Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Verkehr BAV

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

LEITFADEN ZUR PLANUNG DER LADEINFRASTRUKTUR

helbling

CHUR BUS

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr (BAV)
Programm Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern
info.energie2050@bav.admin.ch
www.bav.admin.ch/energie2050

Erstausgabe: Mai 2025

Unter diesem QR-Code sind die vollständige Studie und weiterführende Informationen zum ESöV-Programm verfügbar.

Programmleitung: Stany Rochat, BAV

Redaktion/Layout:
Roman von Däniken und Thibault Martin,
Helbling Technik AG, CH-5000 Aarau

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren und Autorinnen dieses Leitfadens verantwortlich.

Sprachversion:
Cette publication est également disponible en français (lien).

Cover-Bild:
© Helbling Technik AG

INHALT

1 Editorial

2 Einleitung

5 Bedarfsanalyse von Ladeleistung und Energie

9 Festlegung des Ladekonzepts

11 Ladeinfrastruktur

16 Kostenschätzung

19 Ökologische Bewertung

21 Weiterführende Themen

Editorial

Die Umstellung der öV-Busflotte auf elektrische Antriebe ist in vollem Gang. Verschiedene städtische Verkehrsbetriebe sind schon weit fortgeschritten. Andere haben Elektrobusse in ländlichen, topographisch schwierigen und weitläufigeren Regionen erfolgreich eingeführt. Wieder andere Unternehmen stehen noch am Anfang. Die Umstellung der Busflotte wird in vielen Betrieben von einer entsprechenden Strategie begleitet. So wird bei zukünftigen Neubeschaffungen immer öfter ein batterie-elektrischer Antrieb zum Zug kommen.

Im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogrammes Energiestrategie 2050 im öV (ESöV 2050) des BAV wurde diese Antriebswende mit vielen Projekten unterstützt und begleitet, sei es Potential- und Konzeptstudien oder die Erprobung von Pilotfahrzeugen. Die Erstellung von Leitfäden spielt dabei eine wichtige Rolle, um das gewonnene Wissen in die Unternehmen zu transportieren. Ein erster Leitfaden zur Elektrifizierung von Busflotten wurde bereits 2019 erstellt. Dieser deckte noch das gesamte Spektrum von der Planung der einzelnen Linien bis zur Konzeption der Ladeinfrastruktur und der Schulung der Mitarbeitenden ab. Denn der Wechsel auf einen elektrischen Antrieb geht weit über das Beschaffen des jeweiligen Fahrzeuges hinaus. Es ist ein Systemwechsel.

Der vorliegende Leitfaden fokussiert auf die Ladeinfrastruktur. Diese ist ein wichtiger und integraler Bestandteil bei der Umstellung auf batterie-elektrische Antriebe. Die Konzeptionierung und Optimierung der Ladeinfrastruktur ist anspruchsvoll, da mit dem Technologiewechsel neue Kompetenzen aufgebaut und die betrieblichen Prozesse angepasst werden müssen. Mit diesem Leitfaden hoffen wir, Lücken zu schliessen, einen Beitrag zur Unterstützung der Verkehrsunternehmen zu leisten und die Umstellung auf elektrische Antriebe bei den Bussen weiter voranzutreiben zu können.

Christa Hostettler, Direktorin BAV

EINLEITUNG

Ausgangslage

Mit dem «Klima- und Innovationsgesetz» hat sich die Schweiz zum Ziel gesetzt, ab dem Jahr 2050 netto keine Treibhausgase mehr auszustossen (Netto-Null-Ziel). Der VöV (Verband öffentlicher Verkehr) hat die Ambition, den öffentlichen Verkehr bereits ab 2040 CO_2-neutral anzutreiben. Der höchste Anteil der CO_2-Emissionen des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz wird durch Busse verursacht (rund 81%), weshalb es erstrebenswert ist, eine Reduktion der Emissionen in diesem Bereich voranzutreiben.
Diverse Städte und Verkehrsunternehmen haben diesbezüglich bereits Strategien erarbeitet. In Chur zeigt der «Masterplan Energie und Klima» Wege zur Umsetzung des Netto-Null-Ziels auf. Ab 2028 wird Chur Bus, der Busbetrieb der Stadt Chur, nur noch Fahrzeuge mit erneuerbaren Antriebssystemen beschaffen, wobei die Wahl auf batterieelektrische Fahrzeuge gefallen ist.

Chur Bus ist mit diesem Schritt nicht allein. Während eine umfassende Elektrifizierung der Flotte Chancen zur Reduktion des Energieverbrauchs und des CO_2-Ausstosses pro Personenkilometer bietet, stellt sie die Flottenbetreiber auch vor technische und planerische Herausforderungen, beispielsweise hinsichtlich der Auswahl geeigneter Fahrzeuge und abgestimmter Ladeinfrastruktur, der zeitlichen Planung der Umstellungsphase oder der benötigten Ladeleistung und deren Bereitstellung.

Zielsetzung

Dieser Leitfaden richtet sich an Busunternehmen und Flottenbetreiber und soll die Elektrifizierung von Bussflotten im öffentlichen Verkehr fördern und damit die Dekarbonisierung vorantreiben.
Am konkreten Beispiel von Chur Bus werden Vorgehensmöglichkeiten und Umsetzungsempfehlungen für die gängigen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Flottenelektrifizierung aufgezeigt, welche auf ähnliche Projekte übertragen oder auf diese angepasst werden können. Die verschiedenen Planungs- und Umsetzungsschritte werden verständlich beschrieben und anhand von Chur Bus in die Praxis überführt. Dies senkt die Hürde für andere Busunternehmen, die aufgezeigten Konzepte auf den eigenen Betrieb zu übertragen.

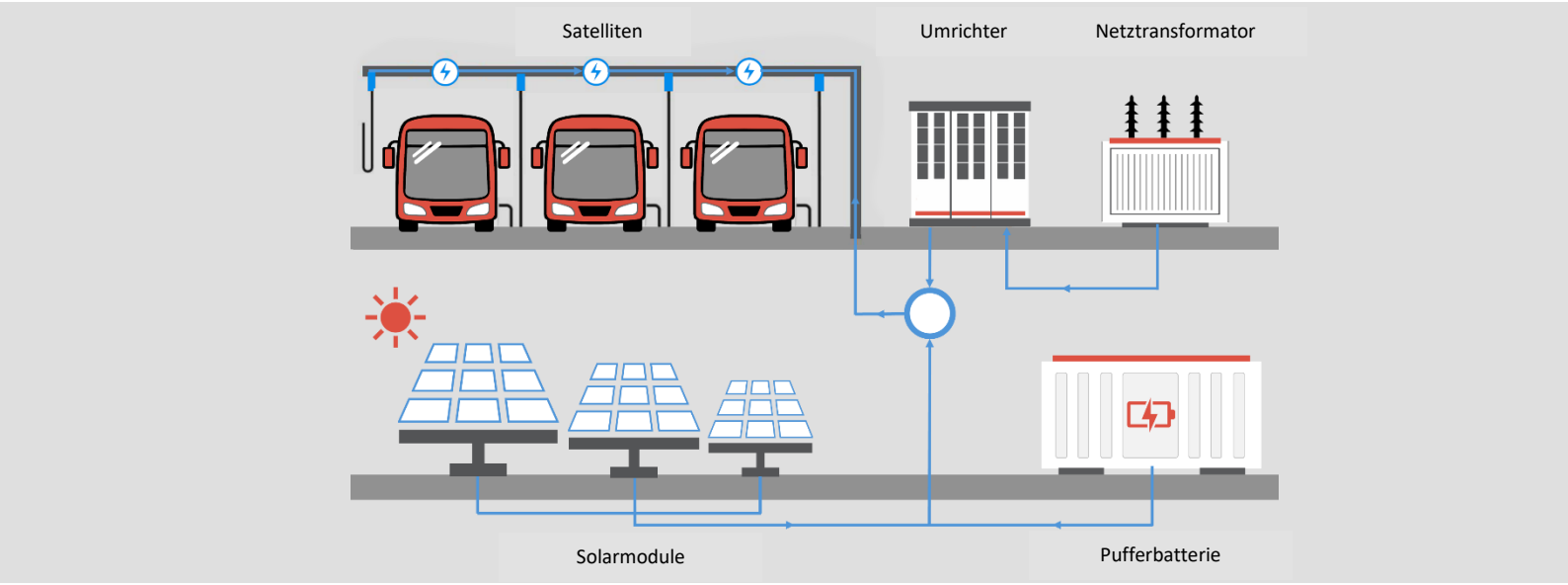
Die Erkenntnisse aus dem Projekt kommen Chur Bus und Engadin Bus direkt zugute und bieten wertvolle Anhaltspunkte für andere Unternehmen der Branche.

Ausführliche Umsetzungskonzepte, sorgfältige Kostenanalysen und umfassende Bewertungen von elektrischen Systemen und Wärmerückgewinnungstechniken liefern umsetzbare Strategien für mittelgrosse Städte und Verkehrsunternehmen.

Struktur und Fokus des Leitfadens

Der Leitfaden stellt die wichtigsten Aspekte vor, die bei der Planung einer Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden sollten. Die Beispiele kommen aus einem Projekt von Chur Bus für die Flottenerneuerung ab 2028.

Betrachtet werden Aspekte des Energiebedarfs, der technischen Infrastruktur (Flächenbedarf, Ladeinfrastruktur) sowie die Integration von PV-Anlagen und Pufferbatterien. Zusätzlich aufgegriffen wird die Nutzung der beim Laden entstehenden Abwärme. Die daraus abgeleiteten möglichen Konzepte und Ladestrategien werden erklärt und die betrieblichen Auswirkungen beschrieben. Der Fokus liegt auf Depotladung, da dies die bevorzugte Variante bei den Transportunternehmen ist.



