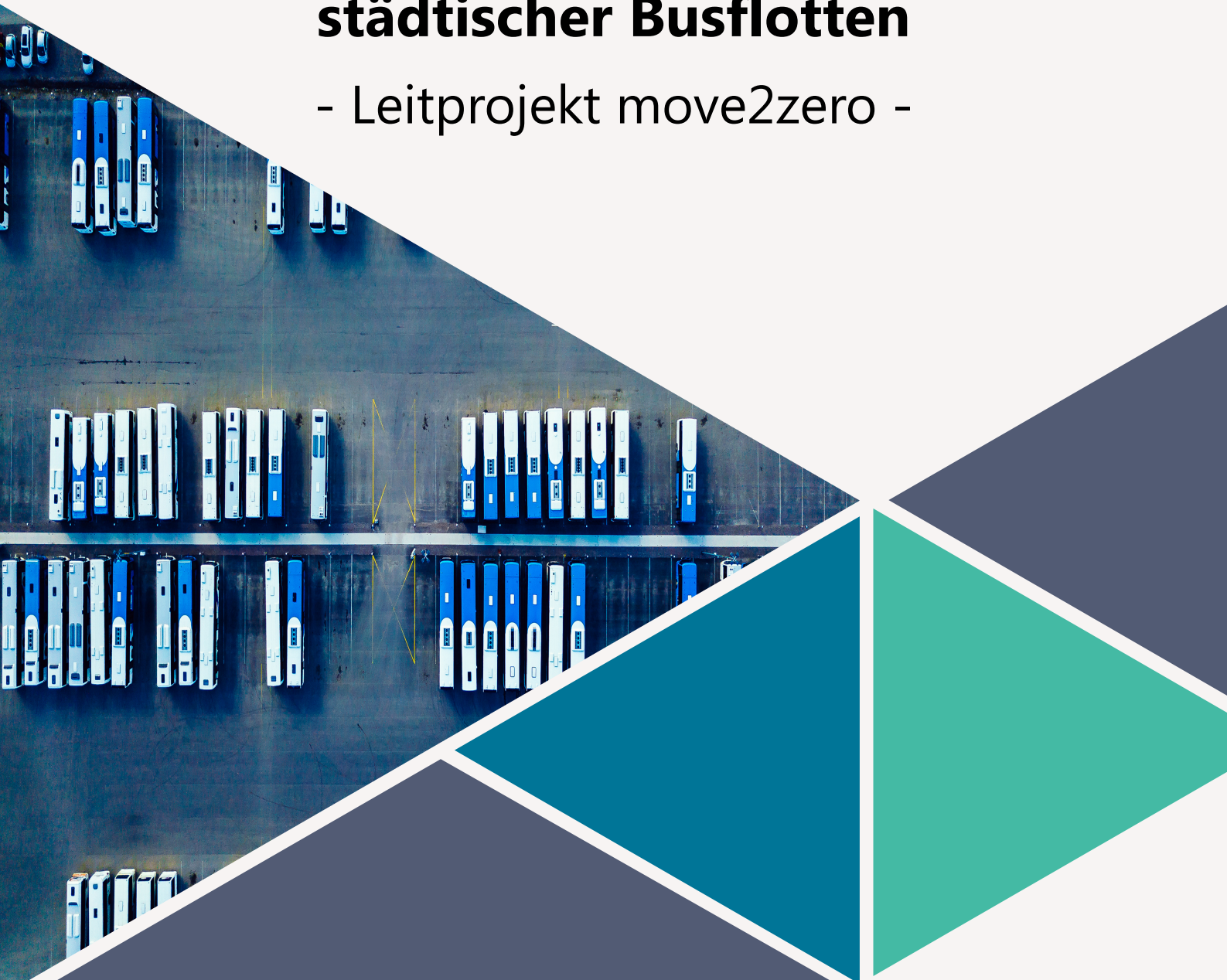


Leitfaden zur Dekarbonisierung städtischer Busflotten

- Leitprojekt move2zero -



move²zero

Acknowledgements

Wir möchten uns für die großzügige Unterstützung aller Projektpartner:innen, des Fachbeirats und der beteiligten Stakeholder für ihre Zeit und Informationen bedanken. Sie alle haben maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen.

Foto Titelseite: Miemo Penttinen / Getty Images

Erscheinungsjahr: 2024



Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms „Zero Emission Mobility“ gefördert.

Institutionen & Autor:innen



Grazer Energieagentur Ges.m.b.H

Lisa Göttfried
Maria Juschten
Manuela Beran



Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH

Andreas Solymos
Christopher Sekoll
Nina Lassnig
Marlene Brantweiner



Technische Universität Graz

Mario Hirz
Daniel Fragner



Karl-Franzens Universität Graz

Ulrich Pferschy
Nathalie Frieß



HyCentA Research GmbH

Michael Richter



Umweltbundesamt

David Fritz
Eva Hatzl



Energie Graz GmbH

Martin Leitner



Technoma GmbH

Gerhard Weinzinger



Autonomous Robot Technology GmbH

Konstantin Mautner-Lasnig
Jahn Mansour



Planungxgruppe Architekten Generalplaner PartmbB

Stephan Schwalenberg

Vorworte

Mark Perz, Vorstandsdirektor Holding Graz

Österreich hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors stellt dabei eine der größten Herausforderungen dar. Als städtischer Verkehrsdienstleister bringt die Holding Graz seit mehr als 145 Jahren Grazer:innen und Besucher:innen sicher und bequem an ihr Ziel. Nachhaltigkeit und Innovation sind dabei seit jeher zwei unserer Kernziele woraus auch das Leitprojekt „move2zero“ entstand. Dieses vom Klima- und Energiefonds geförderte Projekt markiert einen wesentlichen Schritt in unserer fortlaufenden Mission, die Mobilität in Graz nachhaltiger zu gestalten und trägt entscheidend zur Erreichung unserer Klimaziele bei.

Das Projekt „move2zero“ ist dabei kein isoliertes Forschungsprojekt. Vielmehr ist es ein integraler Bestandteil unserer Bemühungen, innovative Lösungen für die Herausforderungen der öffentlichen Mobilität zu entwickeln und damit eine Vorreiterrolle in der umweltfreundlichen städtischen Mobilität einzunehmen. Die Umstellung auf einen emissionsfreien Busbetrieb ist zweifellos mit Herausforderungen verbunden, doch wir sind uns sicher, dass diese mit Entschlossenheit, Fachwissen und der richtigen Planung überwunden werden können. Der vorliegende Leitfaden ist das Ergebnis dieser bisherigen Anstrengungen und bietet die optimale wissenschaftliche und operative Basis für die Umsetzung der gesamten Dekarbonisierung der Busflotte. Der vorliegende Leitfaden soll auch anderen Städten und Verkehrsbetrieben als wertvolle Ressource dienen, um den Dekarbonisierungsprozess mit Zuversicht, einer klaren Vision und soliden Planungen durchzuführen.



Andreas Solymos, Spartenbereichsleiter Holding Graz

Als Spartenbereichsleiter Planungsmanagement & Infrastruktur und Projektleiter von „move2zero“ freue ich mich nach fünf intensiven Projektjahren, diesen richtungsweisenden Leitfaden zu veröffentlichen. Move2zero ermöglichte es uns unter wissenschaftlicher Begleitung, emissionsfreie Technologien in unseren Busbetrieb einzuführen.



Von Ausschreibung und Einsatz emissionsfreier Busse bis hin zum Aufbau und Betrieb der notwendigen Infrastruktur – jede Phase erforderte sorgfältige Planung und Koordination. Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts war entscheidend, um die Effektivität der verschiedenen Technologien zu bewerten und den optimalen Technologiemix für den Busbetrieb in Graz zu ermitteln. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse bieten die optimale Basis für die weitere Dekarbonisierung der Busflotte in Graz.

Unsere Erfahrungen und Erkenntnisse sind nun umfassend in diesem Leitfaden dokumentiert. Damit möchten wir auch anderen Städten und Verkehrsunternehmen den Übergang zu einem nachhaltigen Verkehrssystem erleichtern.



Robert Schmied, Geschäftsführer der Grazer Energieagentur

Als Geschäftsführer der Grazer Energieagentur und Initiator des Projektes move2zero bin ich besonders stolz diesen Leitfaden zu veröffentlichen. Move2zero ist ein Paradebeispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie und zeigt, dass integrierte Ansätze zur Dekarbonisierung des städtischen Verkehrs nicht nur wünschenswert, sondern auch höchst effektiv sind. Durch diese Bündelung von Fachwissen aus verschiedenen Disziplinen und Sektoren konnten wir eine optimale Basis für die weitere Dekarbonisierung der gesamten Busflotte schaffen.

Als Forschungseinrichtung für Klima- und Umweltschutz liegt uns die Verbesserung der Luft- und Lebensqualität sehr am Herzen. Wie bereits im Grazer Klimaschutzplan dargestellt, entfällt ein wesentlicher Teil der aktuellen CO2 Emissionen im Raum Graz auf den Verkehrssektor. Ein emissionsfreies und attraktives öffentliches Verkehrsangebot ist daher unumgänglich. Wir freuen uns sehr, mit der Holding Graz einen lokalen Verkehrsdienstleister zu haben, welcher auf Forschung und Innovation auf dem Weg zur Nachhaltigkeit setzt. Dieser Leitfaden ist das Ergebnis dieser gemeinsamen Anstrengungen und fasst sämtliche Erfahrungen und Erkenntnisse für die Dekarbonisierung von Busflotten zusammen.



Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG & STRATEGIEN	
	● Ziele des Leitfadens	10
	● Rechtliches	12
	● Argumente für die Dekarbonisierung	14
	● Strategien	16
	● Mögliche Hemmnisse	18
2	BEDARFSANALYSE	
	● Verkehrssystem	22
	● Stakeholder	24
3	UMSETZUNGSPROZESSE	
	● Fahrzeuge	28
	● E-Lade-Infrastruktur	32
	● Wasserstoff-Tank-Infrastruktur	38
	● Betriebliche Infrastruktur	44
	● Betriebsmanagement	48
4	PROJEKTPLANUNG & RESSOURCEN	
	● Anschaffungsprozess Fahrzeuge & Infrastruktur	54
	● Wirtschaftlichkeitsberechnung	56
	● Förderungen	62
5	KLIMAWIRKUNGEN	
	● Öko-Design	66
	● Lebenszyklusanalyse	68
6	FAZIT & WEITERFÜHRENDE LINKS	

Abkürzungsverzeichnis

BVG	Bundesvergabegesetz
CVD	Clean Vehicle Directive
EBIN	Emissionsfreie Busse und Infrastruktur (Förderprogramm des BMK)
EHC	Electrochemical hydrogen compression (elektrochemische Wasserstoff-Kompression)
FC	Fuel Cell (Brennstoffzelle)
FC-REX	Fuel Cell with Range Extender: Brennstoffzellenbus mit zusätzlicher Batterie zur Erweiterung der Reichweite
KSG	Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Analysis (Lebenszyklusanalyse)
MC	Mechanical compression (mechanische Kompression)
MVA	Megavoltampere
ONC	Overnight Charging (Übernachtladen)
OPC	Opportunity Charging (Gelegenheitsladen)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
RRF	RRF – Aufbau- und Resilienfazilität
SH	Stakeholder
THG	Treibhausgasemissionen
TRL	Technology Readiness Level
WTW	Well-to-Wheel (Betrachtung der gesamten Wirkungskette der Fahrzeuge)

Einführung & Strategien

Kapitel 01 gibt einen ersten Einblick in die Ziele des Leitfadens und enthält Informationen zu den folgenden Fragen:

- Welchen Mehrwert bringt die Dekarbonisierung? Was sind die zentralen Argumente dafür?
- Was sind die wesentlichen rechtlichen Rahmenbedingungen?
- Inwieweit sind übergeordneten Strategien auf globaler, regionaler und lokaler Ebene zu berücksichtigen?
- Welche Hemmnisse und Herausforderungen können im Dekarbonisierungsprozess auftreten?



01



Ausgangspunkt dieses Leitfadens

Die steigende Urbanisierung und der Klimawandel stellen politische Entscheidungsträger:innen vor große Herausforderungen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind ambitionierte und sektorenübergreifende Klimaschutzmaßnahmen vonnöten.

Die Maßnahmen der EU zur Reduktion der Emissionen des Verkehrssektors fokussieren sich dabei v.a. auf den Straßenverkehr, der aktuell 71% aller verkehrsbezogenen Emissionen ausmacht ^{#1}. Eine dieser wichtigen Maßnahmen ist die Reduzierung der negativen Umweltauswirkungen öffentlicher Verkehrsmittel, v.a. in Bezug auf dieselbetriebene Straßenfahrzeuge. Dazu wurde unter anderem die **Clean Vehicle Directive** (CVD, siehe nächste Seite) seitens der EU verabschiedet.

Der vorliegende Leitfaden dient dazu, Städte und Verkehrsunternehmen in der Dekarbonisierung von Busflotten zu unterstützen, indem Erfahrungen aus bisherigen Implementierungsprozessen geteilt werden. Damit sollen Entscheidungsträger:innen, Planer:innen und Verantwortliche durch die komplexen Schritte der Dekarbonisierung städtischer Bustransportsysteme geführt werden.

Ziele dieses Leitfadens

- 1

Übersicht aller relevanten Rahmenbedingungen: Der Leitfaden enthält einen Überblick über wesentliche rechtliche Aspekte, Entscheidungsgrundlagen, mögliche Herausforderungen sowie Argumente für die Dekarbonisierung.
- 2

Entscheidungsunterstützung für den richtigen Technologiemix: Der Leitfaden bietet Entscheidungsträger:innen Unterstützung bei der Auswahl des optimalen Technologiemixes. Er beleuchtet die Vor- & Nachteile verschiedener Technologieoptionen, um Städte bei ihren Entscheidungen auf Basis der individuellen Voraussetzungen zu unterstützen.
- 3

Empfehlungen für die Projekt- und Ressourcenplanung: Durch die Bereitstellung von Zeit-, Ablauf- und Ressourcenplänen und anderen Planungswerkzeugen soll der Leitfaden Entscheidungsträger:innen eine klare Struktur bieten und den

Implementierungsprozess bestmöglich begleiten. Dabei werden alle Prozesse von den ersten strategischen Überlegungen bis zum Monitoring einbezogen.



Erfahrungsaustausch: Der Leitfaden enthält Erfahrungen aus Graz, wo im Rahmen des Projekts move2zero ein Testbetrieb von Wasserstoff- und Batterieelektrischen Bussen umgesetzt und wissenschaftlich begleitet wurde. Dies ermöglicht es anderen Städten, von erfolgreichen Umsetzungsschritten zu lernen und potenzielle Herausforderungen proaktiv anzugehen.

Beispiele aus Graz werden mit Hilfe grüner Fact-Boxen dargestellt.

Klimaziele in der EU & in Österreich

Im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen wurde 2015 das Übereinkommen von Paris von 195 Vertragsparteien (inkl. der EU als eine Partei) unterzeichnet und seitens der EU bereits 2016 ratifiziert ^{#2}. Ziel des Abkommens war u.a. die Begrenzung der globalen Klimaerwärmung auf deutlich unter 2 Grad, wenn möglich auf 1,5 Grad. Um dieser Verpflichtung gerecht zu werden, wurden im Jahr 2021 der sogenannte „European Green Deal“ und daraus resultierende „Fit for 55“-Maßnahmen beschlossen, welche die Klimaneutralität der 27 EU-Mitgliedsstaaten bis 2050 zum Ziel haben ^{#3}.

In Österreich wurde bereits vorher, 2011, ein nationales Klimaschutzgesetz (KSG) verabschiedet und seitdem mehrfach novelliert. In den verschiedenen Rechtsdokumenten werden teils separate Klimaziele für einzelne Dekaden sowie für bestimmte Sektoren (u. A. für den Verkehr) definiert, wie nachfolgende Tabelle verdeutlicht ^{#4, #5, #6}.

		2020	2030	2040	2050
Emissionsziele gesamt (BL 1990)	EU	-31%	-55%	-90%	-100 %
	AT		-36% (BL 2005)	-100 %	-100 %
Emissionsziele Verkehr (BL 2015)	EU				-90%
	AT			-100 %	-100 %

Clean Vehicle Directive

Zur Erreichung der Klimaziele hat die Europäische Kommission die "**Clean Vehicle Directive**" (CVD, Richtlinie (EU) 2019/1161) verabschiedet, auch bekannt als das "Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz". Dieses Gesetz fördert eine nachhaltige und umweltfreundliche Mobilität, indem es Vorgaben für konkrete Dekarbonisierungspfade von Fahrzeugen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) macht. So sieht die CVD für alle EU-Staaten spezifische Beschaffungsquoten umweltfreundlicher Nahverkehrsfahrzeuge vor, die im Rahmen einer öffentlichen Beschaffung angeschafft werden. Damit adressiert sie Städte und Gemeinden als Auftraggeber:innen sowie kommunal oder privatwirtschaftlich geführte Verkehrsunternehmen.

Umsetzung der CVD in Österreich

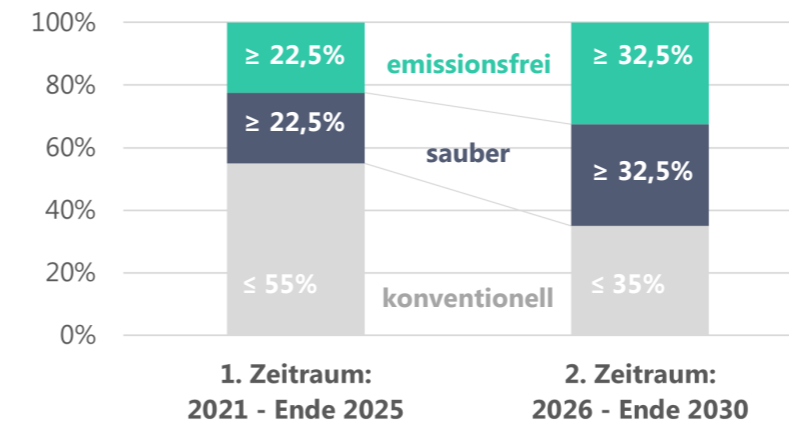
Straßenfahrzeug-Beschaffungsgesetz (SFBG) #7: stellt die Umsetzung der CVD in Österreich dar und schreibt seit 2021 die Förderung sauberer Straßenfahrzeuge bei öffentlichen Busvergabeverfahren vor. Das SFBG betrifft hauptsächlich Busse der Klasse M3 (> 8 Sitzplätze und > 5 Tonnen). Die Höchstgrenzen für Geldbußen für jedes beschaffte bzw. eingesetzte Straßenfahrzeug, an dessen Stelle ein sauberes Straßenfahrzeug beschafft bzw. eingesetzt werden hätte müssen, beträgt für emissionsfreie „Busse“ € 225.000. Die Bildung von Erfassungsgemeinschaften ist zur Flexibilisierung hinsichtlich der Erreichung der Mindestziele möglich.

Bundesvergabegesetz (BVG) #8: Die Beschaffung von Straßenfahrzeugen muss seit 2021 auch betriebsbedingte Energie- und Umweltauswirkungen während der Gesamtlebensdauer eines Fahrzeuges berücksichtigen.

