ladepunkt senken können.

Ein wichtiger Kostentreiber ist der Netzanschluss inklusive Redundanz (z.B. Stromversorgung von zwei Unterwerken). Die Errichtung oder Anpassung einer Transformatorenstation bzw. der Ausbau des Stromnetzes verursacht hohe Fixkosten, die sich bei wenigen Ladepunkten stark auf die Gesamtkosten auswirken. Wird jedoch eine grössere Anzahl an Ladepunkten installiert, sinken die durchschnittlichen Kosten pro Ladepunkt.

Ähnliches gilt für die Baumeisterarbeiten und Verkabelung. Andererseits entstehen sprunfixe Kosten, wenn eine zusätzliche Trafostation benötigt wird. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, den Netzanschluss inkl. Redundanz, Anzahl/Grösse der Transformatoren und

Gleichrichter inkl. Verkabelung für den Zielzustand zu dimensionieren bzw. zu bauen, während die Ladestationen aus betriebswirtschaftlichen Gründen zu staffeln sind.

3.2.3. Betriebskosten

Im Folgenden werden die relevanten Betriebskosten beleuchtet:

- **Fahrzeugunterhaltskosten:** Der Dieselbus hat viele bewegliche Teile (z.B. Motor, Getriebe) sowie regelmässige Öl- und Filterwechsel. Der E-Bus hingegen hat weniger bewegliche Teile und der Bremsverschleiss ist durch die Rekuperation geringer. Allerdings haben E-Busse eine aufwändiger elektronische Diagnostik und verbrauchen aufgrund des höheren Drehmoments und Fahrzeuggewichts mehr Reifen. Die Auswirkungen dieser Unterschiede auf die Wartungs- und Instandhaltungskosten sind bisher noch unklar bzw. es fehlen verlässliche Daten. NOW GmbH (2025) geht von nur geringfügig niedrigeren Wartungskosten für E-Busse aus und PwC (2024) berichtet von unterschiedlichen Erfahrungen der TU. Bei den Unterhaltskosten wird somit häufig davon ausgegangen, dass sich Diesel- und Batteriefahrzeuge nicht wesentlich unterscheiden, wenn bei Batteriebussen jeweils der Batterieersatz berücksichtigt wird, d.h. im Bereich der Fahrzeuginstandhaltung wird von einem gleichbleibenden Aufwand ausgegangen. Derzeit wird von diversen TU davon ausgegangen, dass alle acht Jahre ein Batterieersatz erforderlich ist (Gesamtbatterie, nicht modulweise). Diese Annahmen werden sich in Abhängigkeit von der technologischen Entwicklung sehr wahrscheinlich noch ändern (derzeit zeichnet sich im PW-Bereich ab, dass ein Batterieersatz überflüssig wird).
- **Ladeinfrastrukturunterhaltskosten:** Derzeit wird von Unterhaltskosten für Ladestationen in Höhe von 2-5% der Investitionskosten pro Jahr und Ladepunkt über den gesamten Lebenszyklus ausgegangen. Diese Annahme berücksichtigt verschiedene Kostenfaktoren, darunter Verschleiss und Abnutzung von Kontaktteilen bei Pantographen, Defekte an Software, Kabeln und Steckern sowie die regelmässige Kontrolle der Elektroinstallationen. Diese Schätzungen könnten möglicherweise zu hoch angesetzt sein, falls sich Technologien und der Umgang mit Ladestationen durch zunehmende Erfahrungen in Zukunft verbessern. Eine präzisere Abschätzung der tatsächlichen Kosten ist derzeit jedoch noch nicht möglich, da dafür mindestens ein vollständiger Lebenszyklus der Ladeinfrastruktur abgewartet werden muss. Bisher sammelten die TU erste Erfahrungen mit dem Unterhalt. Grösstenteils handelte es sich bislang jedoch um Garantiearbeiten.
- **Stromkosten:** Falls ein Transportunternehmen Strom vom freien Markt bezieht, da der Energiebedarf ausreichend hoch ist, ist eine Preisabsicherung – ähnlich wie beim Diesel – essentiell, um Schwankungen beim Strompreis abzufedern. Zudem trägt ein intelligentes Lastmanagement dazu bei, hohe Lastspitzen und damit verbundene Leistungskosten zu minimieren.

- **Ausbildungskosten:** Die notwendigen Schulungen orientieren sich am Bestand und Bedarf an entsprechendem Fachpersonal in der Werkstatt. Sind keine Kenntnisse im Hochvoltbereich vorhanden, ist bei einer Flottengrösse von bis zu 50 Bussen mit Ausbildungskosten von ca. 150'000 CHF zu rechnen (BAV 2019).
- **Betriebliche Mehrkosten durch zusätzliche Fahrzeug-Austauschfahrten:** Die Elektrifizierung der Busflotte mit Depotladern führt zu vermehrten Depotein- und Depotausfahrten gegenüber dem heutigen Busbetrieb, weil E-Busse auch untertags zum Nachladen ins Depot zurückkehren müssen. Die Höhe der Mehrkosten ist abhängig von der Distanz zum Depot, dem Fahrplan und der Entwicklung der Reichweiten. Bei Kombiladern fallen dagegen weniger oder gar keine zusätzlichen Fahrzeugaustauschfahrten an.
- Bei der Elektrifizierung entstehen **Wechselwirkungen** zwischen Umlaufplanung, Ladezeiten bzw. Leistungspreisen und der Anzahl benötigter Fahrzeuge. Kürzere Ladefenster oder hohe Leistungspreise erfordern oft zusätzliche Fahrzeuge, um die Fahrpläne aufrechtzuerhalten. Umgekehrt kann eine optimierte Umlaufplanung mit längeren Ladepausen oder intelligentem Lastmanagement die Zahl der Fahrzeuge und die Infrastrukturkosten reduzieren. Die drei Faktoren beeinflussen sich gegenseitig und müssen im Gesamtsystem optimiert werden (vgl. Kap. 3.6).

3.3. Anforderungen an der Infrastruktur

Die Umstellung der Busflotte auf E-Busse erfordert tiefgreifende Anpassungen im Depot und in der Werkstatt – sowohl in Bezug auf die Infrastruktur als auch auf Prozesse und Personal. In der früheren Phase der Umstellung können die ersten Elektrobusse beschafft und erprobt werden. Da weiterhin ausreichend Dieselbusse als Reserve verfügbar sind, treten zunächst keine grösseren Herausforderungen auf. Auch die Ladeprozesse und die Disposition im Depot bleiben relativ einfach. Mit dem Fortschreiten der Umstellung wird das ganze System jedoch zunehmend komplexer. Dies betrifft sowohl die Infrastruktur als auch den Betrieb der Busse.

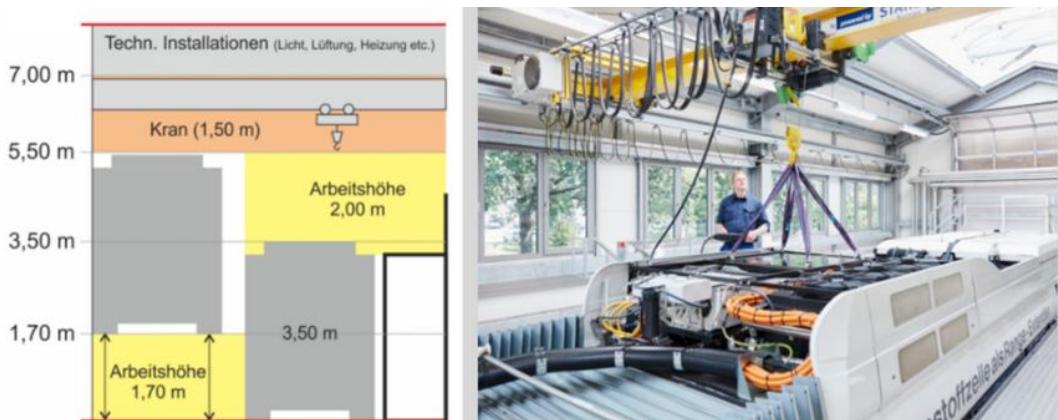
Anpassungen im Depot und Werkstatt

Die wichtigsten Anpassungen im Depot und Werkstatt werden im Folgenden erläutert:

- **Infrastruktur und Ladeeinrichtungen:** Platzbedarf für die Ladeinfrastruktur und allfällige zusätzliche Fahrzeuge ist vorzusehen. Gleichzeitig ist eine Anpassung der Netzkapazität notwendig, um die Stromversorgung inkl. Redundanz sicherzustellen und Lastspitzen durch ein Lastmanagement zu vermeiden. Dabei ist auf die Umlaufpläne und die Anzahl der Fahrzeuge zu achten. Zudem sind spezielle Vorkehrungen zur Risikominimierung und zum Brandschutz aufgrund der Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien erforderlich (vgl. Kapitel Brandschutz).