Schematische Darstellung von Ladeinfrastrukturkomponenten und ihren Verknüpfungen untereinander

Um dies zu erreichen, werden folgende Hauptaspekte detailliert betrachtet, welche sich in der Inhaltsstruktur dieses Leitfadens wiederfinden:

Bedarfsanalyse

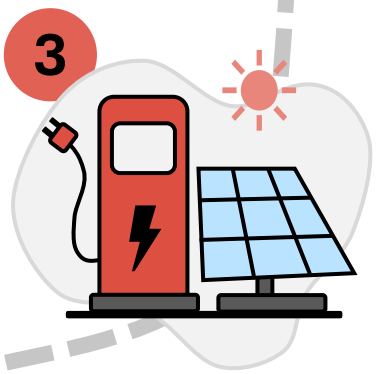
Dieser Schritt evaluiert den Energiebedarf der zukünftigen Busflotte und bildet die Grundlage für das Elektrifizierungskonzept und die Etappierung der Flottenumstellung. Dadurch lassen sich der Tagesenergiebedarf und die benötigte Ladeleistung abschätzen und eine erste Grobdimensionierung der Ladeinfrastruktur kann vorgenommen werden.

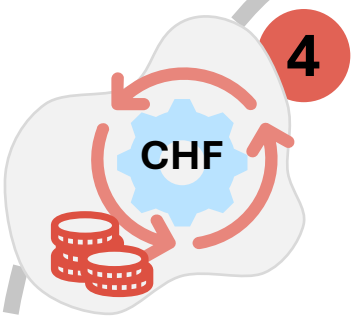
Ladekonzept

Hier werden die Ergebnisse der Bedarfsanalyse konkretisiert, indem die Einsatzzeiten der Fahrzeuge basierend auf den Umlauf- und Fahrplänen berücksichtigt werden. Diese bestimmen die Verweildauer im Depot, die verfügbare Ladezeit und die minimale Ladeleistung pro Fahrzeug. Damit werden die Ladeinfrastrukturkomponenten abschliessend dimensioniert, die passenden Ladestrategien abgeleitet (Lastmanagement, Reduktion von Leistungsspitzen, Pufferbatterien, Solaranlagen) sowie Anpassungsempfehlungen erarbeitet (bei Engpässen durch energieintensive Umläufe oder kurze Ladezeiten).

Ladeinfrastruktur

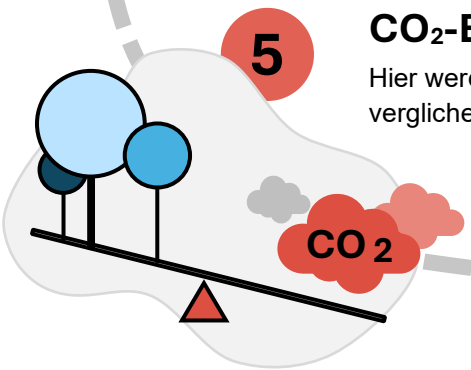
Das Kapitel behandelt die Installation von Ladeinfrastruktur, insbesondere Ladesäulen, Transformatoren, Umrichter und den Netzanschluss. Themen wie Thermomanagement, Abwärmenutzung, Platzbedarf für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur sowie räumliche Anordnungsmöglichkeiten werden behandelt. Mit diesen Informationen kann anschliessend ein Umsetzungszeitplan erstellt und die Übergangsphase geplant werden. Daher ist eine frühzeitige Planung der Ladeinfrastruktur unerlässlich, um Verzögerungen zu vermeiden, da typische Liefer- und Verfahrensfristen je nach Hersteller und behördlichen Genehmigungen zwischen 6 und 22 Monaten betragen können.





Kostenrechnung

Sie gibt einen Überblick über die Betriebs- und Anschaffungskosten und zeigt die Gesamtkosten über den Lebenszyklus der Ladeinfrastruktur sowie mögliche Finanzierungsmöglichkeiten auf. Dies bietet den Busunternehmen eine umfassende Übersicht über die zu erwartenden Kosten und eine fundierte Entscheidungsgrundlage.



CO_2-Bilanz

Hier werden die Emissionen zwischen Elektro- und Dieselbusbetrieb verglichen, was Aussagen über das CO_2-Einsparpotenzial ermöglicht.

Weiterführende Themen

Dazu gehören die notwendigen Planungsschritte bis zur Umsetzung sowie Konzepte und regulatorische Anforderungen für die Anpassung der Werkstattinfrastruktur für Elektrobusse.

ERSTES KAPITEL

BEDARFSANALYSE VON LADELEISTUNG UND ENERGIE

In wenigen Worten

Die Berechnung und Analyse des linienspezifischen Energiebedarfs liefert die Basisdaten und somit die Grundlagen für das Elektrifizierungskonzept. Sie muss als erster Schritt erfolgen und wird in der Regel von Verkehrsplanern, Lieferanten von Elektrobussen oder spezialisierten Ingenieurbüros durchgeführt. Diese Analyse ermöglicht die Berechnung und Optimierung des Tagesenergiebedarfs der Flotte und der einzelnen Fahrzeuge, wodurch mit Fahrplandaten der jeweilige Ladeleistungsbedarf abgeleitet wird.

Erfassung der Liniennetzinformationen

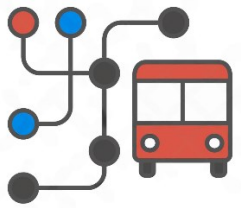
Als Ausgangsdaten für die Bedarfsanalyse werden die folgenden Parameter benötigt:

Linienplan

Der **Linien- oder Fahrplan** bietet eine Übersicht über alle bedienten Linien des Busbetriebs sowie die Haltestellen entlang der Linien. Besonders zu beachten ist, dass auch Nachtlinien, Bahnersatzdienste und gegebenenfalls neu geplante Linien, welche für gewöhnlich nicht im regulären Linienplan aufgeführt sind, in der Bedarfsanalyse mitberücksichtigt werden. Der Linienplan wird von den Busbetrieben erstellt und ist daher bereits zu Beginn verfügbar.

Linienparameter liefern detaillierte Informationen, die zur Berechnung des linienspezifischen Energiebedarfs genutzt werden. Daten wie Fahrzeugauslastung, Fahrzeugtyp (inklusive Sitzplatzanzahl, Ausstattung und Leergewicht) sowie Energiebedarf von Nebenverbrauchern (Klimaanlage inkl. Heizen, Fahrgastinformationssystem), sind den Betreibern meist bekannt, andernfalls müssen sie erfasst werden. Weitere Parameter, wie Durchschnitts- und Höchstgeschwindigkeiten, Streckenverlauf mit Kreuzungen und Ampeln, Topografie oder Durchschnittstemperaturen, sind oft öffentlich in Open-Source- oder Statistikquellen auffindbar.

Erfahrungsgemäss sind **Topografie und Aussentemperatur** die zentralen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch. Die weiteren Parameter erhöhen die Genauigkeit der Bedarfsanalyse. Das Beschleunigungs- und Bremsverhalten, das je nach Fahrer und Strecke variiert, beeinflusst den Energiebedarf direkt. Hier können Durchschnittswerte definiert und für alle Linien angewandt werden, um bei ausreichender Genauigkeit den Berechnungsaufwand zu reduzieren.