Sonderrichtlinie zur Förderung der Umstellung auf emissionsfreie Busflotten im öffentlichen Personenverkehr #9: Das Ziel der Richtlinie, welche die Anschaffung emissionsfreier Busse im Rahmen der EBIN-Förderung des BMK regelt, besteht darin, den Prozentsatz der emissionsfreien Busse im öffentlichen Personennahverkehr erheblich zu erhöhen.



Dabei wurden **2 Ziel-Zeiträume** definiert:

**Einstufung der Fahrzeugtechnologien**

Fahrzeuge gelten als „emissionsfrei“, wenn sie im Betrieb <1 g CO₂/kWh emittieren.

- | | |
|------------------|----------------------|
| sauber | emissionsfrei |
| ● Elektrizität | ● Elektrizität |
| ● Wasserstoff | ● Wasserstoff |
| ● Biokraftstoffe | |
| ● Erdgas | |
| ● Biomethan | |

Relevante Strategien auf städtischer Ebene am Beispiel Graz

Klimaschutzplan Graz: Der Klimaschutzplan der Stadt Graz ist die übergeordnete Strategie zur Erreichung der Klimaschutzziele.



Energiemasterplan Graz: Ziel dieses Plans ist eine nachhaltige Energiebereitstellung und -Versorgung sowie ein nachhaltiges Energiemanagement im Sinne des Klimaschutzes.



Stadtentwicklungskonzept 4.0: Dieses Konzept stellt das strategische Planungsinstrument der Landeshauptstadt Graz für die kommenden 15 Jahre dar, welches auf Basis von zehn Grundsätzen die künftige Entwicklung skizziert. Ziel dieser Grundsätze ist die Verwirklichung einer Stadt mit hoher Lebensqualität, weshalb sämtliche Maßnahmen und Projekte der Stadtentwicklung zukünftig mit diesen Grundsätzen übereinstimmen müssen.



Masterplan Öffentlicher Verkehr (ÖV): Der Masterplan ÖV zielt darauf ab, den öffentlichen Verkehr attraktiver und sauberer zu gestalten. Dies beinhaltet beispielsweise die Ausweitung des Straßenbahn- und Busliniennetzes, den Kauf neuer Straßenbahnen, Taktverdichtungen sowie die Anschaffung emissionsfreier Busse.

Einführung | ARGUMENTE

Was spricht für eine Dekarbonisierung des öffentlichen Busverkehrs?

In der CVD spielt der städtische Bustransport eine Schlüsselrolle und nun sind europäische Städte am Zug, das Gesetz umzusetzen und die Dekarbonisierung ihres öffentlichen Verkehrs voranzutreiben. Im Fokus stehen dabei vor allem batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Busse, um den rechtlichen Anforderungen nach emissionsfreien Antrieben gerecht zu werden. Aber warum sollten Städte in die Umstellung investieren?

**Klima und Umwelt**

Die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung des städtischen Bustransports geht über das bloße Erfüllen von Vorschriften, wie der Clean Vehicle Directive hinaus. Sie ist ein notwendiger Schritt, um den Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken und die Luftqualität in städtischen Gebieten zu verbessern. Als notwendiger Schritt zur Erreichung der nationalen Klimaziele leisten emissionsfreie Busse auch einen ökonomischen Beitrag, indem sie die anfallenden Strafzahlungen bei Nicht-Erreichung der Klimaziele Österreichs reduzieren oder verhindern können.

**Gesundheit und Lebensqualität**

Auch Bürger:innen profitieren von der Umstellung auf einen emissionsfreien Bustransport. Durch bessere Luftqualität, weniger Lärm und eine nachhaltige Infrastruktur wird die Lebensqualität in der Stadt langfristig gesteigert. Eine emissionsfreie Mobilitätsstrategie wird damit nicht nur den heutigen Anforderungen an Klimaschutz gerecht, sondern auch den zukünftigen Bedürfnissen der Bewohner:innen.

Busse machen 30% der gesamten Emissionen im „Haus Graz“ (also allen Beteiligungen der Stadt Graz) aus.

**Vorbildfunktion staatlicher Akteure**

Indem der öffentliche Nahverkehr auf emissionsfreie Technologien umgestellt wird, senden politische Entscheidungsträger:innen ein klares Signal an die Gesellschaft, dass sie proaktiv und verantwortungsbewusst auf die Herausforderungen des Klimawandels reagieren. Diese Vorbildfunktion erzeugt nicht nur eine breitere Akzeptanz für entsprechende Maßnahmen, sondern motiviert auch Privatpersonen und Unternehmen, umweltfreundlichere Entscheidungen zu treffen.

**Stärkung der regionalen Wettbewerbsfähigkeit und des Wachstums**

Die Förderung einer verstärkten Nachfrage nach emissionsfreien Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs kann darüber hinaus zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und zum nationalen und regionalen Wirtschaftswachstum in diesem Sektor beitragen.

**Strategische Positionierung der Region**

Die Dekarbonisierung des städtischen Bustransports bietet Städten die Möglichkeit zur strategischen Positionierung und Steigerung der Attraktivität ihrer Stadt als Lebens- und Wirtschaftsraum.

**Stärkere Energieautonomie für Verkehrsunternehmen**

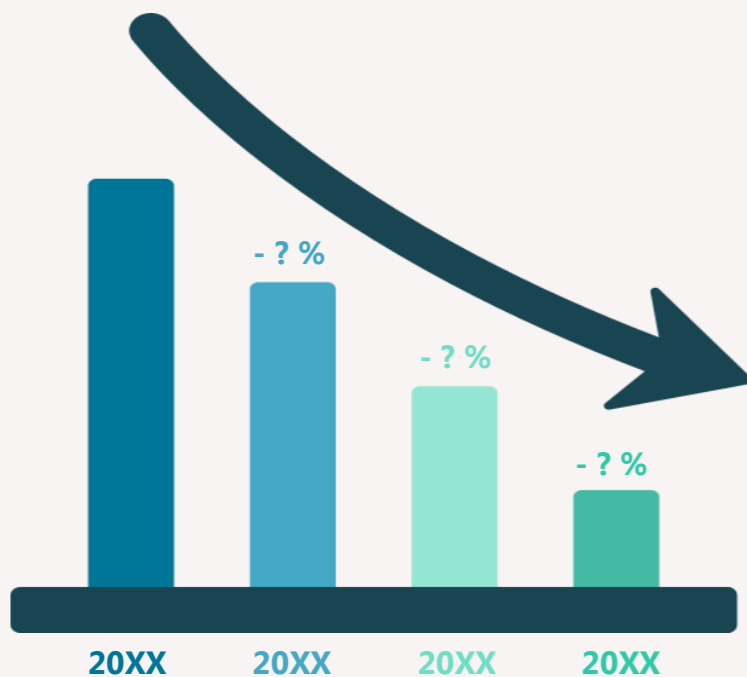
Gegenüber dem Referenzsystem „Dieselbusse“ werden emissionsfreie Fahrzeuge aus lokal oder national produzierbaren Energiequellen (Strom bzw. Wasserstoff) betrieben und sind somit weniger von Lieferengpässen betroffen.

Übergeordnete globale, EU-weite und nationale Dekarbonisierungsziele

Ziel: Berücksichtigung der **Emissionsreduktionsziele** für den Verkehrssektor auf Basis der EU-Vorgaben und der Überführung in nationale Gesetze (siehe Kap. 1.2 zu rechtlichen Grundlagen).

Fragen dahingehend:

- **Zieldefinition**
Welche **konkreten Ziele** zur Emissionsreduktion müssen eingehalten werden? (in Tonnen CO₂)
- **Zeitraumen**
Welcher **Zeitraumen** ist vorgesehen für die Erreichung der Emissionsreduktionsziele?



Ausrichtung der Strategien an übergeordneten Zielen

Regionale & lokale Klimaziele und Übertrag in sektorale Strategien

Ziel: Definition der Emissionsreduktionsziele und abgeleiteter sektoraler Ziele (z.B. Modal Split-Veränderung) für den Verkehrssektor auf Basis **lokaler Strategiepapiere & Masterpläne** (siehe Kapitel 1.2 - Rechtliches für Beispiele) und Definition des Zeithorizontes der Zielerreichung.

Fragen dahingehend:

- **Rollenverständnis**
Will man sich als Pionierstadt positionieren? Hierzu braucht es ein klares Bekenntnis aller relevanten regionalen/lokalen Akteure.
- **Intersektorale Koordination & Synergien**
Berücksichtigung von Synergien mit anderen Verkehrsträgern und Mobilitätslösungen, um eine effiziente Gesamtstrategie zu gewährleisten. Berücksichtigung von Synergien mit anderen sektoralen Zielstellungen (z.B. Gesundheits- oder Lebensqualitätsziele).
- **Finanzielle Ressourcen**
Berücksichtigung finanzieller Ressourcen bei der Entwicklung sektoraler Strategien

Konkrete regionale/lokale Umsetzungsstrategien

Ziel: Entwicklung einer Strategie zur Umsetzung konkreter **verkehrlicher Maßnahmen** zur Erreichung der Emissionsziele auf lokaler Ebene.

Fragen dahingehend:

- **Maßnahmenauswahl**
Welche Maßnahmen sind lokal am effektivsten, um die Ziele zu erreichen?
- **Verfügbares Budget**
Gibt es einen Budgetrahmen für die Umsetzung dieser Maßnahmen? Wenn nein, wie können die notwendigen Mittel mobilisiert werden?
- **Akzeptanz**
Wie kann die Akzeptanz der Bevölkerung für die geplanten Maßnahmen gesichert werden?