- **Anpassung der Werkstatt & Wartungskonzepte:** Zur sicheren Wartung von E-Bussen sind spezielle Wartungsbereiche mit isolierten Werkzeugen und entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen erforderlich. Die Wartungszyklen unterscheiden sich von denen der Dieselbusse, da weniger mechanischer Verschleiss auftritt, aber eine intensivere Elektronikdiagnose notwendig ist. Zudem müssen zusätzliche Einrichtungen für Arbeiten auf dem Busdach sowie Arbeitsplätze für die Batteriediagnose und Reparatur geschaffen werden. Für die Integration eines Dacharbeitsstands ist eine lichte Höhe von mindestens 7 m erforderlich (vgl. Abbildung 43). Weiter sind Hebe- und Prüfgeräte an das höhere Gewicht und die veränderten Schwerpunkte der Elektrobusse anzupassen. In der VDV-Schrift 825 ist eine Mindestausstattung der Werkstätten für Elektrobusse aufgeführt.

Abbildung 43: Erforderliche Innenraumhöhe E-Bus-Werkstatt



Grafik INFRAS. Quelle: BAV (2019)

- **Schulung & Qualifikation des Personals:** In der Schweiz dürfen gemäss Starkstromverordnung für die Beaufsichtigung von Arbeiten an oder in Starkstromanlagen nur sachverständige Personen eingesetzt werden. Das Werkstattpersonal muss für Arbeiten an Hochvoltsystemen entsprechend zertifiziert werden (z.B. Weiterbildung als «Fachkundige Person Hochvolt»). Zusätzlich sind Schulungen zum Notfallmanagement erforderlich, um auf Batteriebrände, Kurzschlüsse und elektrische Gefahren vorbereitet zu sein. Weiter sind umfassendere Software-Anwenderkompetenzen im Bereich der Diagnosetools und Ladeplanung nötig.

Sicherheit und Brandschutz

Die bisherigen Schadenerfahrungen zeigen keine höhere Brandwahrscheinlichkeit bei Elektrobusen im Vergleich zu Dieselbussen (VdS Schadenverhütung 2023). Im Fahrbetrieb oder im abgestellten Zustand (ohne Ladung) besteht bei Elektrobusen grundsätzlich kein erhöhtes Brandrisiko. Es ist davon auszugehen, dass die Brandgefahr im Ladebetrieb am grössten ist.

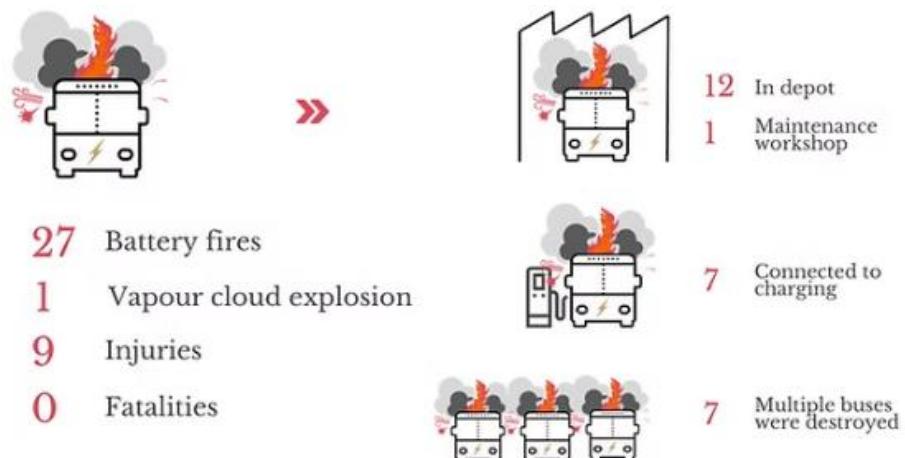
Traktionsbatterien sind aufgrund ihres hohen Energieinhaltes und ihrer chemischen Eigenschaften¹¹ schwer zu löschen. Daher steht die Verhinderung der Brandausbreitung im Vordergrund und es gelten erhöhte Anforderungen bei Ladevorgängen im Depot. Folgende Empfehlungen zum Brandschutz sind zu beachten (BAV 2019, NOW GmbH 2023):

- In Garagen oder Werkstätten ist das Risiko eines Brandübersprungs am grössten und die Verhinderung der Brandausbreitung steht im Vordergrund. Dazu gehören möglichst kleine Brandabschnitte, die durch Brandschutztüren abgetrennt sind, und möglichst grosse Abstände zwischen den Fahrzeugen. Die Abgrenzungen zwischen den Bahnen können die Ausbreitung verhindern bzw. verlangsamen und das Risiko eines Totalverlustes verringern.
- Es wird empfohlen, die Mittelspannungsanlage (Schaltanlage, Transformatoren, Steuerungstechnik) brandschutztechnisch in getrennten Bereichen vom übrigen Busdepot zu planen.
- Zur schnellen Brandlöschung im Depot sind Hochdruck-Vernebler für den Abstellbereich der Busse am effizientesten. Im Bereich der elektrischen Installationen zur Umspannung und Gleichrichtung sind jedoch Gaslöschanlagen zu empfehlen.
- Thermomanagementsysteme mit Frühwarnsystemen sind von zentraler Bedeutung, um eine Überhitzung der Batterie zu vermeiden und das Risiko einer Havarie vorsorglich zu minimieren. Die Überwachung der Ladevorgänge hilft, kritische Situationen frühzeitig zu erkennen. Um die Abwärme der Ladestationen abzuführen, sollte ausserdem eine ausreichende Belüftung gewährleistet sein.
- Die genauen Anforderungen sind mit der Baubewilligungsbehörde/Feuerpolizei, den Herstellern sowie der Versicherung zu prüfen bzw. abzuklären.

Weltweit sind aktuell ca. 250'000 Elektrobusse im Einsatz. Zwischen 2010 und Januar 2024 sind 27 Brände von Elektrobussen bekannt. In sieben Fällen wurden mehrere Fahrzeuge zerstört (vgl. Abbildung 44). Eine wichtige Beobachtungen ist, dass sich ein Feuer in einem Busdepot rasch auf benachbarte Fahrzeuge ausbreiten kann, wie etwa beim Brand im Hauptbetriebshof der Stuttgarter Strassenbahnen (SSB) im Jahr 2021. Obwohl der Brandschutz im Depot sorgfältig geplant werden muss, stellen E-Busse kein erhöhtes Brandrisiko dar (VDV 2024a). Erste Statistiken zeigen, dass batterieelektrische Busse etwa zehnmal weniger brandgefährdet sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (NZ Transport Agency Waka Kotahi 2025, Gallagher 2023).

¹¹ Die Zersetzung einer Batteriezelle führt zu einer exothermen chemischen Reaktion zwischen Kathode und Anode, bei der Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Wird die selbstbeschleunigende Zersetzungstemperatur (SADT, Self-Accelerating Decomposition Temperature) überschritten, setzt die Reaktion so viel Wärme frei, dass sie sich selbst weiter beschleunigt. Externe aktive Kühlmechanismen können die überschüssige Wärme ableiten und somit die Reaktionsgeschwindigkeit wieder verringern. Wird jedoch die thermische Durchbruchstemperatur (Thermal Runaway Temperature) erreicht, verläuft die Reaktion so schnell, dass sie durch externe Kühlmechanismen nicht mehr gebremst werden kann. Dies kann zu einer Verbrennung führen, die sich auf benachbarte Zellen ausbreitet. Unter Umständen kann es zu einer Explosion der freigesetzten Gaswolke kommen (EV FireSafe 2021).