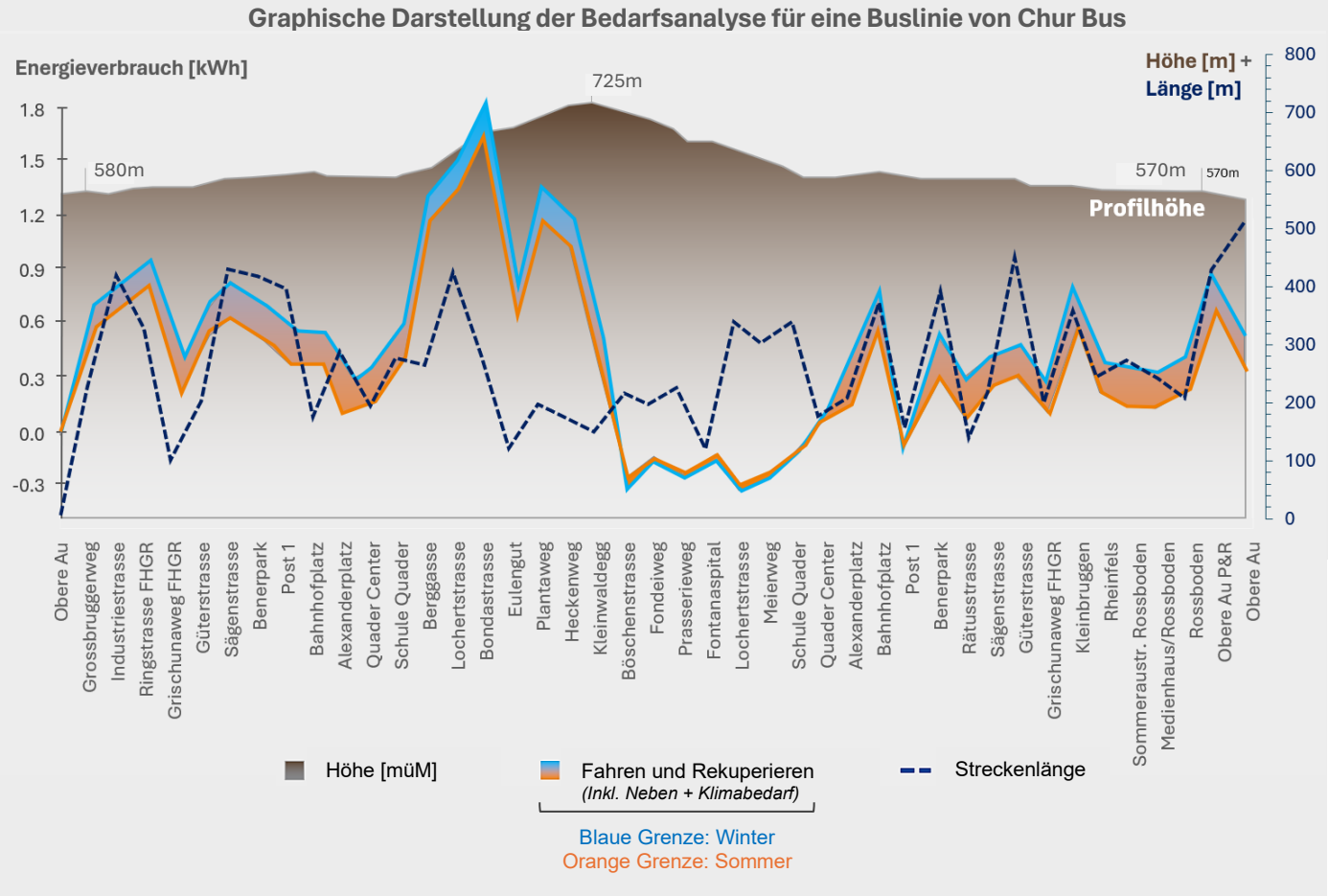
Linienparameter

Zur Verifizierung der Resultate ist ein Vergleich des berechneten Energiebedarfs mit dem aktuellen Dieselbedarf unter Berücksichtigung der Antriebsstrangeffizienzen sinnvoll.

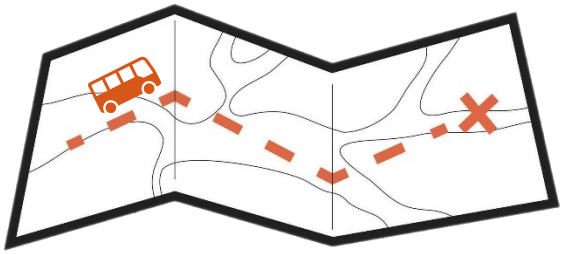
Umlaufpläne

Umlaufpläne zeigen die **Anzahl der Fahrten** auf dem Streckennetz sowie Aus- und Einfahrten aus und zum Fahrzeugdepot. Diese müssen auf die spezifischen Reichweiten der eingesetzten Busse optimiert sein. Mit den Umlaufplänen lässt sich ausgehend vom linienspezifischen Energiebedarf der Tagesenergiebedarf pro Fahrzeug und für die gesamte Busflotte berechnen, indem die Energien für die jeweiligen Fahrten der eingesetzten Fahrzeuge addiert werden. Auch hier müssen **Nachtlinien und Nebendienstleistungen** (Schulbus, Bahnersatz) berücksichtigt werden.
Insbesondere geben Umlaufpläne Aufschluss über die Verweildauer im Depot und bilden somit die Basis für die Abschätzung der verfügbaren Ladezeit.

Berechnung und Plausibilisierung des linienspezifischen Energiebedarfs

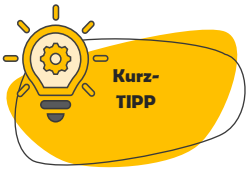


Unter Berücksichtigung der im letzten Kapitel aufgeführten Linienparameter lässt sich der Energiebedarf pro Linie und pro Umlauf berechnen. Die obige Abbildung zeigt eine mögliche Darstellung der zu erwartende Ergebnisse am Beispiel einer Linie von Chur Bus.
Dargestellt ist der Energiebedarf der einzelnen Streckenabschnitte zwischen den jeweiligen Haltestellen, wobei das dargestellte Band den saisonal abhängigen Maximal- und Minimalbedarf zeigt. Die Energiemenge setzt sich aus dem Anteil für die eigentliche Fahrt und aus Anteilen für Nebenaggregate (Fahrgastinformation, Ticketautomaten, Beleuchtung) sowie für Klimatisierung zusammen. Die starke Abhängigkeit der Streckenlänge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Haltestellen (blau-gestrichelte Linie) und der befahrenen Topografie (braune Fläche) sind deutlich ersichtlich.



Der Energiebedarf pro Umlauf ist primär abhängig von der Streckenlänge, der Einsatzdauer und der Steigung auf dem Streckenabschnitt sowie auch von der vorherrschenden Aussentemperatur.

Im Winter wird in der Regel mehr Energie benötigt, da die Heizsysteme mehr Energie verbrauchen als in den Sommermonaten. Daher muss die Infrastruktur für die kalte Jahreszeit entsprechend dimensioniert werden, wobei gleichzeitig die begrenzte Kapazität der Batterie berücksichtigt werden muss.

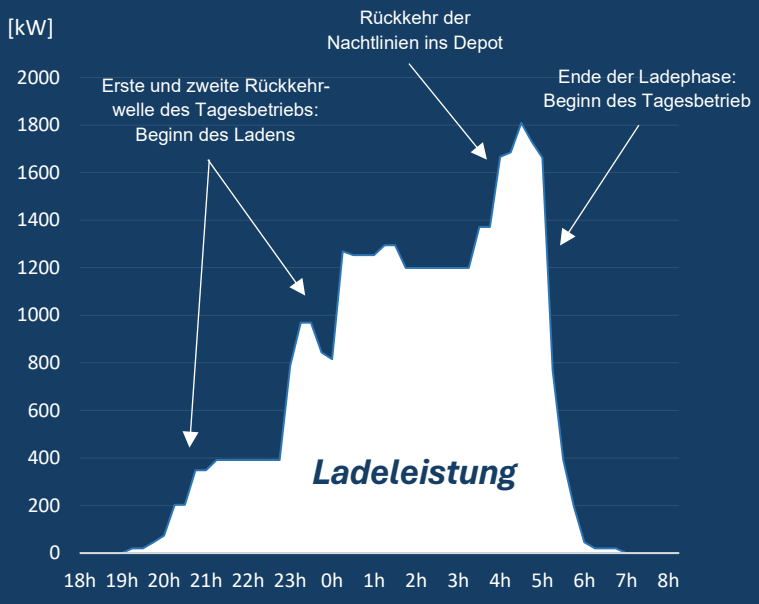


Umlaufplananalyse und Energiebilanzierung

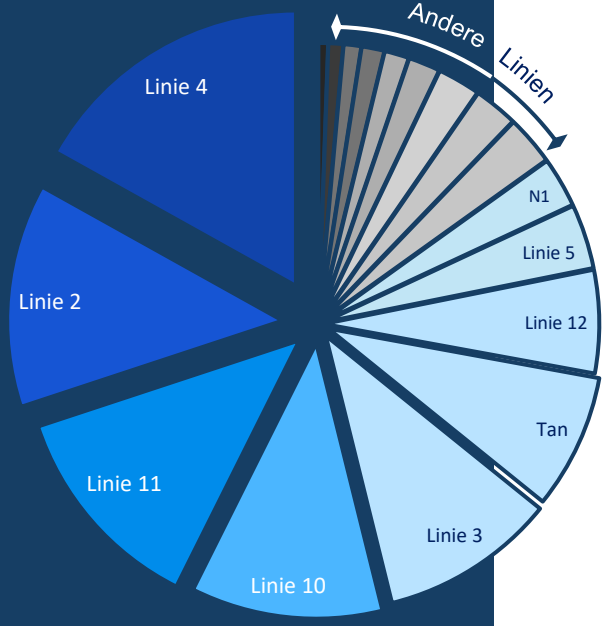
Mit der Anzahl der täglichen Umläufe lässt sich der Gesamtenergiebedarf pro Linie sowie der tägliche, flottenweite Energiebedarf berechnen.

Unter Berücksichtigung der Verweilzeiten im Depot können Rückschlüsse auf die benötigte Ladeleistung pro Fahrzeug und somit auf die kumuliert benötigte Ladeleistung über die nächtliche Ladephasen gezogen werden.

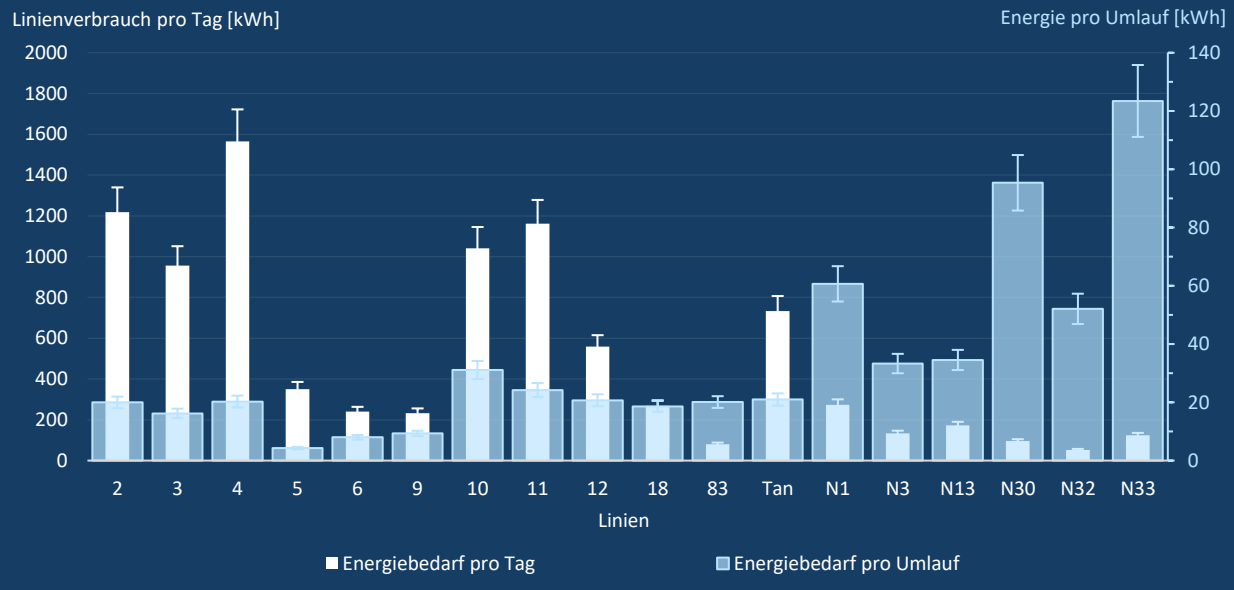
Zeitlicher Verlauf der Ladeleistung während einer Ladephase ohne Lastmanagement und Optimierung