Einführung | MÖGLICHE HEMMNISSE

- **Kosten:** Die Umstellung auf emissionsfreie Busse ist zunächst mit höheren Anschaffungskosten verbunden. Batterieelektrische oder wasserstoffbetriebene Busse sind in der Anschaffung teurer als herkömmliche Dieselsebusse. Außerdem entstehen Kosten für den Aufbau der neuen Infrastruktur.
- **Finanzierung:** Die hohen Investitionskosten müssen durch entsprechende Finanzierungen gedeckt werden. Neben internen Mitteln können dabei auch Förderprogramme auf Landes-, Bundes- oder EU-Ebene in Anspruch genommen werden.
- **Wirtschaftliche Überlegungen:** Aufgrund des labilen Strommarktes und schwankender Strom- und Wasserstoffpreise, sind Wirtschaftlichkeitsrechnungen zum aktuellen Zeitpunkt eine Herausforderung. Hierbei ist es wichtig, die kurz- und langfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf die Kosten zu betrachten.

- **Infrastruktur:** Die Schaffung der erforderlichen Tank- und/oder Ladeinfrastruktur (inkl. Bau der Ladestationen und/oder Wasserstofftankstellen sowie die Anpassung des Stromnetzes oder Energiezukauf) kann eine Herausforderung darstellen. Außerdem müssen Anpassungen der Betriebshöfe der Busunternehmen für die Wartung und Reparatur der neuen Fahrzeuge vorgenommen werden.
- **Reichweite und Ladezeiten:** Elektrobusse haben oft eine begrenzte Reichweite und längere Ladezeiten im Vergleich zu Dieselsebusen. Dies kann die Planung des Betriebs und den Fahrzeugeinsatz beeinflussen, v.a. bei begrenzten Schnellladeoptionen.
- **Technologieentwicklung:** Die Technologie für emissionsfreie Busse entwickelt sich kontinuierlich weiter. Die neuesten Innovationen bzgl. Fahrzeuge und Infrastruktur in die Flotte zu integrieren, kann Städte vor Herausforderungen stellen.



- **Beschaffung und Verfügbarkeit:** Die Beschaffung von emissionsfreien Bussen kann aufgrund von begrenzter Verfügbarkeit und Produktionskapazitäten Probleme bereiten oder mit Verzögerungen einhergehen.
- **Betriebliche Anpassungen:** Die Umstellung auf emissionsfreie Busse erfordert betriebliche Anpassungen, z. B. Schulungen für das Fahrpersonal, Änderungen in der Wartung und Logistik sowie die Integration neuer Betriebsabläufe.
- **Hoher Planungsaufwand:** In der Umstellungsphase kann es z.B. aufgrund neuer Betriebsabläufe und Personalschulungen zu erhöhtem Planungsaufwand und ggf. einem Personalengpass kommen.

- **Politische Unterstützung und Regulierung:** Die Dekarbonisierung von Busflotten erfordert vielfältige staatliche Unterstützung, um Hindernisse zu beseitigen. Das umfasst die Bereitstellung von Fördermitteln, die Einführung von Umweltauflagen und die Schaffung von Umstiegsanreizen. Auch auf lokaler Ebene bedarf der Prozess eines politischen Konsens, um die notwendigen Budgetmittel zeitgerecht aufzustellen.
- **Widerstand wichtiger Stakeholder:** Besonders bei der Errichtung neuer Infrastruktur müssen Anrainer:innen frühzeitig einbezogen werden, um Widerständen entgegenwirken zu können. Auch die frühzeitige und umfassende Integration wichtiger interner Stakeholder (z.B. Fahrpersonal) in den Planungs- und Umsetzungsprozess ist wichtig, um die Akzeptanz zu steigern.

Bedarfs- analyse

Kapitel 02 gibt einen Einblick in die wesentlichen Aufgaben im Rahmen der Bedarfsanalyse sowie des Stakeholderprozesses und gibt Hilfestellungen zu folgenden Fragen:

- Wie sieht das aktuelle Verkehrssystem aus und welche Anforderungen ergeben sich daraus für das neue, emissionsfreie System?
- Welche internen und externen Stakeholder müssen in den Prozess eingebunden werden und welche Methoden gibt es dafür?



02

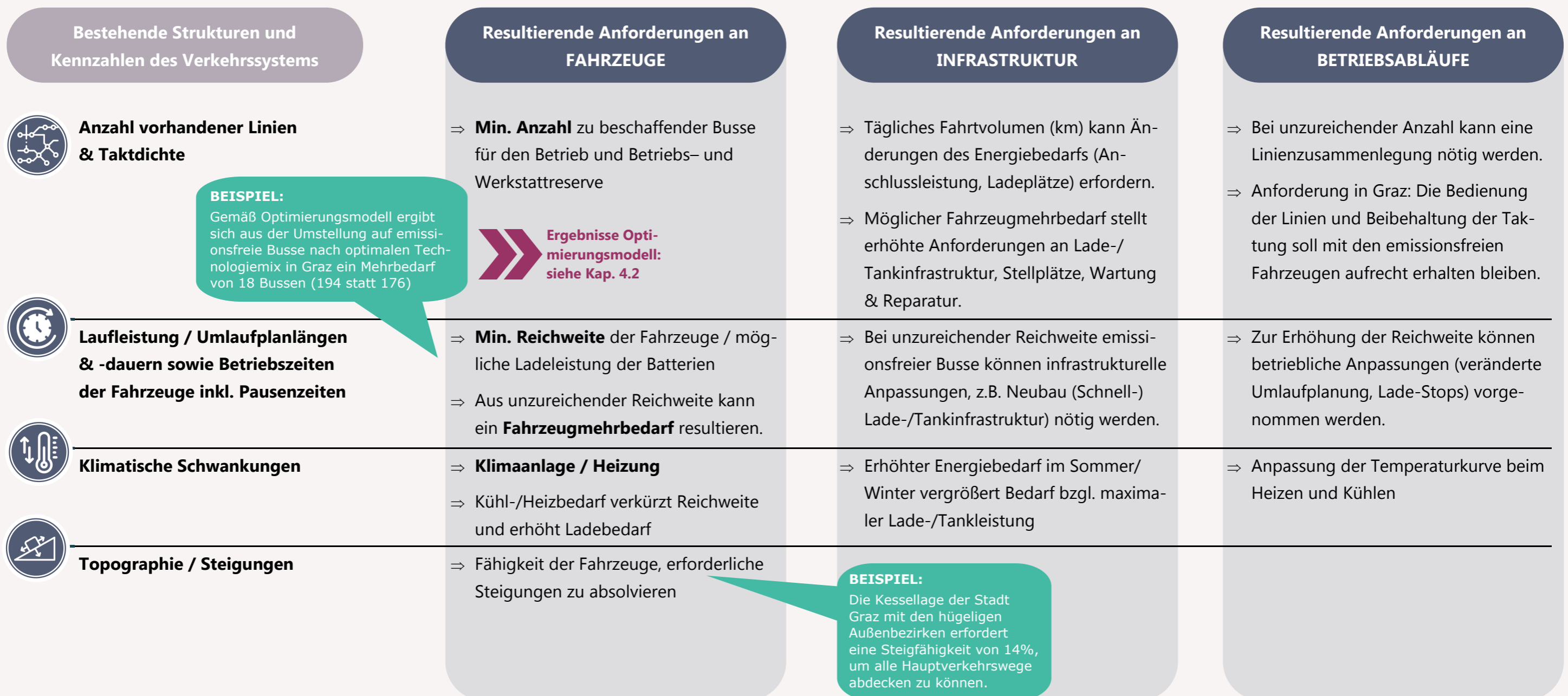
Status-Quo-Analyse des vorhandenen Verkehrssystems

Die erfolgreiche Einführung von Bussen mit alternativen Antriebssystemen hängt von ihrer praxisorientierten Ausrichtung an den betrieblichen Anforderungen ab. Zu Beginn des Dekarbonisierungsprozesses ist daher eine umfassende Bestandsaufnahme inkl. der Identifizierung der spezifischen Merkmale des Verkehrssystems und der daraus **resultierenden Anforderungen** an emissionsfreie Bussysteme von entscheidender Bedeutung.



Ein **Beispiel** für eine zentrale Kennzahl ist die zurückgelegte Distanz der vorhandenen Fahrzeuge auf bestehenden Linien zwischen ihren Tankvorgängen. Diese hat einen Einfluss auf die Fahrzeugbeschaffung und ggf. benötigter Linienanpassungen.

Auf dieser Doppelseite werden die erforderlichen Kennzahlen einer solchen Bestandsaufnahme skizziert, während detaillierte technische Aspekte in den nachfolgenden Umsetzungskapiteln behandelt werden.