Abbildung 44: Übersicht der Brände von Elektrobussen seit 2010



Grafik INFRAS. Quelle: EF Fire Safe (2024)

In Basel haben die BVB für den Neubau der Garage Rank ein Brandschutzkonzept erarbeitet, um das Risiko des Verlusts eines Teils der Flotte zu minimieren. Die Lösung besteht darin, die Abstellanlage in Brandabschnitte zu unterteilen, so dass im Brandfall maximal 16 Elektrobussen betroffen sind. Neben Brandmelde- und Sprinkleranlagen kommen weitere Sicherheitssysteme wie die fahrzeuginterne Überwachung der Batteriezellen zum Einsatz. Diese dienen der Früherkennung von Auffälligkeiten und reduzieren somit das Brandrisiko. Auffällige E-Busse werden auf einem speziellen Abstellplatz (Havariefläche) ausserhalb der Garage abgestellt. Das betroffene Batteriepaket wird dann eingehend geprüft und gegebenenfalls ausgetauscht.

Abbildung 45: Visualisierung Neubau Garage Rank (144 Abstellplätze, offen an 2 Seiten)



Grafik INFRAS. Quelle: Itten+Brechbühl AG 2025

Das Brandschutzkonzept der ZVB für den Neubau HSP in Zug sieht nicht Brandabschnitte, sondern sogenannte Rauchabschnitte vor. Die maximale Grösse eines Rauchabschnitts beträgt 6 Abstellbahnen à 80 m, was einem Totalverlust von max. 36 Bussen entspricht.

Automatisierung des Busdepots

Die Automatisierung eines Busdepots umfasst den Einsatz digitaler Technologien, Sensorik, Robotik und künstlicher Intelligenz, um Betriebsabläufe effizienter zu gestalten. Dazu gehören automatisierte Ladeschnittstellen (nur mit Pantograph oder mit induktivem Laden möglich und nicht mit Steckerladung), digitale Flottenmanagement-Systeme, autonomes Rangieren der Fahrzeuge sowie automatisierte Wartungs- und Reinigungsprozesse. Die Automatisierung bietet unter anderem folgende Vorteile:

- **Optimierte Ladeprozesse:** Optimierte Betriebshofprozesse und Ladevorgänge reduzieren Standzeiten und Lastspitzen und verbessern die Verfügbarkeit bzw. den Umlauf der Busse, insbesondere wenn die Flotte aus E-Bussen mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten bzw. Reichweiten besteht.
- **Höhere Betriebssicherheit und Kosteneinsparung:** Automatisierte Prozesse minimieren bzw. vermeiden Fehler und Unfälle im Depot. Weniger Personalaufwand und optimierte Energie- und Ressourcenverwendung senken die Betriebskosten.
- **Flexibilität im Depot und Skalierbarkeit:** Die E-Busse können im Depot beliebig geparkt und bei Bedarf automatisch umgeparkt werden, wenn ein hinterer Bus benötigt wird. Die Automatisierung erleichtert den Übergang zu einer vollständig elektrifizierten Flotte und passt sich zukünftigen Technologien an.

Im Folgenden werden einige aktuelle Projekte und Best Practices kurz vorgestellt:

- **SAAM.swiss – AutoDepot:** Das AutoDepot-Projekt stellt einen innovativen Ansatz für die Automatisierung von Busdepots vor, bei dem fortschrittliche infrastrukturbasierte Technologie zur Verbesserung von Effizienz und Sicherheit eingesetzt wird. Innerhalb des Betriebshofs fahren die Busse mit einer Höchstgeschwindigkeit von 3 km/h. Die Intelligenz des Systems liegt in der Infrastruktur und nicht in den Bussen selbst, die mit Drive-by-Wire-Technologie¹² ausgestattet sind und über keine Onboard-Automatisierung verfügen. Das System basiert auf einer Fernüberwachung. Wenn ein Bus auf ein Hindernis stößt, wird das zentrale Managementsystem benachrichtigt und eine Warnung an die Betriebszentrale ausgegeben. Konsortialpartner des Projekts: AMAG, BERNMOBIL, Embotech AG, PostAuto, SAAM, HEIA-FR, HEG-FR, UNIFR, TPG, TPF, VBSH, VBZ.
- **Deutschland – TU-Dresden:** Das Projekt IDEA (2023-2024) hatte das Ziel, die Automatisierung von Depots in TU mittels innovativer, funkbasierter Kommunikation zwischen autonom bewegten Fahrzeugen sowie einem Depot-Managementsystem über ein 5G-Campus-

¹² Die Drive-by-Wire-Technologie, bei der mechanische Verbindungen durch elektronische Steuerungen ersetzt werden, gilt als Schlüsseltechnologie für zukünftige Entwicklungen des autonomen Fahrens. Unternehmen wie die PARAVAN GmbH haben Drive-by-Wire-Systeme entwickelt, die in verschiedenen Fahrzeugklassen nachrüstbar sind und über eine Strassenzulassung verfügen. Derzeit sind jedoch noch keine Linienbusse mit serienmässiger Drive-by-Wire-Technologie verfügbar.

Netzwerk zu erforschen und mit realen Fahrzeugen zu erproben. IDEA ist Teil des Programms zur Förderung innovativer Netztechnologien im Mobilfunk (InnoNT) und wurde mit 3 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert.

- **Frankreich – RATP und Partner:** Im Jahr 2018 rüsteten RATP und Iveco Bus in Paris einen Bus mit Sensoren und Navigationssteuerungen nach, um autonome Parkmanöver durchzuführen. Das Projekt hat das Potenzial aufgezeigt, die Arbeitszeit des Fahrers und den Bedarf an Parkraum zu reduzieren und den Fahrer mit technischen Hilfsmitteln zu unterstützen.
- **Schweden – Volvo und Keolis:** Im Jahr 2019 haben Volvo und Keolis einen autonomen Bus auf einem Betriebshof in Göteborg vorgeführt und gezeigt, dass er in der Lage ist, selbstständig vom Parkplatz zum Reinigungs- und Ladebereich zu navigieren. Dank der OppCharge-Technologie konnte der Bus ohne manuellen Anschluss aufladen, was den nahtlosen autonomen Betrieb auf dem Betriebshof verdeutlicht.
- **Südkorea – Seoul Robotics LV5 CTRL TWR:** Das entwickelte System, das in Zusammenarbeit mit BMW eingesetzt wird, demonstriert die Leistungsfähigkeit des infrastrukturbasierten Fahrzeugmanagements. Das Ergebnis ermöglicht Tausenden Fahrzeugen das gleichzeitige autonome Fahren in einem kontrollierten Netzwerk.
- **Deutschland – BMW, Seoul Robotics, Embotech & andere:** Das Projekt «Automatisiertes Fahren im Werk» der BMW Group führt im Jahr 2021 das autonome Fahren auf dem Werksgelände ein, wobei infrastrukturelle Sensoren anstelle von fahrzeugmontierten Sensoren verwendet werden.