Verteilung des Energiebedarfs pro Buslinie (inkl. Nachtlinien)



Linienspezifischer Energieverbrauch (mit Nachtlinien)



ZWEITES KAPITEL

FESTLEGUNG DES LADEKONZEPTS

In wenigen Worten

Das **Ladekonzept** beschreibt, wie die Ladeleistung optimiert werden kann und spielt eine zentrale Rolle bei der Planung der Ladeinfrastruktur. Es zeigt auf, wie die Ladeinfrastruktur unter Einbezug wirtschaftlicher und technischer Aspekte **optimal dimensioniert** werden kann.

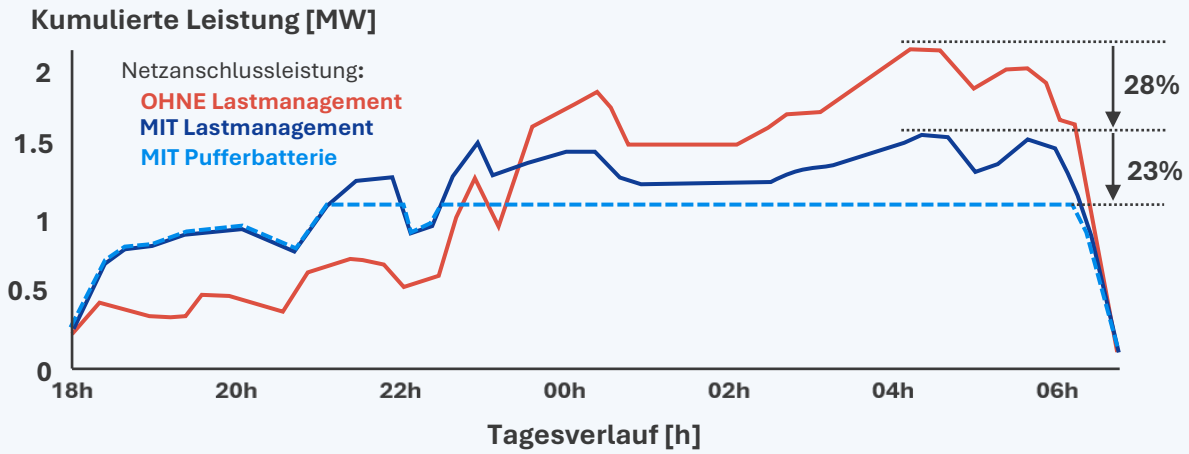
Die Planung der Ladeinfrastruktur baut auf der **abgeschlossenen Bedarfsanalyse** auf, aus welcher die benötigte Energiemenge, die verfügbare Ladezeit pro Fahrzeug und der grundsätzliche Leistungsbedarf bekannt sind. Mit einem durchdachten Ladekonzept lässt sich der **Leistungsbedarf optimieren**, wodurch tiefere Spitzenlasten und somit tiefere Anschluss- und Betriebskosten realisierbar sind.

In diesem Kapitel werden zur Optimierung des Leistungsbedarfs drei Varianten vorgestellt:

- Einsatz eines Flotten- und Lademanagementsystems
- Integration eines stationären Energiespeichers
- Nutzung von PV-Anlagen

Flottenmanagementsystem

Das Flotten- und Lastmanagement, in der Regel von Fahrzeug- und Ladeinfrastruktur-Lieferanten angeboten, nutzt Fahrplan- und Ladestatusdaten der Fahrzeuge, um die **Ladeleistung zu optimieren**. Ohne ein solches System steigt die Netzleistung stark an, wenn viele Fahrzeuge gleichzeitig zurückkehren. Durch eine priorisierte Ladeverteilung nach dynamischen oder festen Regeln (z. B. First In – First Out oder Last In – First Out) werden **Lastspitzen gedämpft** und trotzdem alle Fahrzeuge rechtzeitig zum nächsten Einsatz geladen. Im Fall von Chur lässt sich die Netzanschlussleistung so um 28% reduzieren.



Potenzial zur Reduktion der Anschlussleistung mit verschiedenen Ladekonzepten am Beispiel von Chur Bus

Integration eines stationären Energiespeichers

Ein **Batteriespeicher** vermag die Spitzenleistung im konkreten Fall von Chur Bus um weitere 23% zu reduzieren, indem beim Überschreiten einer definierten Leistungsgrenze die Energie nicht mehr aus dem Stromnetz, sondern der Pufferbatterie bezogen wird. Zudem sorgt die Batterie, im Fall von Chur Bus mit einer Kapazität von 1 MWh, für **zusätzliche Redundanz** in der Stromversorgung. Die stationäre Batterie kann während des Tages mit tiefer Leistung geladen werden, sodass bei der Rückkehr der Fahrzeuge genügend Energie zur Verfügung steht. Die so vorgehaltene Leistung kann beim Netzanschluss und den Leistungsgebühren eingespart werden. Da eine Batterie dieser Grössenordnung mit erheblichen Investitionen verbunden ist und auch der nötige Platz bereitgestellt werden muss, ist die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall abzuklären.

Nutzung einer PV-Anlage zur Eigenenergieerzeugung

Als Ergänzung zum stationären Energiespeicher bietet sich die Installation einer **PV-Anlage** an. Busdepots verfügen häufig über grossflächige Dachanlagen und sind somit hervorragend für die **Gewinnung von Sonnenenergie** geeignet. In Kombination mit der Pufferbatterie kann der Solarstrom bis am Abend gespeichert werden. Der Energiebedarf aus dem Stromnetz wird somit reduziert, wodurch langfristig weitere Kosten eingespart werden können. Ab wann eine PV-Anlage rentabel ist, hängt von mehreren Faktoren, insbesondere vom lokalen Energiepreis und der Einspeiserückvergütung, ab. Die Wahl des geeigneten Ladekonzepts sollte unter **Berücksichtigung des Energiepreises** und in Absprache mit dem Energielieferanten erfolgen.

DRITTES KAPITEL

LADEINFRASTRUKTUR

In wenigen Worten

Im nächsten Schritt erfolgt die Planung der Ladeinfrastruktur. Sie umfasst die Bereitstellung der Örtlichkeit und die Klärung der dortigen Platzverhältnisse sowie das Erarbeiten eines Etappierungsplans für die parallel zur Flottenumstellung schrittweise Installation der Ladeinfrastruktur. Die Lösung sollte auf die gewählte Ladestrategie ausgerichtet sein und der Netzanschluss entsprechend dimensioniert werden.

Wird eine Busflotte mit elektrischer Energie versorgt, gehen während des Ladevorgangs rund 6% der Energie in Form von Abwärme verloren. Es ist sinnvoll, diese Energiemenge kontrolliert abzuführen und weiter zu nutzen, weshalb in diesem Kapitel auch die Möglichkeiten der Abwärmenutzung aufgezeigt werden, mit denen sich der Gesamtwirkungsgrad des Systems steigern lässt.

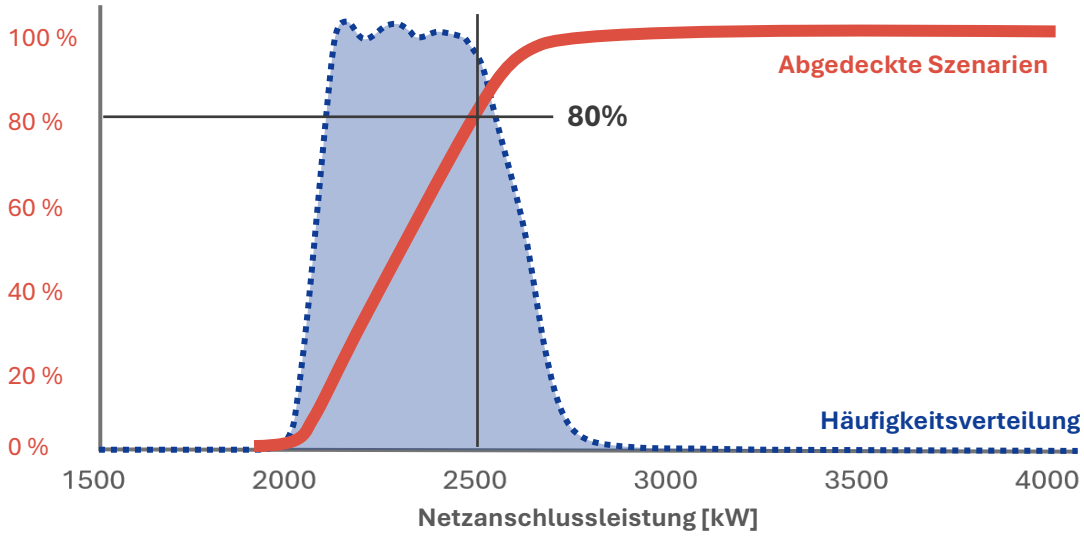
Dimensionierung der Ladeinfrastruktur

1. Netzanschluss

Als Grundlage für die Dimensionierung des Netzanschlusses dient das gewählte Ladekonzept. Bisher wurde in den vorhergehenden Kapiteln Bezug auf den täglichen Regelbetrieb genommen. Nun müssen zusätzlich Unsicherheiten wie verkürzte Ladezeiten durch Verspätungen, Stromausfälle, technische Pannen, ungeplanter Ersatzverkehr oder ausserplanmässige Vorkommnisse (wie beispielsweise Stadtfeste und Events) berücksichtigt werden.