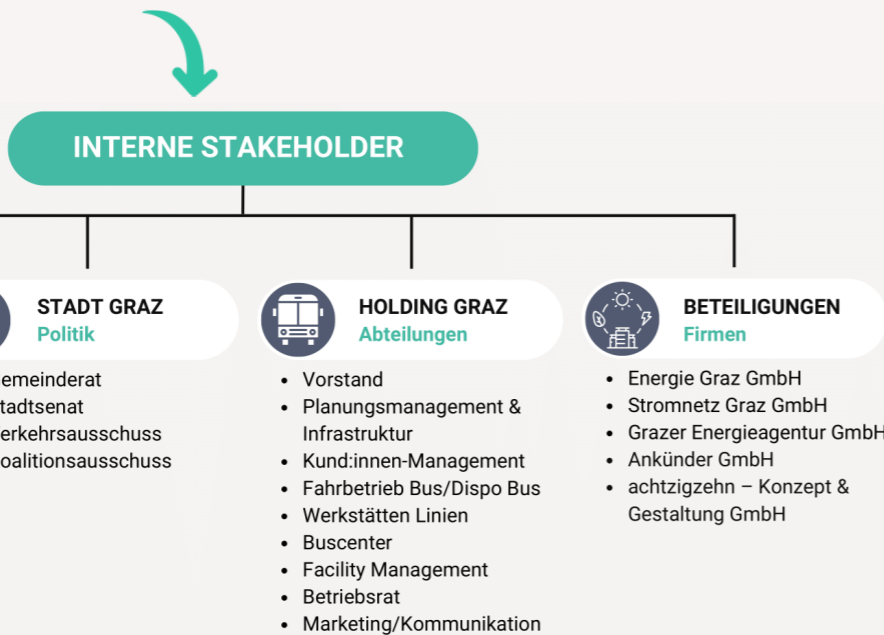
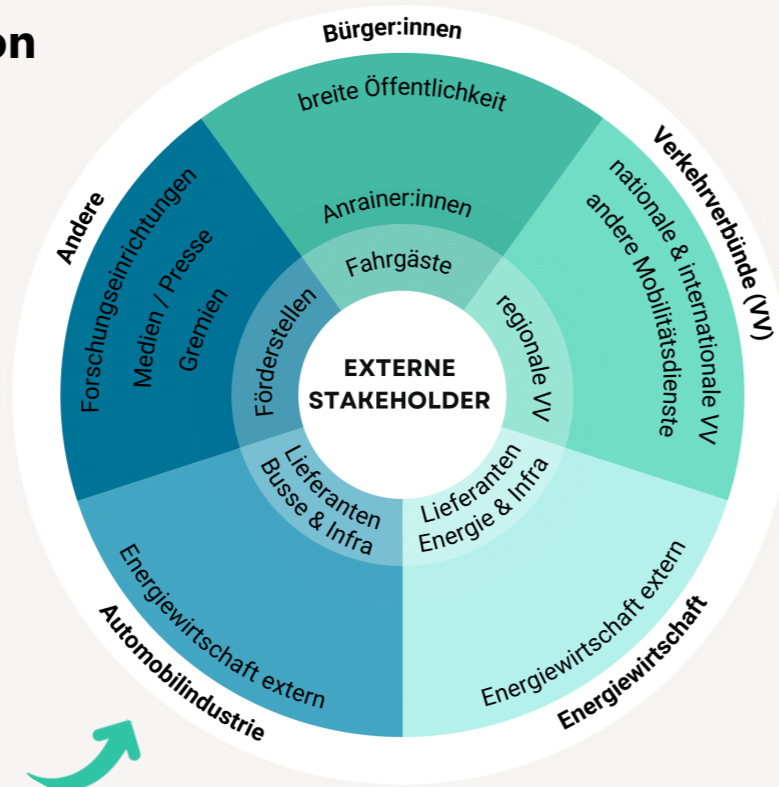


Stakeholder-Definition

Stakeholder sind alle Institutionen oder Personen im Umfeld, die von der Entscheidung zur Dekarbonisierung der Busflotte direkt oder indirekt betroffen sind oder anderweitig in den Prozess eingebunden sind.

Zu bedenkende **externe Stakeholder** sind in der Stakeholder Map rechts abgebildet.

Eine Umstellung der Fahrzeugtechnologie betrifft alle Unternehmensbereiche. Daher ist die Einbindung **interner Stakeholder** unerlässlich für den Projekterfolg. Interne Vorbehalte gegen das Projekt können zu großen Hürden in der Umsetzung führen. Relevante **interne Stakeholder, die in Graz** besonders wichtig für die Umsetzung waren, sind in folgendem Organigramm abgebildet.

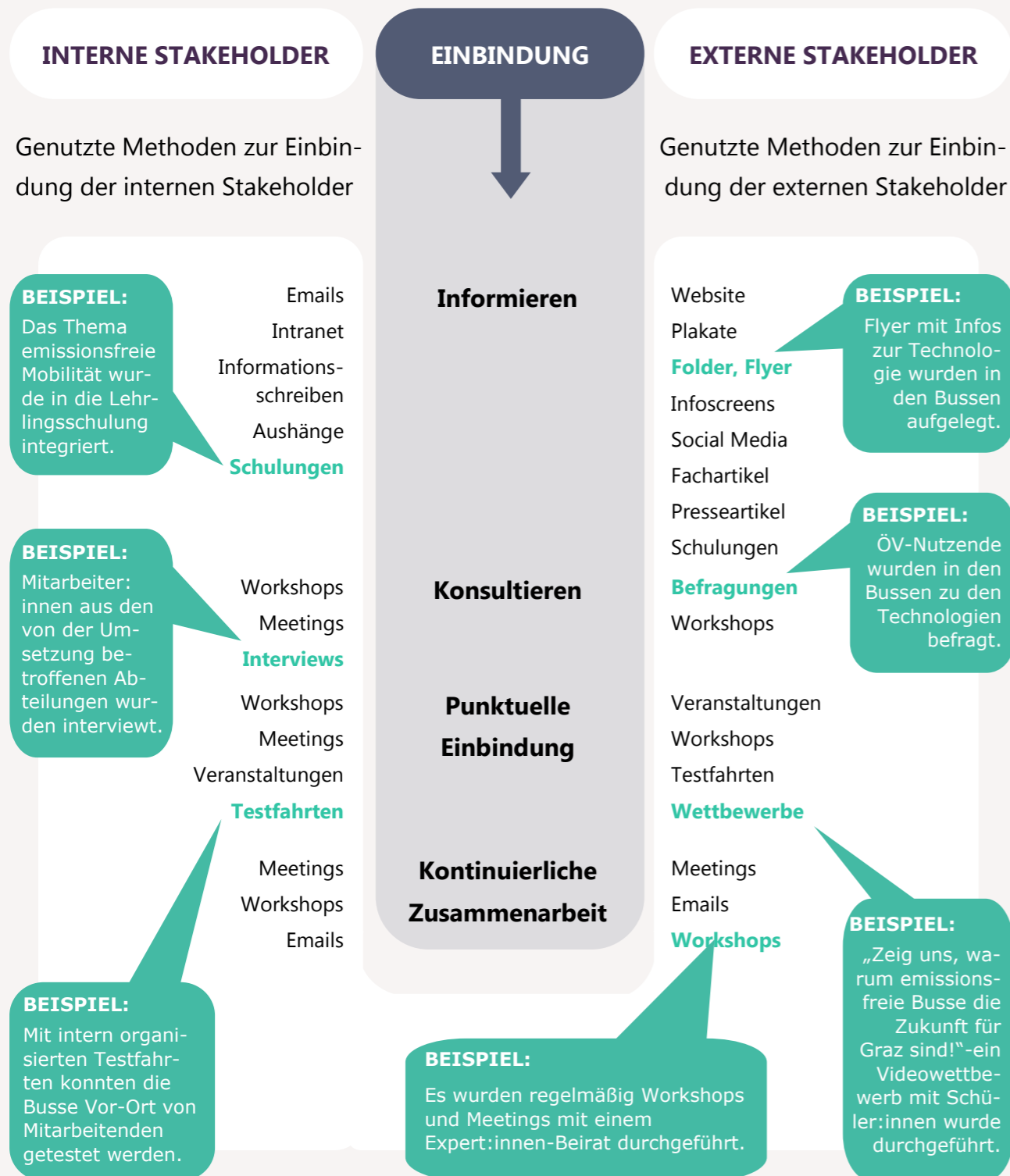


Kommunikation & Bewusstseinsbildung

Stakeholder (SH) können auf verschieden Arten mit unterschiedlichen Methoden eingebunden werden. Wichtig ist es, folgende Punkte zu beachten:

<h3>1) Rolle der Stakeholder</h3> <p>Mögliche Optionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Direkt betroffen – mit Einflussoption • Direkt betroffen – ohne Einflussoption • Indirekt betroffen – mit Einflussoption • Indirekt betroffen – ohne Einflussoption 	<p>Welche Rolle haben einzelne Stakeholder im Umsetzungsprozess?</p>	<h3>2) Verständnis der Stakeholder</h3> <p>Zu bedenken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Einstellung • Berufliche Aufgaben und Ziele • Aufgaben & Ziele der Abteilung/ Institution 	<p>Welche Bedürfnisse, Interessen und Vorstellungen haben die Stakeholder?</p>
<h3>3) Ziel der SH-Einbindung</h3> <p>Mögliche Formen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Informieren • Konsultieren • Punktuelle Einbindung • Kontinuierliche Zusammenarbeit 	<p>Was möchte ich mit der Einbindung der Stakeholder erreichen?</p>	<h3>4) Situationsanalyse</h3> <p>Zu bedenken</p> <ul style="list-style-type: none"> • bisherige Ansprechpersonen & Kommunikationsinstrumente • erzielte Einbindung der Stakeholder 	<p>Wie wurden die Stakeholder bisher adressiert? Was lief gut, was weniger?</p>
<h3>5) Methoden</h3> <p>Zu bedenken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Methoden zur Kommunikation und Bewusstseinsbildung müssen auf die Stakeholder und den jeweiligen Kontext abgestimmt sein. • Mögliche Methoden inklusive Beispiele Graz: siehe nächste Seite 	<p>Welche Methoden ermöglichen die gewünschte Form der Einbindung?</p>	<h3>6) Monitoring & Evaluation</h3> <p>Zu bedenken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erfolgsindikatoren vorab definieren und kontinuierlich überprüfen, um Methoden ggf. anzupassen • Mögliche Indikatoren: Anzahl Teilnehmende, Likes (Social Media), Zugriffe (Website), Verteilte Flyer etc. 	<p>Wie lässt sich der Erfolg der geplanten Maßnahmen bewerten & überprüfen?</p>

Methoden der Stakeholder-Einbindung am Beispiel Graz



Umsetzungsprozesse

Kapitel 03 fokussiert sich auf die Umsetzungsprozesse und behandelt folgende Fragestellungen:

- Welche Fahrzeugtypen gibt es und was sind deren Vor- und Nachteile?
- Wie kann man die optimale emissionsfreie Antriebstechnologie bzw. den optimalen Technologiemix für eine Stadt/Region ermitteln?
- Welche Arten von Lade- und Tankinfrastruktur gibt es? Was sind die Vor- und Nachteile dieser?
- Welche sonstigen Anpassungen am Betriebshof sind notwendig? Was ist hierbei zu berücksichtigen?
- Wie unterscheiden sich die emissionsfreien Busse im laufenden Betrieb? Was ist hierbei zu berücksichtigen?