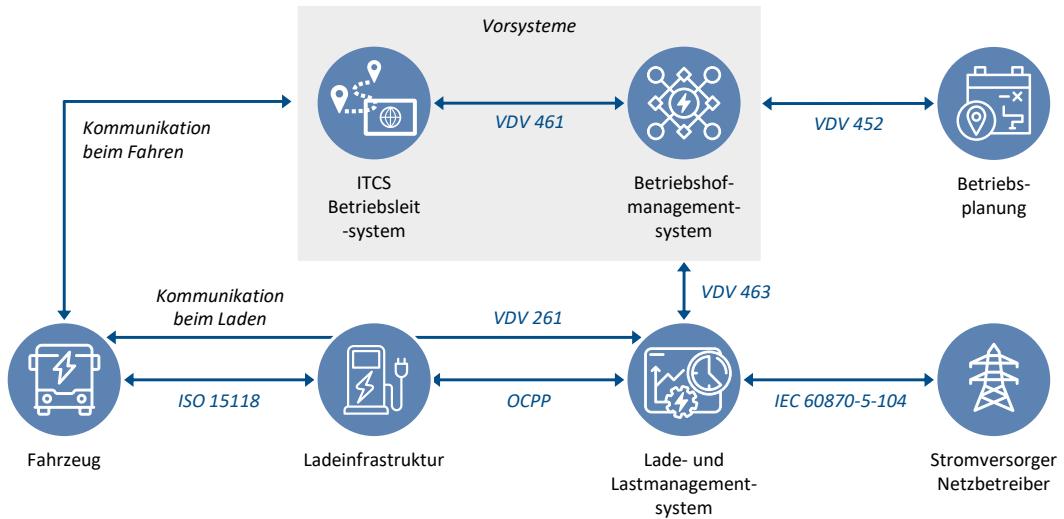
3.4. Anforderungen an die IT-Umgebung

IT-Systemlandschaft und die Rolle des Betriebshofmanagements

Abbildung 46 zeigt beispielhaft die IT-Systemlandschaft eines Transportunternehmens, das neben dem Laden der E-Busse auch alle anderen Prozesse im Depot und im Fahrzeugeinsatz plant und steuert. Bezogen auf den Betrieb mit E-Bussen sind das Betriebsleitsystem, das Betriebshofmanagementsystem, das Lademanagementsystem sowie die Ladeinfrastruktur die Kernelemente.

Das Betriebshofmanagement spielt eine zentrale Rolle im Fortschritt der Elektrifizierung der Busflotte. Eine der wichtigsten Aufgaben ist die Koordination der Ladevorgänge, wobei die Ladezeiten mit Hilfe eines Lademanagementsystems strategisch geplant und die Netzelastung optimiert werden, um teure Leistungsspitzen zu minimieren.

Abbildung 46: Systemlandschaft Elektrobusbetrieb



Grafik INFRAS. Quelle: VDV (2024b)

Gleichzeitig stellt das Betriebshof- und Lademanagement sicher, dass die Fahrzeuge entsprechend ihrer Reichweitenanforderungen effizient eingeteilt werden können. Auch die Priorisierung der Ladevorgänge und die Zuteilung der Abstellplätze ist zentral, damit jederzeit die für den zuverlässigen Betrieb notwendigen Ladezustände der Fahrzeuge sichergestellt sind.

In den nächsten Jahren werden kontinuierlich Elektrobusse beschafft, die mit immer leistungsfähigeren Batterien ausgestattet sind. Dadurch entsteht eine heterogene Flotte mit diversen Batteriechemien und Kapazitäten, was den Fahrzeugeinsatz und die Disposition (inkl. Verfügbarkeit der Reservefahrzeuge) zunehmend komplexer macht. Zudem spielt die Vorkonditionierung eine relevante Rolle. Während sie bei Dieselbussen v.a. dem Fahrkomfort und der Betriebssicherheit dient, ist sie bei E-Bussen wichtig für die Batterietemperierung und damit für die Energieeffizienz, Reichweite und Lebensdauer der Batterie.

Ein intelligentes und in die bestehenden Systemen integriertes Betriebshofmanagement- und Lademanagement-System soll mit sämtlichen standardisierten Software-Schnittstellen kommunizieren und die Daten aus umliegenden IT-Systemen synchronisieren.

Schnittstellen zu Planung und Disposition

Die Umstellung auf die Elektromobilität erfordert weitere Schnittstellen in der Angebots- und Umlaufplanung sowie in der Disposition. In der Fahrzeugplanung müssen die Anforderungen der Batteriebusse an die Anforderungen an die Reichweite berücksichtigt werden und entsprechend der Personal- und Dienstplanung berücksichtigt werden.

Auch müssen die Leitstellen mit der zunehmenden Elektrifizierung der Flotte in zusätzliche Systeme eingebunden werden. Mit aktuellen Daten der Fahrzeuge zu den Ladezuständen der Batterien kann die Leitstelle die Fahrzeuge und die verbleibenden Reichweiten überwachen und bei Bedarf in den Betrieb eingreifen. Prognosen zu Batteriezuständen und Reichweiten können die Disposition unterstützen, um frühzeitig auf Probleme reagieren zu können. Abweichungen im Betriebsablauf können wiederum zu geänderten Ladevorgängen führen. Entsprechend nimmt die Bedeutung, der Systeme für die Betriebsplanung und -überwachung zu.

Auswirkungen der zunehmenden Komplexität

Die zunehmende Komplexität erhöht auch die Risiken, die mit den verschiedenen Systemen verbunden sind. Die Entwicklung der Software und die Kurzlebigkeit führen dazu, dass Komponenten, die vor einigen Jahren angeschafft wurden, heute nicht mehr lieferbar sind, oder dass sich Software oder Kommunikationsschnittstellen geändert haben und nicht mehr kompatibel sind. Dies erfordert eine ständige Anpassung der Systeme, Standards und Schnittstellen zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und IT-Systemen. Für eine erfolgreiche Umstellung auf E-Busse ist somit eine gut durchdachte Software-Architektur unerlässlich. Standardisierte Schnittstellen zwischen den Systemen helfen, notwendige Anpassungen an der System-Architektur ohne weitere Abhängigkeiten zu ermöglichen.

3.5. Auswirkungen auf den Betrieb

Die Umstellung der Flotte auf Elektrobusse hat erhebliche Auswirkungen auf den Betrieb. Im Folgenden werden planerische, betriebliche und weitere Aspekte erläutert:

3.5.1. Auswirkungen in der Angebots- und Personalplanung

- **Angebotsplanung:** Depotlader sind ähnlich flexibel wie Dieselbusse (jedoch immer mit Einschränkungen in Bezug auf die Reichweite und die notwendigen Ladezeiten). Für Kombilader sind an den Endhaltestellen ausreichend lange Wendezzeiten für Zwischenladungen nötig. Hier besteht jedoch die Gefahr, dass die Ladestationen ein Hemmnis für Angebotsentwicklungen und Linienanpassungen darstellen bzw. mit zunehmender Reichweite überflüssig werden. Bis hohe Reichweiten verfügbar sind können, im Unterschied zum Dieselbus, Taktverdichtungen während den Neben- oder Randverkehrszeiten hohe Sprungkosten (zusätzliche Fahrzeuge) auslösen.
- **Personaleinsatz/Dienstplanung:** Depotlader können sich nachteilig auf die Personaleinsatzkonzepte auswirken, da Fahrzeugaustauschkonzepte mehr Kurzdienste bzw. «gestückelte» Dienste nach sich ziehen. Dieser Nachteil relativiert sich mit zunehmenden Reichweiten.