Im Fall von Chur Bus wurden diese Szenarien in einer Simulation erfasst und deren Auswirkungen auf die benötigte Ladeleistung analysiert. Aus der beliebigen Kombination verschiedenster Szenarien resultiert eine Verteilung der benötigten Anschlussleistung, mit welcher sich der Worst-Case gut abschätzen lässt.

Monte-Carlo-Simulation



Die blaue Linie zeigt die Häufigkeitsverteilung der benötigten Netzanschlussleistung aller betrachteten Szenarien. Die rote Kurve gibt an, wie viel Prozent der möglichen Szenarien mit einer bestimmten Ladeleistung abgedeckt werden können. Es liegt schlussendlich im Ermessen des Flottenbetreibers, zu welchem Grad er mögliche Unsicherheiten abdecken will. Das Abdecken der letzten Prozente führt in der Regel zu einer überdimensionieren der Ladeinfrastruktur in Bezug auf normale Betriebsszenarien. Im Fall von Chur können mit 2500 kW 80% der Szenarien abgedeckt werden.

200 000

Die Anzahl der simulierten **Zufallskombinationen**

80%

Die Flotte benötigt in 80% **aller Fälle** unter 2500 kW Ladeleistung

3 x 1MW

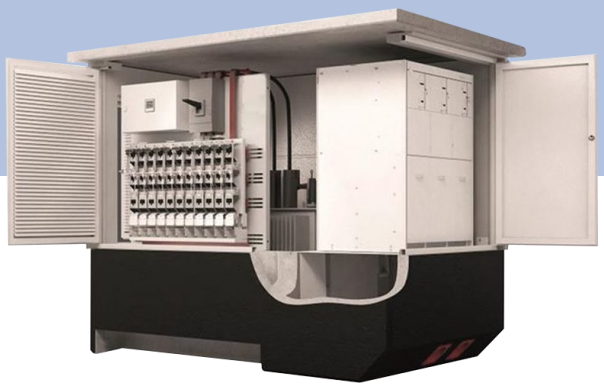
Die **Leistung** der Anlage, die benötigt wird, um alle **Anwendungsfälle** abzudecken. Die Dimensionierung ermöglicht die Abdeckung extremer Einzelfälle und wird den Ausbau der künftigen Infrastruktur bei Bedarf erleichtern.

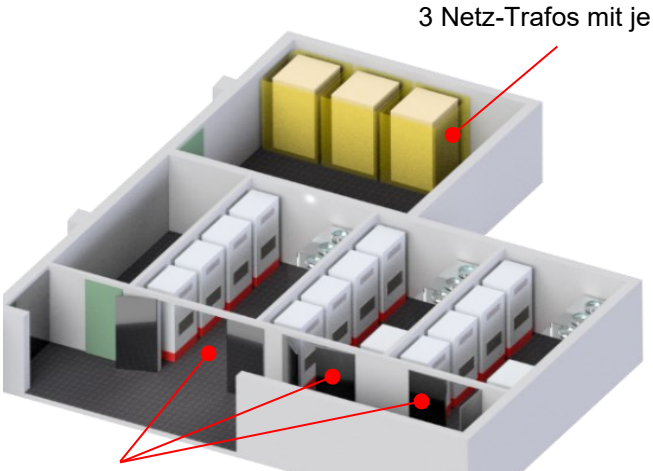
Reserven

Gestaffelte Netztransformatoren bieten **Reserve** für Anlässe wie das **Chur-Fest** oder Bahnersatzleistungen

2. Trafostation

Die Trafostation wandelt Mittelspannung in die für die Elektroflotte benötigte Niederspannung um. Installation und Platzbedarf sollten mit dem örtlichen Energielieferanten abgestimmt werden. Oft übernimmt der Energiebetreiber die Installation, während der Flottenbetreiber nur die Niederspannungsinstallation verantwortet. Eine schrittweise Installation parallel zur Flottenumstellung ist empfehlenswert, der Platzbedarf sollte jedoch vorzeitig berücksichtigt werden.





Drei Umrichter-Räume mit
je einem Kühlaggregat

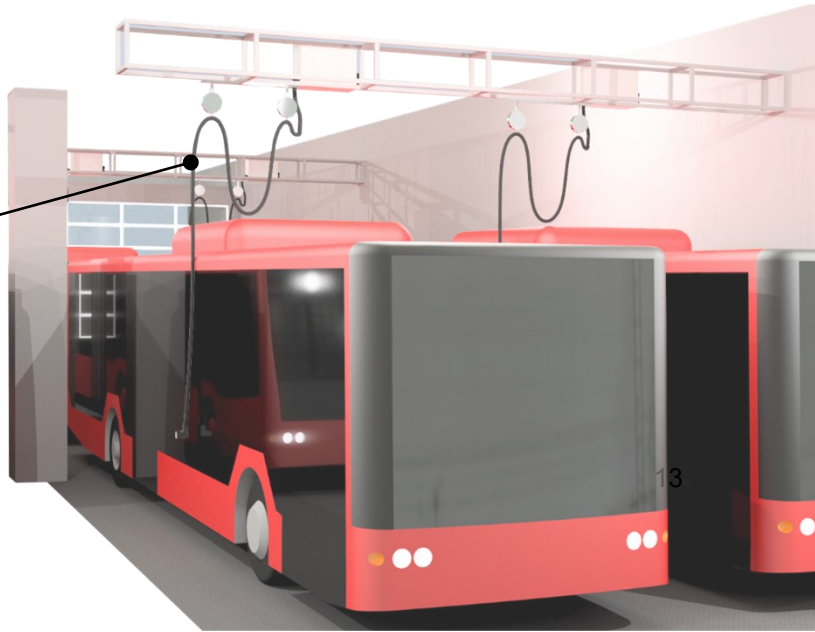
3. Umrichterschränke

Umrichter wandeln den Wechselstrom der Transformatoren (400V AC) in Gleichstrom (400-800V DC) und verteilen ihn an die Ladepunkte. Der Ausbau sollte etappenweise erfolgen, parallel zur Flottenumstellung. Die Platzreservierung sollte verschiedene Typen berücksichtigen, da der Platzbedarf je nach Modell variiert.

Ab 2026 werden im vorliegenden Fall von Chur Bus etappenweise Umrichter installiert, welche in separaten Brandabschnitten untergebracht werden, um Sicherheit und Redundanz zu gewährleisten. Für zukünftiges Flottenwachstum sollten die Räume von Beginn an bedarfsgerecht geplant werden.

4. Satellit

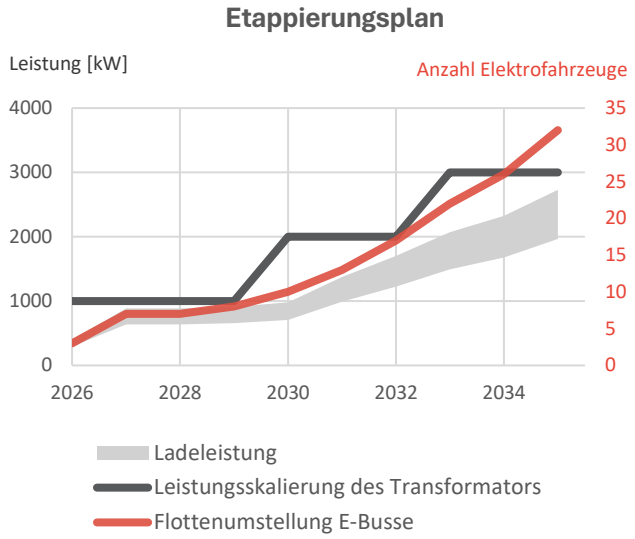
Die Satelliten sind die einzelnen Ladepunkte in der Abstellhalle und versorgen die Fahrzeuge schlussendlich mit Energie. Sie bestehen meist aus einer Wallbox und dem entsprechenden Ladekabel. Die Satelliten erweitern die Hauptinfrastruktur und gewährleisten die Versorgung von Ladepunkten in entlegenen oder dezentralen Bereichen. Sie sind besonders geeignet für Abstellflächen mit hoher Fahrzeugdichte und bieten eine flexible Skalierbarkeit.