03

Legende zur Bewertung

- am schlechtesten
- mittel
- am besten

	ÜBERNACHT- / DEPOTLADER (ONC) 	GELEGENHEITS-LADER (OPC) 	OBERLEITUNGS-BUS (O-BUS) 	BRENNSTOFFZELLEN RANGE EXTENDER (FC-REX) 	BRENNSTOFFZELLEN (FC) 
Beschreibung	Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery-electric vehicles—BEV) nutzen die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie (= Strom), um den Motor anzutreiben.			Klassischer E-Bus mit zusätzlichen Wasserstofftanks und einer Brennstoffzelle.	Wasserstoff-Bus, der an Bord gespeichertes H ₂ mittels Brennstoffzelle in Strom umwandelt.
Ladevorgang	<ul style="list-style-type: none"> Ladevorgang ausschließlich im Depot oder Betriebshof an fix installierten Ladesäulen, zumeist über Nacht Teilweise Nachladung zwischen Routen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Ladevorgang entlang der Strecke, z.B. während kurzer Pausen an der Endhaltestelle Ggf. Nachladung im Depot 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierliche Energiezufuhr durch die Oberleitung. Zusätzlicher Generator, Traktionsbatterie oder Brennstoffzelle ermöglicht Überbrückung oberleitungsfreier Streckenteile. 	<ul style="list-style-type: none"> Externer Ladevorgang im Depot oder entlang der Strecke, je nach Modell. Ladung der Wasserstofftanks an entsprechenden H₂-Tanksäulen. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Bus wird über eine Zapfsäule mit komprimiertem H₂ betankt. Zusätzliche Hochvoltbatterie dient als Speicher der gewonnenen Energie aus der Brennstoffzelle sowie der Bremsenergie (Rekuperation)
Serienreife <i>(Serienreife + Verfügbarkeit = Praxistauglichkeit)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Serienreife (TRL9) 	<ul style="list-style-type: none"> Serienreife (TRL9) Kleinserienreife (TRL8) bei Puls ladern 	<ul style="list-style-type: none"> Serienreife (TRL9) 	<ul style="list-style-type: none"> Prototyp (TRL7) 	<ul style="list-style-type: none"> Serienreife (TRL9)
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierlicher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierlicher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hoher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher anfänglicher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher anfänglicher Aufwand
Verbrauch je km (batterieelektrisch) oder je 100 km (Wasserstoff)	<p>●●●</p> <ul style="list-style-type: none"> Solobus: 1,5-2,1 kWh/km Gelenkbus: 1,9-2,7 kWh/km 	<p>●●●</p> <ul style="list-style-type: none"> Solobus: 1,4-2,0 kWh/km Gelenkbus: 1,8-2,6 kWh/km 	<p>keine konkreten Daten vorhanden</p>	<p>●○○</p> <ul style="list-style-type: none"> Solobus: 0,4 kWh/km + 4,8 kg H₂ Gelenkbus: 0,6 kWh/km + 7,2 kg 	<p>●○○</p> <ul style="list-style-type: none"> Solobus: 6 kg H₂ Gelenkbus: 9 kg H₂
Flexibilität <i>(Möglichkeit, Route zu ändern, z.B. bei Umleitungen)</i>	<p>●●●</p> <p>innerhalb d. Reichweite hoch</p>	<p>●●○</p> <p>Abhängigkeit von regelmäßigem Laden an der Strecke</p>	<p>●○○</p> <p>Abhängigkeit von vorhandener Oberleitungsinfrastruktur & Distanz der Umleitung</p>	<p>●●●</p> <p>(innerhalb d. Reichweite hoch)</p>	<p>●●●</p> <p>(innerhalb d. Reichweite hoch)</p>
Fahrzeugmehrbedarf <i>(bei gleicher Einsatzverfügbarkeit)</i>	<p>●○○</p> <p>größerer Mehrbedarf</p>	<p>●●○</p> <p>geringfügiger Mehrbedarf</p>	<p>●●●</p> <p>kein Mehrbedarf</p>	<p>●●●</p> <p>kein Mehrbedarf</p>	<p>●●●</p> <p>kein Mehrbedarf</p>
Lebenszyklus-Emissionen (bei Verwendung von erneuerbarer Energie)	<p>●●○</p> <p>113 t CO₂eq / 10 Jahre</p>	<p>●●●</p> <p>80-85 t CO₂eq / 10 Jahre</p>	<p>keine konkreten Daten vorhanden</p>	<p>●●○</p> <p>96 t CO₂eq / 10 Jahre</p>	<p>●●○</p> <p>89 t CO₂eq / 10 Jahre</p>

 **Lebenszyklusemissionen:** siehe Kap. 5.2

Optimierungsmodell

Im Rahmen des Leitprojekts move2zero wurde ein Optimierungsmodell entwickelt, um die Auswahl der Technologie für die zu beschaffenden Fahrzeuge zu optimieren. Die wesentlichen Überlegungen und Schritte sind wie folgt:

In Graz wurde ein Modell entwickelt, das mithilfe mathematischer Optimierungsmethoden den optimalen Technologie-Mix für das Busnetz bestimmt und die Kosten über einen Zeitraum von 20 Jahren minimiert. Das Modell berücksichtigt die Auswahl und Dimensionierung von Ladestationen am Depot und im Netzwerk, die H2-Infrastruktur, Lade- und Umlaufpläne der Fahrzeuge sowie die Flottengröße.

Die Berechnungen für verschiedene Szenarien zeigen, dass batteriebetriebene Fahrzeuge mit einer Mischung aus Depot- und Gelegenheitsladung die kostengünstigste Lösung sind. Die Flotte würde von 176 auf 198 batteriebetriebene Fahrzeuge umgestellt, wobei zusätzliche Ladestationen benötigt werden.

Zielsetzung der Optimierung: Die Auswahl der Technologie für die zu beschaffenden Fahrzeuge kann unter verschiedenen Gesichtspunkten getroffen werden. Eine zentrale Zielgröße der Optimierung besteht darin, die Gesamtkosten des Systems zu minimieren. Die relevanten Systemkomponenten umfassen Anschaffungs- und Betriebs-Kosten von Infrastruktur, Fahrzeugen sowie Personal- und Energiekosten über den Lebenszyklus der Fahrzeuge hinweg, inkl. dem Ersatz der Fahrzeuge nach der Nutzungsdauer.

Daten-Inputs: Die oben genannten Faktoren und die damit einhergehenden Zahlungsströme wurden in einer Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Cost – LCC) erhoben. Alternativ zur Kostenbetrachtung wurden für ausgewählte Szenarien auch andere Faktoren, wie CO₂-Äquivalente oder kumulierter Energieeinsatz für die Gewichtung herangezogen. Kosten (im Jahresmittel um saisonale Schwankungen auszugleichen), CO₂-Emissionen und Energieverbrauch wurden über den Zeitraum von 2030 bis 2050 analysiert. Dabei wurden Unsicherheiten mittels literaturbasierter Prognosen berücksichtigt.

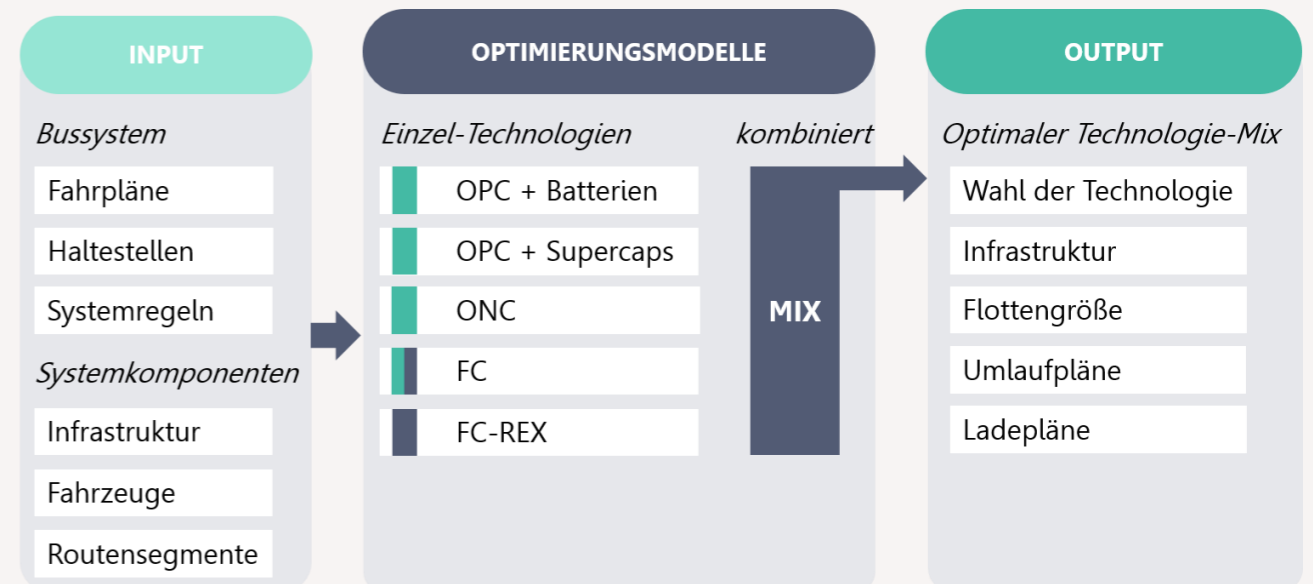
Technologie-Mix: Entgegen der ersten Intuition ist bei der Technologieentscheidung nicht die eine, kostenminimale Technologie zu ermitteln, sondern ggf. ein kostenoptimaler Technologie-Mix. Dies liegt einerseits daran, dass gewisse Strecken nicht für alle Technologien geeignet sein könnten, und andererseits an sprungfixen Kosten. Das heißt, sobald eine gewisse Schwelle an Fahrzeugen oder H₂-Bedarf überschritten wird, entstehen erhebliche Kostensprünge bedingt durch den Bedarf am Ausbau kostenintensiver Infrastrukturelemente.