3.5.2. Auswirkungen im Betrieb

- **Interventionen bei Betriebsstörungen (z.B. Verspätungen, Streckenblockierungen):** Depotlader haben ähnliche Vorteile wie Dieselbusse, da ein vorzeitiges Wenden möglich ist. Erschwerend für die Disposition im Störungsfall kann sich der jeweils unterschiedliche Batterieladezustand bzw. die mögliche Restreichweite auswirken.
- **24h-Betrieb:** Die notwendigen Nachladezeiten in der Garage schränken die Einsatzflexibilität der Depotlader für einen 24-Stunden-Betrieb ein bzw. erhöhen den Fahrzeugbedarf (z.B. für Nachtangebote an Wochenenden oder mehrtägigen Stadtfeste mit Sonderfahrplänen). Kombilader sind für den 24-Stunden-Betrieb geeigneter, da Kombilader wegen dezentraler Nachlademöglichkeiten flexibler sind (im Rahmen der verfügbaren Ladefenster im Fahrplan).
- **Flexibilität Fahrzeug-Gesamtflotte:** Im Vergleich zum Dieselbus ist die Einsatzflexibilität aufgrund der begrenzten Reichweite eingeschränkt. Der Depotlader ist gegenüber dem reinen Gelegenheitslader klar flexibler, v.a. auch für Sondereinsätze wie Ersatzbetrieb bei Baustellen, Sonderfahrten, Shuttleangebote bei Veranstaltungen und für Bahnersatzverkehr, da er nicht auf eine streckengebundene Ladeinfrastruktur angewiesen ist und langfristig Reichweiten von ca. 400 km möglich sind. Der Kombilader hat tendenziell eine geringere Reichweite pro Batterieladung, bietet aber ähnliche oder sogar mehr Vorteile wie der Depotlader, sofern die dezentrale Ladeinfrastruktur an optimalen Standorten platziert wird.
- **Elektrifizierung des Bahnersatzes:** Der Bahnersatz stellt zusätzliche Herausforderungen dar, v.a. im Hinblick auf die Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob ausreichend Dieselbusse in der Flotte vorhanden sind, um den Bahnersatz sicherzustellen, solange die Reichweite der E-Busse noch nicht mit derjenigen der Dieselbusse vergleichbar ist. Es lassen sich verschiedene Arten des Bahnersatzes unterscheiden:
 - **Kurzfristige, ungeplante Betriebsunterbrechungen** (z.B. bei technischen Störungen an der Bahninfrastruktur) erfordern meist kurze Einsätze von einigen Stunden. Diese können grundsätzlich mit Depotladern abgedeckt werden. Heute werden fallweise dazu Fahrzeuge von den TU vorgehalten. Im Bedarfsfall kann auch auf Reservefahrzeuge oder Fahrzeuge für HVZ-Einsätze zurückgegriffen werden. Diese Möglichkeiten nehmen jedoch mit der Umstellung auf Depotlader ab, da im Depot stehende Fahrzeuge für den nächsten Einsatz geladen werden müssen. Weiter sind im Einzelfall auch kurzfristig längere Einsätze notwendig, welche noch nicht mit reiner Depotladung gefahren werden können.
 - **Wochenendunterbrechungen** haben oft längere Einsätze von 400 bis 500 km pro Tag, was entweder den Einsatz mehrerer Fahrzeugen oder Zwischenladungen notwendig macht. An Wochenenden stehen jedoch aufgrund des in der Regel ausgedünnten Fahrplanangebots mehr Fahrzeuge für den Bahnersatz zur Verfügung.

- **Geplante Baustellen**, die sich über mehrere Monate erstrecken, erfordern einen kontinuierlichen Einsatz von Bussen. Bezogen auf den Betrieb mit E-Bussen sind das Betriebsleitsystem, das Betriebshofmanagementsystem, das Lademanagementsystem sowie die Ladeinfrastruktur die Kernelemente.
- **Sehr lange Einsätze**, die je nach Region bis zu 900 km pro Tag betragen können, stellen die Elektrifizierung des Bahnersatzes grundsätzlich in Frage. Zusätzlich spielt die Entfernung des Einsatzorts zum Depot eine entscheidende Rolle. Daher müssen entweder zusätzliche Fahrzeuge für Sicherstellung der betrieblichen Flexibilität beschafft oder der Betrieb weiter optimiert werden.

3.6. Umstellungsstrategien mit Batteriebussen

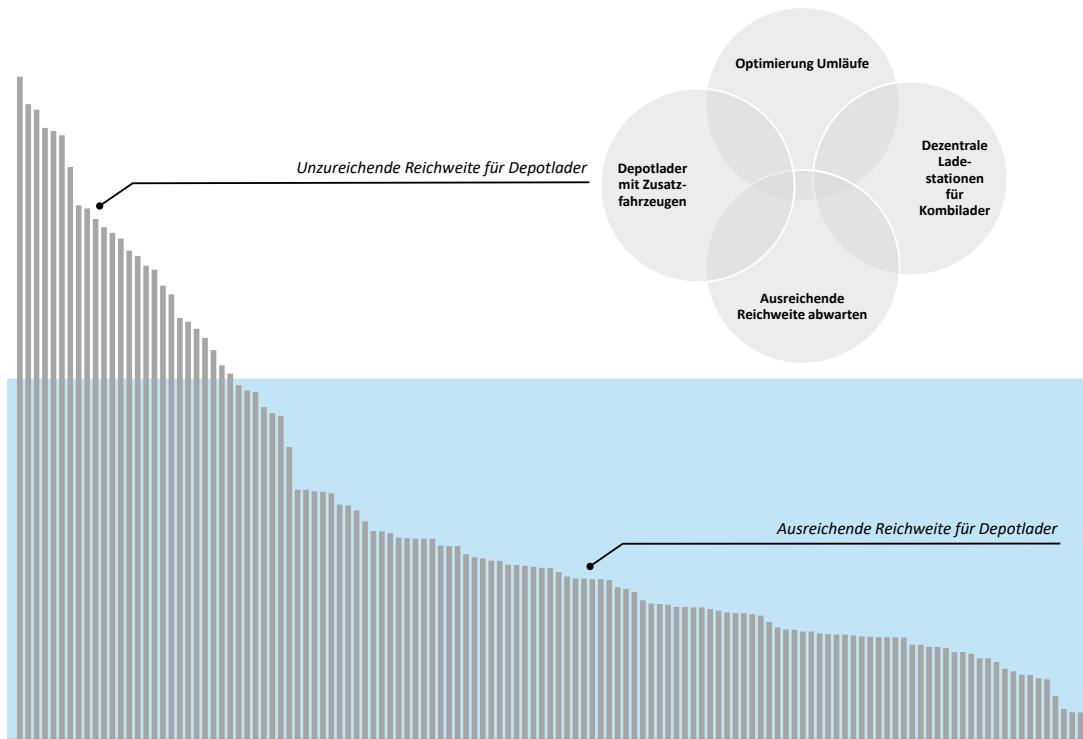
Im Folgenden betrachten wir den Fall, in dem die Technologiewahl bewusst auf Batteriebusse mit Fokus auf Depotladung gefallen ist und keine weiteren fossilfreien Antriebstechnologien in Betracht gezogen werden – unter anderem, um eine homogene Flotte zu betreiben und die betriebliche Komplexität durch den Einsatz verschiedener Antriebssysteme zu vermeiden.

Abbildung 47 zeigt beispielhaft die möglichen Tagesfahrleistungen pro Umlauf eines mittelgrossen TU sowie die mittelfristig zu erwartenden Reichweiten von Depotladern. Die Darstellung verdeutlicht, dass ein Teil der Umläufe zu anspruchsvoll ist, um ausschliesslich mit Depotladung elektrifiziert werden zu können. Eine ähnliche Situation zeigt sich bei vielen TU in der Schweiz. Für die Elektrifizierung der anspruchsvolleren Umläufe bestehen grundsätzlich vier mögliche Strategien bzw. Ansätze, die sich auch kombinieren lassen und im Folgenden priorisiert dargestellt werden:

- **Anpassung und Optimierung der Umläufe:** Die bisher für Dieselbusse konzipierten Umläufe werden so angepasst, dass sie besser für den Einsatz von Elektrobussen geeignet sind. Es ist zu bemerken, dass je höher der Elektrifizierungsgrad, desto geringer die Flexibilität zur Umlaufoptimierung bzw. die Redundanz durch vorhandene Dieselbusse.
- **Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge als Depotlader:** Fahrzeuge werden während des Tages ausgetauscht bzw. im Depot geladen, um die Reichweitenanforderungen zu erfüllen.
- **Einsatz von Kombiladern mit dezentralen Ladestationen:** Die restliche benötigte Energie wird während des Einsatzes an strategisch platzierten Ladestationen nachgeladen. Im Sinne der Flottenhomogenität und im Hinblick auf eine zukünftige Automatisierung des Depots ist es sinnvoll, alle Elektrobusse mit Pantographen auszustatten, auch wenn nur bei wenigen Strecken nachgeladen werden muss.