5. Etappierung für die Errichtung von Ladeinfrastruktur

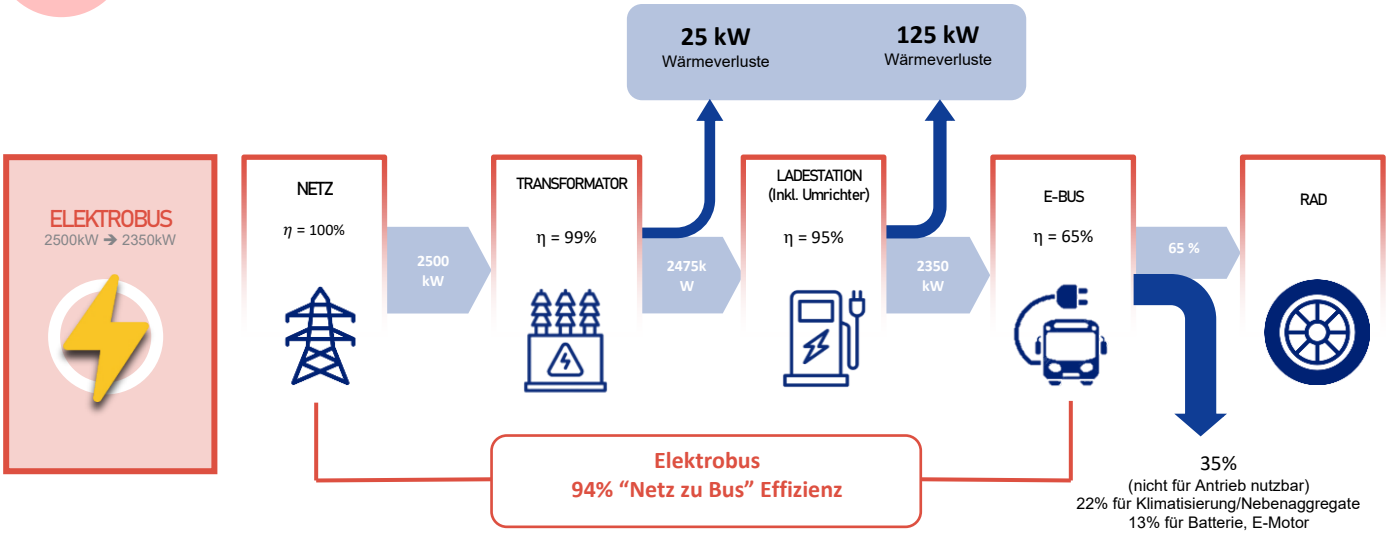
Die Infrastruktur wird in **mehreren Ausbaustufen** an die schrittweise Elektrifizierung der Flotte angepasst.

Umrichter, Ladepunkte und Netztransformatoren werden bedarfsgerecht dimensioniert und installiert, wobei eine optimale Dimensionierung unter Einbezug der zukünftigen Flottenstrategie **spätere Erweiterungen** erleichtert.



Thermomanagement

Die elektrische Energieübertragung vom Netz zu den Batterien ist mit Verlusten in Form von Abwärme verbunden. Mit rund 5 % entsteht der grösste Teil der Abwärme bei den Umrichtern.



Systemwirkungsgrade vom Stromnetz bis zum Fahrzeug

Grundsätzlich sind die heute verfügbaren Umrichter für die Aussenaufstellung konzipiert. Sie bedürfen für die Kühlung eine **Umgebungstemperatur von meist unter 40°C**, wobei die anfallende Abwärme ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird.

In dicht bebauten Regionen ist es oft schwierig, genügend Platz für eine Vielzahl von Umrichterschränken zur Verfügung zu stellen. Daher kommen oft nur **geschlossene Räumlichkeiten** für die Aufstellung in Frage, aus welchen die Abwärme abgeführt werden muss und in dessen Rahmen sinnvoll genutzt werden kann.

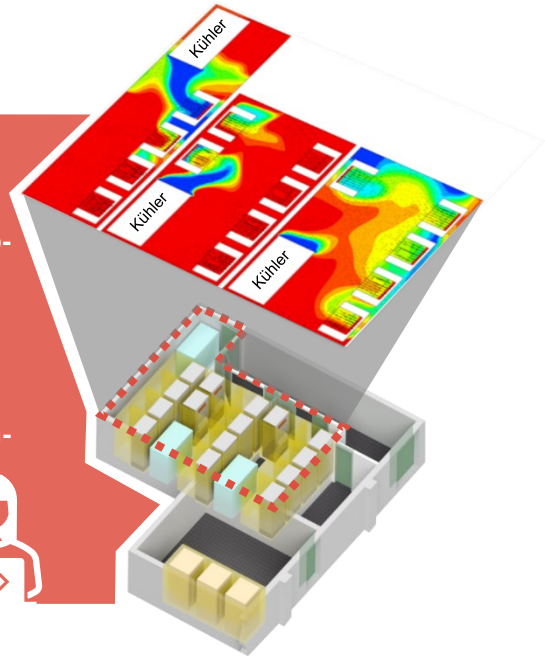
*Um die **optimale Kühlung** der Umrichter sicherzustellen, sollte die Wärmeverteilung in **geschlossenen Räumen** simuliert werden. Ingenieurbüros verfügen über die dafür benötigte Software und können Aufschluss über die optimale Aufstellung von Kühlaggregaten liefern.*

Kurz-TIPP

SIMULATION

Simulationen der Luftströmung in Umrichterräumen helfen, **den Wärmefluss** zu verstehen und zu **optimieren**. Sie ermöglichen die Modellierung der Temperaturverteilung, das Erkennen von Überhitzungsbereichen und das Testen verschiedener Lösungen wie Belüftung, Isolation oder Flüssigkeitskühlung.

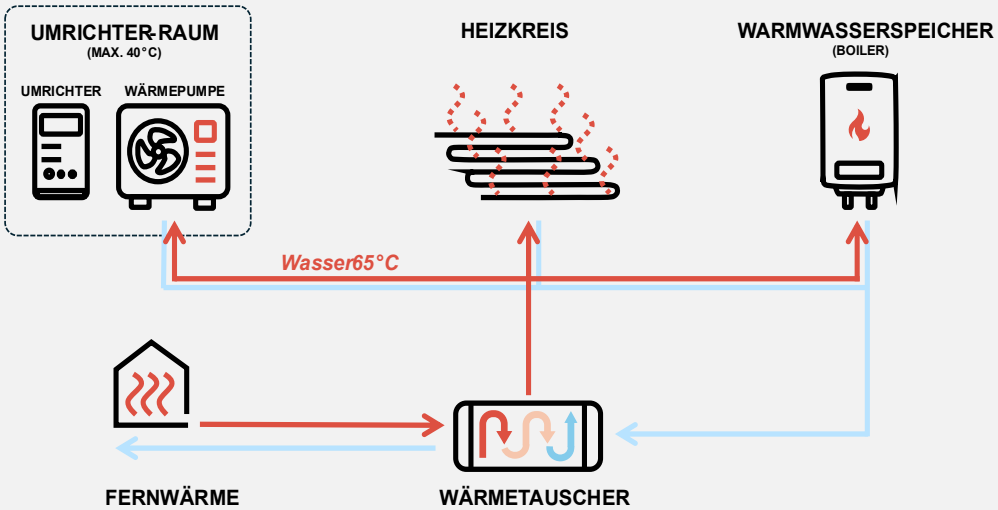
Mit Hilfe dieser Erkenntnisse lassen sich die **Geräteanordnungen optimieren**, die Leistung steigern und die **Lebensdauer** der Komponenten verlängern.



Die anfallende Abwärme kann mittels einer Luft-Wasser-Wärmepumpe abgeführt und beispielsweise in ein Fernwärmenetz eingespeist oder lokal als Warmwasserquelle oder zur Beheizung des Gebäudes eingesetzt werden.

KREISLAUF DES WÄRMEFLUSSES

Massnahmen zur Abführung der erzeugten Wärme und induzierter Wärmekreislauf



Einfachheit

Einfacher **Anschluss** an die Systeme der Gebäudetechnik oder an Fernwärmenetze

Effektivität

Reduktion der **Gesamtverluste** durch die **Weiterverwendung** von Abwärmeverlusten

Modular

Die zurückgewonnene Wärme kann auf viele **verschiedene Arten** genutzt werden

VIERTES KAPITEL

KOSTENSCHÄTZUNG

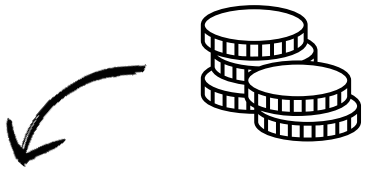
In wenigen Worten

Die folgenden Seiten widmen sich den wirtschaftlichen Aspekten der Elektromobilität und der zugehörigen Ladeinfrastruktur. Die Kostenrechnung ist aufgeteilt in Investitions- und Betriebskosten (Capex & Opex), letztere werden über einen Zeitraum von 20 Jahren (ungefähre Lebensdauer der Ladeinfrastruktur) betrachtet und liegen in der gleichen Grössenordnung wie die Investitionskosten.

Der Fokus wird auf die Kostenrechnung der Ladeinfrastruktur gelegt. Fahrzeug- und Energiekosten sind nicht teil der Kostenrechnung.

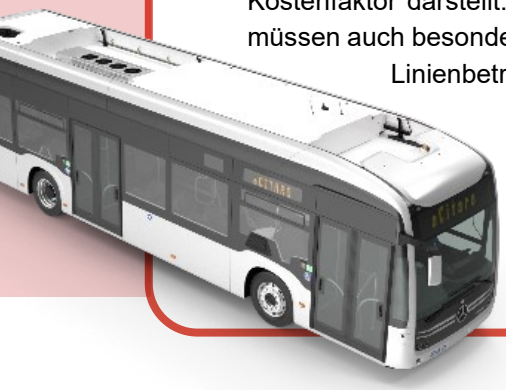
Investitionskosten Capex

Capex, oder Investitionskosten, umfassen alle Ausgaben, die für den Aufbau und die Implementierung der Ladeinfrastruktur sowie den Erwerb der Elektrobusse erforderlich sind. Diese Kosten fallen einmalig an und inkludieren unter anderem die Anschaffungskosten sämtlicher Fahrzeuge und Komponenten, Installationsarbeiten und die notwendigen Netzanschlusskosten.



Kosten Elektrobus

Die Beschaffungskosten für Elektrobusse variieren **je nach Modell**, technischer Ausstattung und Servicevertrag. Im Durchschnitt können sie jedoch **signifikant höher** liegen als die Kosten für konventionelle Dieselbusse. Dies liegt vor allem an der **Batterie**, die einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt. Bei der Kostenrechnung müssen auch besondere Anforderungen für den Linienbetrieb berücksichtigt werden.