Modellentwicklung und Optimierung: Basierend auf dem gewünschten Fahrplan wurden Graphenmodelle für jede Technologie entwickelt, die neben den zu erfüllenden Service-Fahrten auch Ladevorgänge und erforderliche Leerfahrten zu Ladepunkten abbilden, um eine den technologischen Anforderungen entsprechende Umlaufplanung durchzuführen. Zentrales Ergebnis der Optimierung ist die benötigte Fahrzeuganzahl je Technologie, die wesentlich durch die Umlaufplanung bestimmt wird.

Berücksichtigung von Unsicherheiten: Eine umfassende Analyse technologischer, ökonomischer und politischer Entwicklungsszenarien wurde durchgeführt, um strategische Unsicherheiten und Entwicklungspfade in die Bestimmung des optimalen Technologie-Mixes einzubeziehen. Operative Unsicherheiten (z.B.: verkehrsbedingter Anstieg im Stromverbrauch) wurden durch die Simulation des Linienbetriebes über ganze Betriebstage hinweg für die verschiedenen Technologien adressiert. Dabei konnten auf Basis vorhandener Daten keine kritischen Stellen identifiziert und die vom Optimierungsmodell berechnete Fahrzeugflotte erfolgreich umgesetzt werden.

Nachfolgende **Abbildung** visualisiert den Ablauf der Optimierungsmodell-Entwicklung sowie der Input-Daten und Ergebnisse.

Ergebnisse Optimierung Graz: siehe Kap. 4.2



Arten von E-Ladeinfrastruktur

Die Ladung der Energiespeicher am Bus kann auf die nachfolgend dargestellten Arten erfolgen. Es gibt keine "beste Lösung" für alle Fälle. Eine nachhaltige und wirtschaftlich durchführbare Auswahl von geeigneten Ladeinfrastrukturen ergibt sich aus den spezifischen betrieblichen Anforderungen der Busverkehre.



Weitere relevante Entscheidungskriterien sind das Assessment des Busnetzes inklusive der Umsetzbarkeit dezentraler Ladeinfrastruktur im Busnetz sowie die Umsetzbarkeit der Energieversorgung. Die nachfolgenden Ladetechnologien sind etabliert und zuverlässig und weisen einen hohen Technology Readiness Level (TRL) auf.

	ZENTRALES LADEN (DEPOTLADUNG / ONC)	DEZENTRALES LADEN (LADEN ENTLANG DER STRECKE, OPC)	KOMBINATION AUS ZENTRALEM & DEZENTRALEM LADEN (ONC/OPC)
	Über-Nacht-Laden Untertags im Depot	Gelegenheitsladung	Über-Nacht-Laden Gelegenheitsladung
Ladevorgang	<ul style="list-style-type: none"> Laden über Nacht direkt im Busdepot bzw. Ladung untertags in Betriebspausen. 	<ul style="list-style-type: none"> Laden an ausgewählten Ladepunkten entlang der Linie bzw. an Endhaltestellen. 	<ul style="list-style-type: none"> Laden während der Fahrt via Oberleitung. Fahrleitungsunabhängige Abschnitte durch Speicher möglich.
Technische Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> Busse: hohe Batteriekapazitäten —> konstante Ladeleistung über viele Stunden hinweg Ladeelemente: Steckersysteme wie CCS-2, Pantographen, andere Ladesysteme (z.B. Induktion) 	<ul style="list-style-type: none"> Busse: niedrigere Batteriekapazitäten; Ladepausen erfordern hohe Leistung Ladeelemente: Steckersysteme wie CCS-2, Pantographen, andere Ladesysteme (z.B. Induktion) 	<ul style="list-style-type: none"> Busse: Kombination aus Stromabnehmersystem & Elektroenergiespeicher, der während der Fahrt auf Abschnitten mit Oberleitung aufgeladen wird. Ladeelement: Oberleitungen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Zentrale Energieversorgung Hohe Einsatzflexibilität der Busse Stromtarife zu Schwachlastzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Unbegrenzte Reichweite bei entsprechender OPC-Ladestruktur Kleinere & leichtere Batterien reduzieren Fahrzeug- und Energiekosten Mehrfachnutzung der Ladepunkte 	<ul style="list-style-type: none"> Reichweite abhängig von Ausstattung mit Oberleitungsabschnitten Batterie steigert Einsatzflexibilität zwischen den Oberleitungsabschnitten Etablierte & zuverlässige Technologie
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Leistungsbedarf am Ort des Depots Herstellbarkeit der zentralen Sekundärenergieversorgung muss gegeben sein Höhere Batteriekapazität, höheres Fahrzeuggewicht = höherer Verbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> Errichtung von Ladestationen im öffentlichen Raum schwerer umsetzbar Höherer (Kosten-)Aufwand durch dezentrale Ladeinfrastruktur-Elemente Fehlende Ladealternativen bei möglichem Ausfall eines Ladepunktes an der Strecke 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Infrastrukturkosten der Errichtung der Fahrdrabt-Infrastruktur Genehmigungsprozesse Infrastruktur Keine Flexibilität in den Oberleitungsabschnitten durch feste Infrastruktur Beeinflussung des Stadtbildes & Akzeptanz der Bevölkerung unklar

Effizienz E-Laden

Für eine möglichst realistische Einschätzung des Energiebedarfs und resultierender Kosten ist eine umfassende Betrachtung nachfolgender Verlustfaktoren nötig:

- **Leitungsverluste:** Vor allem dann, wenn zwischen den Transformatoren und den Ladegeräten große Abstände überwunden werden, treten nicht zu vernachlässigende Leitungsverluste auf.
- **Umwandlungsverluste (ca. 6 bis 10%)^{#11}:** Da für die Ladung eines Batteriebusses Gleichstrom (DC) benötigt wird, muss der vom Netzanschluss stammende Wechselstrom (AC) zunächst auf das erforderliche Spannungsniveau und in Gleichstrom umgewandelt werden. Dies geschieht über zur Ladeinfrastruktur gehörende Transformatoren und Gleichrichter. Bei diesem Umwandlungsvorgang fallen Verluste an.
- **Einspeicherverluste (ca. 3%):** Nach der Umwandlung in Gleichstrom wird der Strom in den Bus bzw. dessen HV-Batterie weitergeleitet. Hierbei fallen Einspeicherverluste bei der Ladung der HV-Batterie an. Nicht vernachlässigt werden sollten Leitungsverluste, insb. dann, wenn große Abstände zw. Transformator und Ladegerät.
- **Mehrverbrauch durch „Balancing“ (inkl. sonstiger Verluste ca. 8 bis 15%):** Um die Batterie zu schonen, werden die Zellblöcke in der Batterie auf einen einheitlichen Ladezustand gebracht. Dieser Vorgang erfordert zusätzlichen Energiebedarf.
- **Vorkonditionierung (ca. 5 bis 8 %):** Einen weiteren Teil des Energiebedarfs stellt die Vorkonditionierung der Busses dar. Aus Komfortgründen für Fahrer:innen und Fahrgäste sowie aus effizienztechnischen Gründen wird das Fahrzeug mit entsprechendem zeitlichen Vorlauf vor Betriebsbeginn geheizt, gekühlt bzw. belüftet. Vorkonditionierung führt u.a. zu längeren Reichweiten, da die notwendige Energie zum ersten Aufheizen oder Abkühlen der Fahrzeuge nicht aus der Batterie, sondern aus dem Stromnetz genommen wird.



In Summe ergibt sich gegenüber den fahrzeugseitig gemessenen Verbräuchen daher ein **25 bis 40% höherer Energiebedarf**.

Lademanagement

Ein intelligentes und effizientes Betriebshofmanagementsystem ist ein zentraler Bestandteil im Betrieb von Batteriebussen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Ladeinfrastruktur effizient genutzt wird und dadurch Netzkapazitäten berücksichtigt werden, erneuerbare Stromverfügbarkeit optimal genutzt werden und Platz eingespart wird.

Folgende Punkte sollten dafür berücksichtigt werden:

- **Intelligentes Lademanagement**
- **Optimiertes Laden**, das eine effiziente Planung und Durchführung der Ladevorgänge erfordert, basierend auf der aktuellen Batteriekapazität und auf dem Einsatzplan und der Verfügbarkeit der Ladestationen.
- **Ladedauer- und Energieverbrauchsprognosen**
- **Last- und Tarifmanagement**, das den Stromverbrauch durch die Verteilung der Ladevorgänge über den Tag, durch die Anpassung der Ladeleistung einzelner Ladepunkte, durch Peak-Shaving und Nutzung von Schwachtarifzeiten optimiert.
- **Betriebshofmanagement** inklusive Instandhaltungsmanagement.
- **Interoperabilität der Ladegeräte** über OCPP.
- Anbindung der Fahrzeuge über die Schnittstelle Value Added Services nach ISO 15118.
- **Vorkonditionierung von Fahrzeuginnenraum** (VDV261) und Zellausgleich des Batteriesystems.
- **Anbindung des Lademanagementsystems** über VDV463 an das Betriebsmanagementsystem
- **Kontinuierliche Überwachung** des gesamten Elektrobus-Management-Systems.
- **Integration einer Batterieanalysefunktion** zur rechtzeitigen Erkennung kritischer Zustände des Batteriesystems zum proaktiven Brandschutz.