- **Ausreichende Reichweiten abwarten:** Die Elektrifizierung der anspruchsvolleren Linien wird auf eine spätere Phase der Umstellungsstrategie verschoben, um die weitere Entwicklung der Batterietechnologie abzuwarten, die höhere Reichweiten ermöglichen wird. In der Zwischenzeit werden die verbleibenden Dieselfahrzeuge weiterhin eingesetzt – gegebenenfalls unter Nutzung von HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) als Brückentechnologie.

Abbildung 47: Möglichkeiten für die Elektrifizierung anspruchsvoller Linien mit Batteriebussen



Grafik INFRAS.

Zwischen der 2. und der 3. Möglichkeit ist eine sorgfältige Abwägung erforderlich. Tendenziell bietet die 2. Möglichkeit mit zusätzlichen Fahrzeugen mehr Flexibilität, die Gewichtung kann je nach Situation aber auch anders ausfallen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Analyse der Umläufe auf dem aktuellen Fahrplan basiert. Taktverdichtungen in der Hauptverkehrszeit (HVZ) sowie Angebotsausweitungen würden den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge erfordern. Hinzu kommt, dass Taktverdichtungen in den Nebenverkehrszeiten für Elektrobusse besonders kritisch sind, da dann weniger Ladefenster zur Verfügung stehen.

4. Fazit und Umsetzung bei den Transportunternehmen

4.1. Technologische Entwicklung

Die vorliegende Studie zeigt den aktuellen Stand der technologischen Entwicklung bei alternativen Antrieben im öffentlichen Verkehr auf:

- Die Studie analysierte den technologischen Entwicklungsstand und zeigt sämtliche fossilfreie Antriebstechnologien, einschliesslich Batteriebussen, Wasserstoffbussen, E-Fuels und Biotreibstoffen, auf.
- Für einen möglichst CO₂-armen Linienbetrieb sind Batteriebusse oft die bestgeeignete Option. Batterie-elektrische Antriebe bieten von allen alternativen Antriebsystemen den höchsten Wirkungsgrad und schneiden ökologisch und ökonomisch am besten ab. Die Umstellung auf Batteriebusse ist in den meisten Fällen technisch und betrieblich sinnvoll. Die Fokussierung auf Depotlader ist aufgrund der absehbaren technologischen Entwicklungen richtig.
- Die Batterieladung mit einem Pantographen kann im Hinblick auf die Automatisierung des Depots, sowie als Ergänzung für Zwischenladungen unterwegs, sinnvoll sein.
- Viele Linien lassen sich grundsätzlich bis ca. 2035 mit Depotladern elektrifizieren. Die verbleibenden langen Umläufe können durch optimierte Einsatzpläne, Zusatzfahrzeuge und – wo sinnvoll und nötig – einzelne dezentrale Ladestationen mittelfristig ebenfalls elektrifiziert werden, ohne auf andere fossilfreie Antriebstechnologien angewiesen zu sein. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Elektrifizierung der anspruchsvolleren Linien auf eine spätere Phase der Umstellung zu verschieben, um die weitere Entwicklung der Batterietechnologie abzuwarten.
- Aufgrund spezieller Linienverhältnisse oder Einsatzprofilen können auch andere Antriebsoptionen technisch oder wirtschaftlich sinnvoller sein. Auch sind die vorhandenen Oberleitungs-Netze mit dem Einsatz von dynamischen Gelegenheitsladern zu berücksichtigen. Diese Optionen sind im Einzelfall zu prüfen.
- Die Umstellung auf E-Busse bringt mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad verschiedene Herausforderungen mit sich – insbesondere im Hinblick auf die Anpassung der Infrastruktur sowie die zunehmende IT-Komplexität mit ergänzenden Software-Lösungen zur Flottenüberwachung. Dadurch entsteht ein erhöhter Abstimmungsbedarf zwischen Angebotsplanung, Betrieb, Fahrzeugen und Infrastruktur.

4.2. Umsetzung bei den Transportnehmern

Aus den vorangegangenen Kapiteln lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Zahlreiche Transportunternehmen haben erste Teilflotten bereits elektrifiziert und verfügen über das Know-how für weitere Umstellungen.
- Viele Transportunternehmen betreiben bereits Depot- oder Kombilader. Machbarkeitsfragen rücken zunehmend in den Hintergrund. In Zukunft rücken stärker anspruchsvolle Linien und Einsätze sowie die Umstellung gesamter Flotten in den Fokus. Leistungen mit grossen Reichweiten lassen sich derzeit noch kaum mit reiner Depotladung betreiben. Dies erfordert eine Abwägung der Strategien zur Umsetzung vollständiger Umstellungen gemäss Kap. 3.6.
- In der vorliegenden Technologiestudie wurde für die Abschätzung der Auswirkungen auf die Betriebskosten auf andere Studien abgestützt und keine ergänzenden Berechnungen vorgenommen. Für die Umstellung der herausfordernden Linien auf E-Busse ist im Jahr 2030 grundsätzlich mit Mehrkosten gegenüber Dieselbussen zu rechnen. Bei idealen Voraussetzungen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Betriebskosten von Batteriebussen weiter denjenigen von Dieselbussen annähern. Neben den genannten Entwicklungen in Kapitel 3.2 sind auch die Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung im Kostenvergleich zum Dieselbus, allfällige Fördergelder sowie Marktentwicklungen, insbesondere im Bereich der Batterieentwicklung, zu beachten.
- Eine frühzeitige Abstimmung mit den zuständigen Bestellern ist anzustreben. Zusammen mit den Bestellern sind die Auswirkungen auf die Betriebskosten auf der Stufe der einzelnen Linien und des bestellten Angebots zu ermitteln. Der Kostenvergleich erfolgt sinnvollerweise über die Abschreibungsdauer der Fahrzeuge. Mehrkosten sind frühzeitig in die Finanzplanungen der Besteller aufzunehmen, so dass die Finanzierung zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme sichergestellt werden kann.
- Die vorliegende Studie konzentriert sich auf den Einsatz von Batteriebussen auf dem fahrplanmässigen Angebot. Die Elektrifizierung von weiteren, unregelmässigen Leistungen, wie Bahnersatzfahrten, stellt eine weitere Herausforderung dar, welche noch weiteren Klärungsbedarf erfordert.

Glossar

| | |
|--------|---|
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BtL | Biomass to Liquid |
| BZEB | Brennstoffzellenbus |
| BZ-REX | Brennstoffzellen-Range-Extender |
| CcH2 | Kryo-komprimierter Wasserstoff (Cryo-compressed Hydrogen) |
| CGH2 | komprimierter gasförmiger Wasserstoff (Compressed Gaseous Hydrogen) |
| FAME | Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäure-Methylester) |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle |
| HVO | Hydrotreated Vegetable Oil (hydriertes Pflanzenöl) |
| HVZ | Hauptverkehrszeit |
| LEB | Low-Emission Bus |
| LEV | Low-Emission Vehicle |
| LFP | Lithium-Eisenphosphat (Lithium-Ferrophosphat) |
| LH2 | flüssiger Wasserstoff (Liquid Hydrogen) |
| NMC | Nickel-Mangan-Cobalt |
| POME | Palm Oil Mill Effluent |
| PtG | Power to Gas |
| PtL | Power to Liquid |
| RFNBO | Renewable Fuel of Non-Biological Origin |
| RPV | Regionaler Personenverkehr |
| sLH2 | unterkühlter flüssiger Wasserstoff (subcooled Liquid Hydrogen) |
| SNF | Schwere Nutzfahrzeuge |
| THG | Treibhausgase |
| TRL | Technology Readiness Level |
| UCO | Used Cooking Oil |
| ZEB | Zero-Emission Bus |
| ZEV | Zero-Emission Vehicle |
| HRS | Wasserstoff-Tankstelle (Hydrogen Refuelling Station) |

Literatur

ACEA 2025: New Commercial Vehicle Registrations, European Union. Online:

https://www.acea.auto/files/Press_release_commercial_vehicle_registrations_2024.pdf
(zugegriffen: 30. Januar 2025).