Kosten Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur umfasst alle technischen und **baulichen Elemente**, die für den Betrieb der Elektrobusse erforderlich sind. Dazu gehören Ladegeräte, deren **Beschaffungskosten pro Umrichter** ca. 200 000 CHF betragen.

Zusätzlich fallen **Nebenkosten** für **Installation** und **Kühlung** an. Die Netzanschlusskosten pro Umrichter belaufen sich auf ca. 50 000 CHF und beinhalten den Netzkostenbeitrag sowie den Anschluss an das Stromnetz. Die Kosten der Ladeinfrastruktur sind in der folgenden Grafik weiter aufgeschlüsselt.

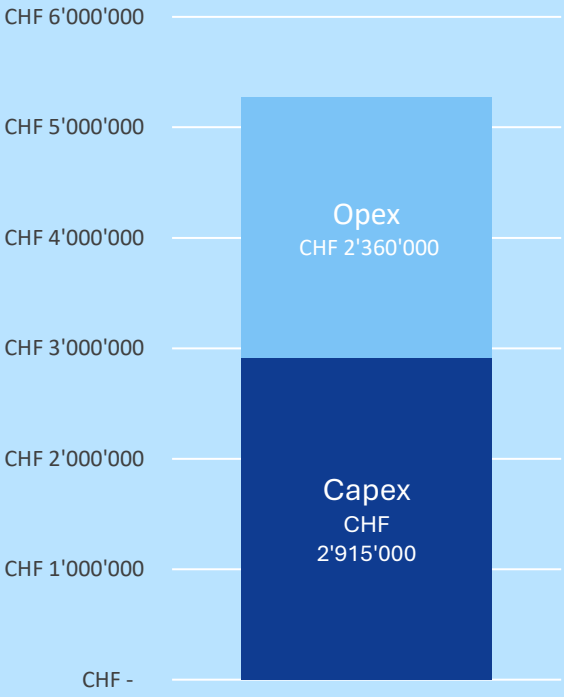
Laufende Betriebskosten Opex

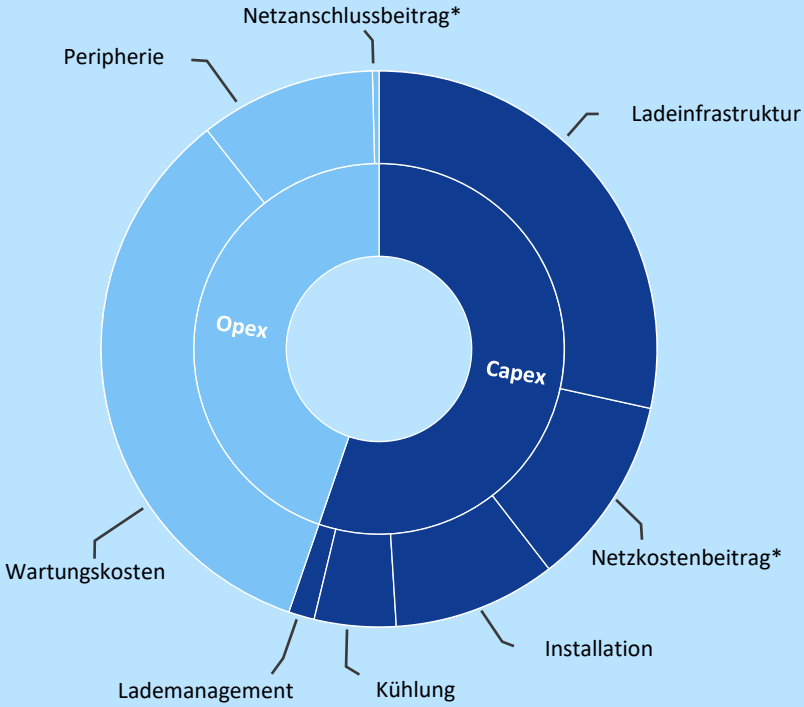
Opex, oder Betriebskosten, sind laufende Ausgaben, die während der gesamten Betriebsdauer anfallen. Sie umfassen die Wartung der Ladeinfrastruktur, die Instandhaltung der Elektrobusse sowie Kapitalkosten (Fremd- oder Eigenkapital).
Auf die gesamte Lebensdauer von 20 Jahren betrachtet, summieren sich die Betriebskosten für den vorliegenden Fall der Chur Bus auf etwa 2,34 Mio. CHF. Die Wartungskosten erscheinen auf den ersten Blick hoch. Dies ist damit zu begründen, dass die durchschnittliche Inflationsrate der letzten fünf Jahre berücksichtigt wurde und die Extrapolation auf 20 Jahre zu relativ hohen Wartungskosten führt.

Die Annahmen für die Kostenrechnung beruhen auf Offerten, öffentlichen Daten, Projekterfahrungen und Literaturangaben zum Zeitpunkt der Berichtverfassung und sind aufgrund verschiedener Einflussfaktoren Schwankungen unterworfen, weswegen sich eine regelmässige Aktualisierung empfiehlt.
Die Peripherie beinhaltet den Stromverbrauch von Peripheriegeräten (z.B. Kühlung für Umrichter) sowie eventuell anfallende Lizenzkosten für das Lade- und Energiemanagementsystem.

CAPEX/OPEX ANALYSE

Kosten der **Ladeinfrastruktur über 20 Jahre Lebensdauer** mit 30 150kW-Stationen. Fahrzeug- und Energiekosten sind nicht enthalten.





* Netzkosten- und Netzanschlussbeiträge variieren je nach Elektrizitätsanbieter, unterscheiden sich in der Bezeichnung und können unterschiedlich strukturiert sein.

Fördermöglichkeiten und Finanzierung

Fördermöglichkeiten umfassen alle finanziellen Unterstützungen, die von öffentlicher oder privater Hand bereitgestellt werden, um den Übergang zu emissionsfreien Technologien zu erleichtern. Dazu gehören Zuschüsse, Steuererleichterungen oder zinsgünstige Kredite.

FÖRDERMÖGLICHKEITEN

In der Schweiz gibt es verschiedene Fördermassnahmen für Elektrobusse und Ladeinfrastruktur – siehe dazu den Bericht des Bundesrates «Nichtfossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen». Neu ist auf Bundesebene die Förderung von E-Bussen durch das CO_2-Gesetz. Ladeinfrastruktur kann für den durch Bund und Kantonen bestellten Verkehr weiterhin über die Abgeltungen im regionalen Personenverkehr mitfinanziert werden oder über das Programm Agglomerationsverkehr des ARE. Auf kantonaler Ebene existieren verschiedene Programme zur Finanzierungsunterstützung und Förderung der Elektromobilität, welche im Einzelfall abzuklären sind. Weiterhin bieten Energieversorger Zuschüsse oder reduzierte Netznutzungstarife.

FINANZIERUNGSMODELLE

Die Finanzierung kann entweder über Eigenmittel oder durch Fremdkapital erfolgen. Public-Private-Partnerships (PPP) sind ebenfalls eine Option, um Kosten zu teilen und Risiken zu minimieren. Alternativ können auch Leasing-Modelle für die Busse oder Pay-per-Use-Modelle für die Ladeinfrastruktur in Betracht gezogen werden.

FÜNFTES KAPITEL

ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

In wenigen Worten

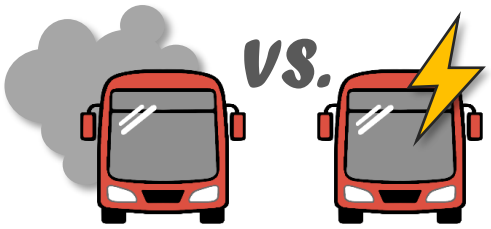
Ziel der Flottenelektrifizierung ist die Verringerung der CO_2-Emissionen.

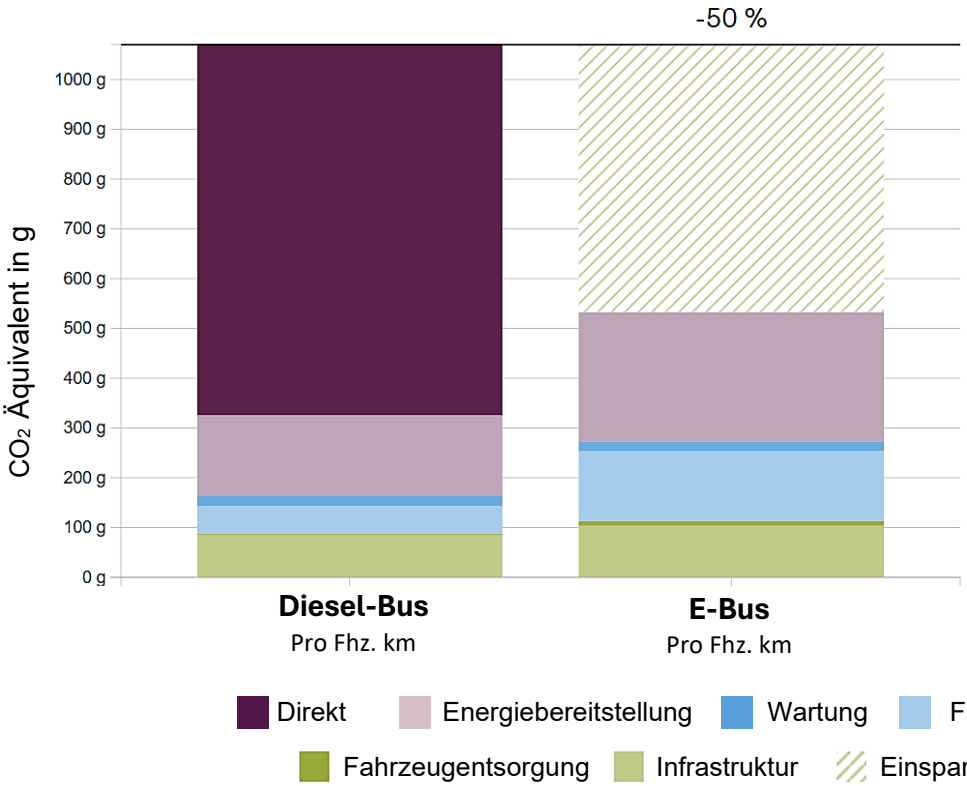
Doch wie gross ist die tatsächliche Einsparung, und welchen Einfluss hat sie auf die Klimaziele?

Einsparung der CO_2 Emissionen

Die ökologische Bewertung von öffentlichen Verkehrssystemen ist ein Schlüsselansatz zur Verringerung der Klimaauswirkungen. Die Kohlenstoffbilanz, ein Hauptindikator für Treibhausgasemissionen (THG), quantifiziert die Gesamtemissionen eines Systems oder Produkts, wobei alle Phasen seines Lebenszyklus einbezogen werden: Produktion, Nutzung und Ende der Lebensdauer.

Durch die Einführung von Elektrobussen als Ersatz für dieselbetriebene Busse mit Verbrennungsmotor können die CO_2-Emissionen erheblich reduziert werden. Die folgende Abbildung zeigt die täglichen CO_2-Emissionen pro Linie, ausgedrückt in Kilogramm (kg CO_2/Tag), für beide Antriebsarten. Elektrobusse ermöglichen eine durchschnittliche Reduzierung der täglichen Emissionen um 50%.





Fahrzeugparameter:

Herstellungsjahr: 2020

Lebensdauer: 960 000km

Jährliche Fahrleistung: 80 000km

Anzahl Passagiere: 20 (31% Auslastung)

Dieselbus:

Kraftstoffverbrauch: 30l/100km

Elektrobus:

Stromverbrauch: 160 kWh/100km
Batteriekapazität: 550kWh
Batterietyp: NMC
Strommix: Verbrauchermix

Ergebnisse aus dem Tool „Umweltrechner Verkehr“ von Energie-Schweiz

Kurz-TIPP

Der «Umweltrechner Verkehr» von *Energie-Schweiz* ermöglicht den raschen Vergleich von Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel.

energieschweiz

SECHSTES KAPITEL

WEITERFÜHRENDE THEMEN

In wenigen Worten

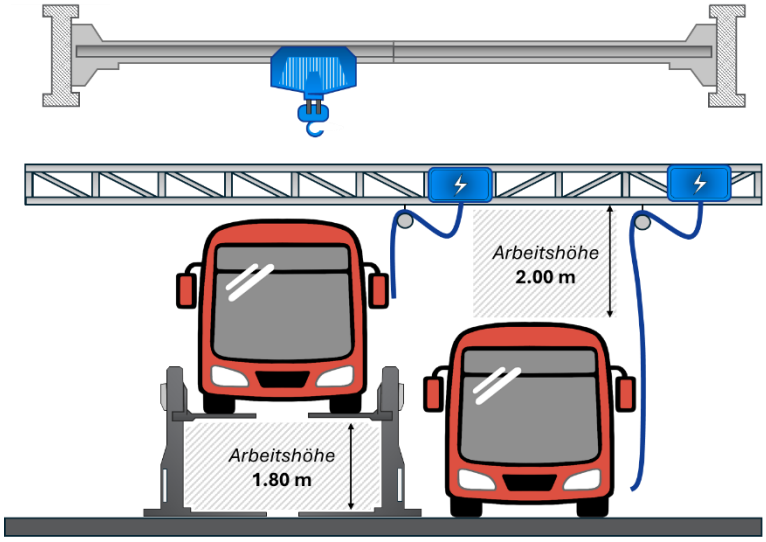
Die Umstellung auf Elektrobusse erfordert auch eine angepasste Werkstattinfrastruktur. Von Hochspannungssicherheit bis hin zu Brandschutzmassnahmen müssen zahlreiche technische und regulatorische Anforderungen erfüllt werden.

Weitere Details sind auch im Bericht „Technische Umsetzung Ladeinfrastruktur bei Chur Bus“ zu finden.

Konzepterarbeitung für den Werkstattaufbau für E-Busse

Werkstattaufbau Konzept für Chur

Eine für Elektrobusse ausgelegte Werkstatt benötigt eine funktionale Infrastruktur mit ausreichend Platz für Lade- und Wartungsbereiche sowie eine Vorrichtung für Dacharbeiten. Die Komponenten sollten optimal platziert werden, um Arbeitsabläufe zu erleichtern, während Fluchtwege freigehalten werden.
Zur detaillierten Planung empfiehlt es sich, Sachverständige der Feuerwehr und Arbeitssicherheit zur individuellen Beratung beizuziehen.



Regulatorische Anforderungen

Sicherheitsaspekte im Bereich der Hochvoltanlagen

In der Schweiz müssen elektrische Anlagen, besonders zum Laden von Elektrobusflotten, strenge Sicherheitsnormen erfüllen. Relevant sind hierbei die **Starkstromverordnung**, die **Licht- und Betriebsverordnung (LeV)** und die **Verordnung über die Elektrizitätsversorgung in Anlagen (VPeA)**. Diese regeln die Sicherheitsanforderungen für Hochspannungs- und Niederspannungsanlagen und gewährleisten den sicheren Betrieb, insbesondere in Bereichen mit hohen Stromanforderungen.

Brandschutz

Brandschutzmassnahmen schützen die Busflotte im Brandfall vor Verlusten und erhöhen somit die Ausfallsicherheit.
Innerhalb des Depots empfiehlt sich die Errichtung von Sprinkleranlagen und das Einhalten von möglichst grossen Abständen zwischen den abgestellten Elektrofahrzeugen, um im Falle eines Batteriebrandes die Brandausbreitung zu verlangsamen. Es empfiehlt sich, die Ladeinfrastruktur in mehrere Brandabschnitte aufzuteilen, wie auch im Fall von Chur Bus die Umrichter auf drei Raume aufgeteilt werden. Zur aktiven Brandbekämpfung eignen sich hier CO_2-Löschanlagen.
Zur Lagerung beschädigter Batterien oder Fahrzeuge wird empfohlen, einen geeigneten Abstellplatz (Havarieplatz) einzurichten.

weitere Literatur

[1] BAFU – Bundesamt für Umwelt, "Klima: das Wichtigste in Kürze", [Online]. Verfügbar: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/inkuerze.html

[2] Stadt Chur, "Masterplan Energie und Klima der Stadt Chur", 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.chur.ch/_docn/4649449/230816_Masterplan_Energie_und_Klima_print.pdf

[3] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV-Schrift 260: DC-Ladeinfrastruktur für Elektrobusse, Köln, Deutschland, 2020

[4] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV-Schrift 825: Anforderungen an Betriebshöfe, Köln, Deutschland, 2019

[5] Bundesamt für Energie (BFE), "Wasserkraft Schweiz: Statistik 2022", 2023. [Online]. Verfügbar: news.admin.ch/de/nsb?id=94702

[6] Bundesamt für Energie (BFE), "Knapp 80 Prozent des Stroms aus Schweizer Steckdosen stammten 2022 aus erneuerbaren Energien", 2023. [Online]. Verfügbar: news.admin.ch/de/nsb?id=97643

[7] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE), "Stromnetze", [Online]. Verfügbar: https://www.strom.ch/de/wissen/stromnetze

[8] Bundesamt für Energie (BFE), "Energieverluste an der Ladestation: Vergleichsstudien", 2022. [Online]. Verfügbar: https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-des-vehicules/chiffres-cles-concernant-infrastructure-de-recharge-pour-la-mobilite-electrique.html

[9] Fraunhofer IVI, Elektrische Bussysteme – Einführungskonzeptionen, Dresden, Deutschland, 2021

[10] CNRS – Centre efficacité énergétique des systèmes, "Energiemanagementstrategien für batterieelektrische Busflotten", 2020. [Online]. Verfügbar: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/CEES/tel-03710820v1

[11] A. Azzi, *Projektarbeit Master – E-Bus TL*, LITRA, 2021. [Online]. Verfügbar: https://litra.ch/media/article_images/2021/03/Alain_Azzi_-_Projet_master_ebus_TL_public.pdf

[12] EnergieSchweiz, "Umweltrechner Verkehr", [Online]. Verfügbar: https://www.energieschweiz.ch/programme/umweltrechner-verkehr/

[13] C. B. Heendeniya, D. Strepparava, M. Belliardi und V. Medici, "PVxTutt'Elettrico: Maximierung von Effizienz und Effektivität beim Übergang von Diesel- auf Elektroantrieb", Mendrisio, 09.04.2024.

[14] C. Schulz-Dübi und R. Zürcher, Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe, EnergieSchweiz, 2023.

[15] Energiestrategie 2050, "Photovoltaik und Eigenverbrauch im öffentlichen Verkehr – ESöV 2050", 2022.

[16] DKE – Deutsche Kommission Elektrotechnik, Technischer Leitfaden – Ladeinfrastruktur Elektromobilität V4.1, Frankfurt am Main, Deutschland, 2022.

[17] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, Frankfurt am Main, Deutschland, 2023.

NÄCHSTER HALT:

KLIMAFREUNDLICHE MOBILITÄT

ELEKTRISCHE ANTRIEBE,
SMARTE NETZE,
SAUBERE STÄDTE

Helbling Technik AG
Schachenallee 29
CH-5000 Aarau
+41 62 836 45 45

Besuchen Sie uns:
helbling.ch LinkedIn

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

CHUR BUS

helbling