Agora Verkehrswende 2023: E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht. August 2023. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2023/E-Fuels_zwischen_Wunsch_und_Wirklichkeit/103-E-Fuels.pdf.

Agora Verkehrswende 2024: Zahlen und Fakten zu Kraftstoffen aus hydrierter Biomasse in Reinform und ihrer Bedeutung für den Klimaschutz im Straßenverkehr. 10. Dezember, 2024. Online: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/hvo100-kurz-erklaert> (zugegriffen: 10. Dezember 2024).

Alexander Dennis 2023: Alexander Dennis unveils next-generation electric buses offering more choice, more flexibility and more value with industry-leading energy throughput and warranties. 1. November, 2023. Online: <https://wwwalexander-dennis.com/alexander-dennis-unveils-next-generation-electric-buses/> (zugegriffen: 16. Januar 2025).

Amtsblatt der Europäischen Union 2024: Verordnung (EU) 2024/1610 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Mai 2024 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956, 2024. Online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj>.

ASTRA 2025: Register IVZ-Fahrzeuge. 1. Januar, 2025. Online: https://opendata.astra.admin.ch/ivzod/1000-Fahrzeuge_IVZ/ (zugegriffen: 13. Januar 2025).

BAV 2019: Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe. Bern, 2019. Online: <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/leitfaden-p144.pdf.download.pdf/P-144%20Leitfaden.pdf>.

BAZL 2025: SAF-Quoten. 30. Juli 2025. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/themen/umwelt/klima/saf-quota.html>.

BFE 2021: Energieperspektiven 2050+, Technischer Bericht. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>

BFE 2022: Stromspeicherung und Wasserstoff – Technologien, Kosten und Auswirkungen auf das Klima. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.external.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxxYWQvMTEwODg=.html>

BloombergNEF 2022: Increase in Battery Prices Could Affect EV Progress. 9. Dezember, 2022.

Online: <https://about.bnef.com/blog/increase-in-battery-prices-could-affect-ev-progress/> (zugegriffen: 21. Januar 2025).

BloombergNEF 2024a: New Lithium Battery Technology Set to Disrupt Storage Market. 14. Oktober, 2024. Online: <https://about.bnef.com/blog/new-lithium-battery-technology-set-to-disrupt-storage-market/> (zugegriffen: 15. Januar 2025).

BloombergNEF 2024b: Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour. 10. Dezember, 2024. Online: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/> (zugegriffen: 15. Januar 2025).

BMWE 2020: Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger, Mai 2020.

https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?__blob=publicationFile.

BusinessPortal Norwegen 2025: Morrow Batteries legt Pläne für weitere Fabriken auf Eis. Januar 2025. Online: <https://businessportal-norwegen.com/2025/01/15/morrow-batteries-legt-plaene-fuer-weitere-fabriken-auf-eis/>.

BVB 2025: Neubau der Garage Rank. 12. Februar, 2025. Online: <https://www.bvb.ch/wp-content/bvb/dokumente/bussystem2027/Factsheet-Bussystem2027-Neubau-Garage-Rank.pdf> (zugegriffen: 13. Februar 2025).

BYD Europe B.V.: The ALL-NEW BYD eBus 12. Online: <https://bydeurope.com/download/brochure/20>.

eFuelsNow 2025: Weltweite Tankstellen HVO / XTL. Online: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>.

Europäischer Rat 2024: „Fit für 55“: für mehr umweltfreundliche Kraftstoffe im Flug- und Seeverkehr. 27. Januar, 2024. Online: <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/> (zugegriffen: 20. Januar 2025).

European Commission 2019: Clean Vehicles Directive, 2019. Online: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/clean-and-energy-efficient-vehicles/clean-vehicles-directive_en (zugegriffen: 15. Januar 2025).

European Commission 2025: ReFuelEU Aviation. Online: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en#key-facts.

EV FireSafe 2021: EV Battery Fires. <https://www.evfiresafe.com/electric-vehicle-fires>.

EV FireSafe 2024: Why do e-buses catch fire? 12. Januar, 2024. Online: <https://www.evfiresafe.com/post/why-do-e-buses-catch-fire> (zugegriffen: 13. Februar 2025).

Förderverein H2 Mobilität Schweiz 2025: H2 Tankstellen in der Schweiz. August, 2025. Online:

<https://h2mobilitaet.ch/de/tankstellen> (zugegriffen: 14. Oktober 2025).

Fraunhofer IEE 2023: Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050. Oktober, 2023. doi:10.1016/j.apenergy.2023.121289.

Fraunhofer ISI 2023: Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+. Online:

<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/abt-roadmap.pdf>

Fraunhofer ISI 2024a: Alternativen zur Lithium-Ionen-Batterie: Potenziale und Herausforderungen alternativer Batterietechnologien. Online: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/alternative-batterie-technologien-lithium-ionen-potenziale-herausforderungen.html>

Fraunhofer ISI 2024b: Feststoffbatterien für Elektrofahrzeuge: Forschungs- und Entwicklungsthema oder am Übergang zur Kommerzialisierung? Online: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/feststoffbatterien-elektro-autos-kommerzialisierung-stand-forschung-entwicklung.html>.

Fraunhofer ISI 2024c: Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. Nature Energy. August, 2024. Online: <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>.

Fraunhofer ISI 2025: Recycling-Kapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien werden Bedarf in Europa vorerst übersteigen. Online: https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterie-recycling_europa_kapazitaeten_bedarf_update_2025.html

Gallagher 2023: Together In Electric Reality: Fire Prevention In The Bus And Coach Sector.

<https://www.ajg.com/uk/-/media/files/gallagher/uk/news-and-insights/together-in-electric-reality.pdf>.

Goldman Sachs Research 2024: Electric vehicle battery prices are expected to fall almost 50% by 2026. 7. Oktober, 2024. Online: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/electric-vehicle-battery-prices-are-expected-to-fall-almost-50-percent-by-2025> (zugegriffen: 20. Januar 2025).

H2 MOBILITY 2022: Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick. März, 2022. Online: https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2022/03/H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFSNF_2022.pdf (zugegriffen: 20. Januar 2025).

H2 MOBILITY 2025: H2 tanken. Online: <https://h2.live/>.

ICCT 2024a: International Council on Clean Transportation. Can battery swapping accelerate the Indian private bus market's transition to electric? 18. Juli, 2024. Online: <https://theicct.org/can-battery-swapping-accelerate-the-indian-private-bus-markets-transition-to-electric-jul24/> (zugegriffen: 15. Januar 2025).

- ICCT 2024b:** International Council on Clean Transportation. Electrifying road transport with less mining. Dezember, 2024. Online: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ID-206-%E2%80%93-Battery-outlook_report_final.pdf.
- ICCT 2024c:** International Council on Clean Transportation. The revised CO2 standards for heavy-duty vehicles in the European Union. Mai, 2024. Online: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-130-%E2%80%93-EU-CO2_policy_update_final.pdf.
- IEA 2023a:** International Energy Agency. Why clearer terminology for hydrogen could unlock investment and scale up production – Analysis. 29. Juni, 2023. Online: <https://www.iea.org/commentaries/why-clearer-terminology-for-hydrogen-could-unlock-investment-and-scale-up-production> (zugegriffen: 20. Januar 2025).
- IEA 2023b:** International Energy Agency. The Role of E-fuels in Decarbonising Transport. Dezember, 2023. Online: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport>.
- IEA 2024a:** International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. April, 2024. Online: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- IEA 2024b:** International Energy Agency. Renewables 2024. October, 2024. Online: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
- IEA 2024c:** Hydrogen Production Projects Interactive Map, Nov 2024. Online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/hydrogen-production-projects-interactive-map>.
- IEA Bioenergy 2018:** Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools - Phase 2, Part 1: FAME and HVO/HEFA. Dezember, 2018. Online: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/07/Task-39-CTBE-biofuels-LCA-comparison-Final-Report-Phase-2-Part-1-February-11-2019.pdf>.
- INFRAS 2020:** Abschätzung des Einsatz- und CO2-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten. Grundlagestudie zum Postulatsbericht 19.3000, Oktober 2020. Online: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/effizienz/mobilitaet/alternative-antriebe.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA0MTM=.html>.
- INFRAS 2025:** E-Bus-Tool, Version 20 (unveröffentlicht), Zürich, 2025.
- INFRAS/EcoExistence 2025:** Umwelt- und Kostenbilanz von Bussen mit H₂-Verbrennungsantrieb im Vergleich zu Batterie- und Brennstoffzellenbussen. Im Auftrag des Bundesamts für Verkehr, ESÖV Projekt P-272, Zürich, 2025.
- IPCC 2011:** Intergovernmental Panel on Climate Change. Bioenergy, 2011. Online: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-2-Bioenergy-1.pdf> (zugegriffen: 21. Januar 2025).

- Itten+Brechbühl AG 2025:** Neubau Garage Rank, 2025. Online: <https://www.ittenbrech-buehl.ch/de/projekte/neubau-garage-rank/> (zugegriffen: 13. Februar 2025).
- JAUSLIN STEBLER AG 2025:** Brandschutz Elektrobus-Flotte BVB. Online: <https://www.jauslin-stebler.ch/projekte/brandschutz-elektrobus-flotte-bvb/> (zugegriffen: 13. Februar 2025).
- Liebreich Associates 2023:** Hydrogen Ladder Version 5.0. 20. Oktober, 2023. Online: <https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-ladder-version-50-michael-liebreich/> (zugegriffen: 21. Januar 2025).
- Link u. a. 2024:** Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. August, 2024. doi:10.1038/s41560-024-01531-9.
- Mercedes-Benz Buses 2019:** An almost completely normal low-floor bus, 2019. Online: https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/brand/omnibus-magazin/ecitaro-production.html (zugegriffen: 16. Januar 2025).
- Moretti et al. 2023:** Technical, economic and environmental analysis of solar thermochemical production of drop-in fuels. Science of the Total Environment, August 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166005>.
- NZ Transport Agency Waka Kotahi 2025:** Groom, C., Cooper, D., Roufail, R., Thornton, S., & Burton, J. Battery electric bus whole-of-life study. Online: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/731/731-battery-electric-bus-whole-of-life-study.pdf>.
- NOW GmbH 2022:** Programm begleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge - Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV. April, 2022. Online: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW_Abschlussbericht_Begleitforschung-Bus.pdf (zugegriffen: 12. Dezember 2024).
- NOW GmbH 2023:** Einfach Laden am Depot. November, 2023. Online: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/11/Einfach-laden-am-Depot_Leitfaden.pdf (zugegriffen: 13. Februar 2025).
- NOW GmbH 2024:** Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED II. April, 2024. Online: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW-Factsheet_REDIII.pdf (zugegriffen: 15. Januar 2025).
- NOW GmbH 2025:** Wasserstoffbetankung | Bustool. Online: <https://www.ebustool.de/infrastruktur/wasserstoffbetankung/> (zugegriffen: 20. Januar 2025).
- Polonomics 2023:** Rahmenbedingungen für Wasserstoff in der Schweiz. https://www.polonomics.ch/admin/data/files/publication/document/416/h2_rahmenbedingungen_schlussbericht_p1.pdf?lm=1694443507.
- Prognos AG 2020:** Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Mai, 2020.

PSI 2021: Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.0c07773>.

PwC 2024: Begleituntersuchung zur Förderung von Elektrobussen im ÖPNV. 12. Dezember, 2024. Online: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/begleituntersuchung-zur-foerderung-von-elektrobussen-im-oepnv.pdf>.

Rönsch 2024: Rohstoffe, Technologien, Recycling: Wie sieht die Batterie der Zukunft aus? 2. Oktober, 2024. Online: <https://www.mdr.de/wissen/naturwissenschaften-technik/batterie-forschung-aktueller-stand-100.html> (zugegriffen: 21. Januar 2025).

SAAM 2024: Europas erstes wirtschaftlich tragfähiges automatisiertes Busdepot ist bereit für den Prototypenbau! Werden Sie Teil dieser Reise sein? 31. Juli, 2024. Online: <https://www.saam.swiss/de/europees-first-viable-automated-bus-depot-is-ready-for-the-next-step-will-you-be-part-of-the-journey/> (zugegriffen: 5. Februar 2025).

Scania 2023: Shell, KPD and Scania driving the shift in reducing CO2 emissions with B100 Bio-diesel, 2023. Online: <https://www.scania.com/my/en/home/about-scania/news-room/news/2023/shell--kpd-and-scania-driving-the-shift-in-reducing-co2-emission.html> (zugegriffen: 9. Januar 2025).

Schifffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees (SGV) 2025: Synhelion betankt erstmals Dampfschiff mit Solartreibstoff. Mai 2025. Online: https://www.lakelucerne.ch/fileadmin/user_upload/PDF/Unternehmen/Medien/Medienmitteilungen/2025/PR-Synhelion-Erste_Schiffahrt_mit_Solardiesel.pdf.

Schwelm Anlagentechnik GmbH: Wasserstofftankstellen H2. Online: <https://www.schwelm-at.de/gase/wasserstofftankstellen-h2> (zugegriffen: 20. Januar 2025).

Solaris Bus & Coach 2021: Zero-emission Urbino electric buses. 15. Oktober, 2021. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=jGccNnpUh9I> (zugegriffen: 5. Februar 2025).

Synhelion 2025: Erstmals Passagierbus am Flughafen Zürich mit Solar-Diesel von Synhelion betankt. Oktober 2025. Online: <https://synhelion.com/media/pages/news/first-ever-passenger-bus-at-zurich-airport-fueled-with-synhelions-solar-diesel/9492d9d86b-1759131392/precede-synhelion-liefert-solar-diesel-an-flughafen-zurich.pdf>.

The National Academies 2018: Battery Electric Buses—State of the Practice. Washington, DC: The National Academies Press, 2018. Online: <https://doi.org/10.17226/25061> (zugegriffen: 13. Februar 2025).

TU Dresden 2025: IDEA - Innovative Depot-Automatisierung. 5. Februar, 2025. Online: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/fm/forschung/forschungsprojekte/idea-innovative-depot-automatisierung> (zugegriffen: 5. Februar 2025).

- Umweltbundesamt 2025:** Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. August 2025. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/96_2025_texte.pdf.
- VDI/VDE-IT 2025:** Marktanalyse Q4 2024. November 2024. Online: https://www.ipcei-batteries.eu/fileadmin/Images/accompanying-research/publications/2024-11-BZF_Kurzinfo_Marktanalyse_Q4.pdf.
- VDL Bus & Coach 2024:** The New Generation Citea. August, 2024. Online: https://www.vdl-buscoach.com/_asset/_public/Brochures/EN-new-generation-Citea-v3-2024.pdf.
- VdS Schadenverhütung 2023:** Brandschutz in Betriebshöfen für Linienbusse, 2023. Online: <https://shop.vds.de/download/vds-0825/dab120bb-ec89-4157-9e02-70f0f32be9bd>.
- VDV 2024a:** Brandschutz in Busbetriebshöfen - wie geht es weiter? Dipl. Ing. (FH) Wolfgang Reitmeier. VöV-Bustagung - Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit, Juni 2024.
- VDV 2024b:** VDV 463: Schnittstelle zum Lademanagementsystem - Betriebshofmanagement & ITCS, Dezember 2024. Online: <https://knowhow.vdv.de/documents/463/>.
- Verkehrsautomatisierung Berlin 2025:** Effizientes Betriebshofmanagement. Online: <https://www.vaberlin.de/produkte/vabdepot/effizientes-betriebshofmanagement> (zugegriffen: 13. Februar 2025).
- Voß u.a. 2025:** Benchmarking state-of-the-art sodium-ion battery cells – modeling energy density and carbon footprint at the gigafactory-scale. Energy & Environmental Science, July 2025. Online: <https://doi.org/10.1039/D5EE00415B>.
- World Energy Council 2021:** Working Paper | National Hydrogen Strategies, 2021. Online: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf (zugegriffen: 18. März 2025).