Netzanschluss und Energiebereitstellung

Nachfolgend sind die grundlegenden Überlegungen dargestellt, die bei der effizienten Planung und Gestaltung der Ladeinfrastruktur für emissionsfreie Busse zu bedenken sind:

- **Planungseffizienz:** Bei der Versorgung der Ladeinfrastruktur sollten bei der Niederspannungsverteilung lange Distanzen aufgrund höherer Kosten für hohe Kabelquerschnitte vermieden werden. Die benötigten Transformatoren zur Versorgung der Ladestationen aus dem Mittelspannungsnetz sind daher an den Lastschwerpunkten möglichst nah an den Ladepunkten zu positionieren, um die Kabelquerschnitte der Versorgungsleitungen zu optimieren. Eine Dachmontage von Transformatorstationen in Containerbauweise z.B. erfüllt diese Kriterien. Sollte eine Dachmontage aus statischen Gründen oder aus Brandschutz-Gründen nicht möglich sein, ist eine andere Option, jedoch unbedingt in der Nähe der benötigten Last, zu evaluieren.
- **Redundanz:** Um den laufenden Bus-Betrieb sicherzustellen, empfiehlt sich eine redundante Versorgung der Ladestellen mit zwei Transformatoren.
- **Standort:** Sofern es der Planungsspielraum zulässt, ist es vorteilhaft, die Lage des Busdepots strategisch zur Lage der Energieversorgung zu wählen. Durch kurze Distanzen zum nächsten Umspannwerk lassen sich kostenintensive Grabungswege reduzieren.
- **Anschlussleistung:** Abhängig vom Leistungsbedarf für die geplante Ladeinfrastruktur ist die vorhandene Netzinfrastruktur des lokalen Verteilernetzbetreibers zu planen. Der maximale Bedarf an elektrischer Leistung aus dem Stromnetz muss schon zu Beginn der Planungsphase definiert werden, wobei es sinnvoll ist, den Bedarf für späterer Erweiterungsphasen bereits zu berücksichtigen. Der Leistungsbedarf richtet sich nach der Anzahl der emissionsfreien Busse und den geforderten Betriebskilometern. Neben der erforderlichen Ladeleistung für das Laden der Busse sind auch die zusätzliche Leistung für die Konditionierung (Kühlung oder Heizung) und die Versorgung von Nebenanlagen des Busbetriebshofs (Werkstätten, Waschanlagen, Lager, Büros, etc.) zu berücksichtigen und diese Anforderungen beim lokalen Netzbetreiber bekanntzugeben. Die resultierende Gesamtanschlussleistung ist somit von verschiedenen Faktoren abhängig und muss individuell ermittelt werden. Pro 50 Busse ist mit einer Anschlussleistung von etwa 2 bis 3 Megavoltampere (MVA) zu rechnen ^{#12}.

Standortplanung und Errichtung

Innerhalb des Prozesses der Standortplanung und Standorterrichtung ist eine detaillierte Analyse potentieller Standorte hinsichtlich folgender Punkte durchzuführen:

- **Planerische/technische Rahmenbedingungen:**
 - Verfügbarkeit der Fläche
 - Bauliche und technische Eignung
 - Herstellbarkeit der Stromversorgung
 - Städtebauliche Belange
- **Rechtliche Rahmenbedingungen:**
 - Status aus der Flächenplanung
 - Anrainer:innenverfahren
- **Schutznormen**
 - Altstadt
 - Denkmalschutz
 - Naturschutz

Aus Platzgründen wird für die Versorgung, Wartung und Abstellung der emissionsfreien Busse ein zweiter Standort eines Busdepots für die Ladung der Batteriebusse errichtet.

Dieses Areal für Alternativantriebe wurde wie hier beschrieben betrachtet. Aus der bestehenden Netztopologie wäre ein Bezug von 3,5 MW realisierbar. Um den hohen Energiebedarf für den geplanten Endausbau zu erfüllen, wäre eine ca. 1.100 m lange Direkt-Verbindung an ein Umspannwerk nötig, welche im Kosten- und Zeitplan für den Endausbau berücksichtigt wird. Mit dem geplanten 20 kV-Doppelkabel kann eine Anschlussleistung bis zu 15 MW bereitgestellt werden.

In der **Planungsphase** sollte das Layout zudem auf eine leichte Zugänglichkeit und einen einfachen Austausch von Komponenten der E-Ladeinfrastruktur gelegt werden. Weiters sollte eine modulare Erweiterbarkeit der Anlage vorgesehen werden, um für zukünftig steigende Bedarfe gerüstet zu sein.

Für die **Beschaffung der E-Ladeinfrastruktur** ist eine **funktionale Ausschreibung** mit vorangehender Markterkundung und ein möglichst konkretes Lastenheft zielführend. Aktuelle Anbieter von E-Ladeinfrastruktur bieten in Kooperation mit Software-Lösungsprovidern Gesamtlösungen für effizientes Lademanagement an. Eine Verwendung von Standardmodulen ist im Vergleich zu spezifischen Lösungen oftmals kostengünstiger und zeitlich schneller umsetzbar.

Für die **Bewertung der erhaltenen Angebote** sollte ein vorab definierter Bewertungskatalog für die technischen und wirtschaftlichen Kriterien erarbeitet werden. In diesem sollten auch Eco-Design- & Nachhaltigkeitskriterien integriert werden.

Benötigter Wasserstoffbedarf

Zur Auswahl der geeigneten Tankinfrastruktur und der Dimensionierung derselben ist es notwendig, den täglichen Energiebedarf anhand folgender Faktoren zu definieren:

- **Fahrzeugtyp:** FC oder FC-REX
- **Fahrzeuggröße** (Solo-/Gelenkbus)
- **Fahrprofil:** Umläufe und Durchschnittsgeschwindigkeit
- **Umlaufcharakteristika** vorhandener Routen und Topografie
- **Jahreszeit:** Speziell in den Sommermonaten (Kühlung) und Wintermonaten (Heizung) ist der Wasserstoffbedarf höher als im restlichen Jahr. Für die spätere Auslegung der Infrastruktur ist immer der Maximalbedarf an Wasserstoff heranzuziehen.

Der spezifische **Wasserstoffverbrauch** liegt lt. Datenerhebungen bestehender Projekte ^{#8}, dem von NOW erstellen "ebustool", und Realverbräuchen aus dem Projekt move2zero (12m FC-Bus) bei folgenden Werten:

BZ + Range Extender (FC-REX)		BZ Hybrid (FC)	
12 Meter:	18 Meter	12 Meter	18 Meter
ca. 0,06 – 0,1 kg/km	ca. 0,09 – 0,14 kg/km	ca. 0,04 – 0,05 kg/km	ca. 0,08 – 0,09 kg/km
(stark konfigurationsabhängig)			

Bevor der Auswahlprozess für verschiedene Infrastrukturkonzepte beginnt, müssen einige **Rahmenbedingungen bzw. Anforderungen an die Tankinfrastruktur** definiert werden, darunter die öffentliche Zugänglichkeit, die Herstellung von Wasserstoff und Redundanz.

Effizienz H₂-Tanken

Entlang der Wasserstoffversorgungskette treten Effizienzverluste bei der Herstellung (30-45 %), der Verdichtung (4-10 %), dem Transport (je nach Entfernung und Methode 1 bis >30 %) und der Betankung (1-5 %) auf. Die Effizienzverluste hängen mit dem relativ niedrigeren Heizwert von Wasserstoff zusammen (33,33 kWh/kg).

Energiebereitstellung

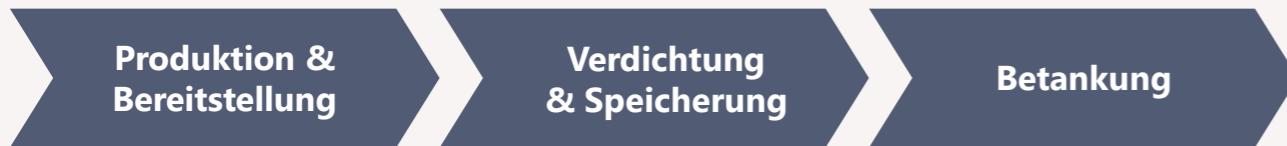
Öffentliche Zugänglichkeit: Gleich zu Beginn sollte überlegt werden ob die Wasserstoff-tankstelle öffentlich zugänglich und für Dritte nutzbar sein sollte. In einigen Fällen ist dies aus organisatorischen bzw. rechtlichen Gründen nicht möglich. Die öffentliche Zugänglichkeit kann jedoch die Nutzung und Akzeptanz der Wasserstoffinfrastruktur erheblich fördern und den Übergang zu nachhaltigeren Mobilitätslösungen unterstützen.

Herstellung von Wasserstoff: Zur Erreichung der Klimaziele sollte v.a. grüner Wasserstoff gemäß den EU-Richtlinien ^{#13} verwendet werden. Details zu den **Bezeichnungen** ^{#14}:

Name	Technologie	Energiequelle
Grüner WS	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyse • Gas-Reformierung • Photolyse • Biosynthese 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% aus erneuerbarem Strom • Biogas, Biomasse • Sonnenlicht • Mikroorganismen
Grauer WS	<ul style="list-style-type: none"> • Gas-Reformierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Fossile Energieträger (Erdgas)
Pinker WS	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Kernenergie
Blauer WS	<ul style="list-style-type: none"> • Gas-Reformierung+CCUS 	<ul style="list-style-type: none"> • Fossile Energieträger, CO₂ weiterverarbeitet
Türkiser WS	<ul style="list-style-type: none"> • Pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Spaltung v. Methan, v.a. Erdgas
Weißer WS	<ul style="list-style-type: none"> • - 	<ul style="list-style-type: none"> • Natürlich vorkommender Wasserstoff
Oranger WS	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse/Strom aus Müllheizkraftwerk

Redundanz: Im Sinne der Betriebs- und Versorgungssicherheit sollte die Speicherkapazität vor Ort ausreichend sein, um den Betrieb bei einem Ausfall der Versorgung für 1 bis 2 volle Tage sicherzustellen. Bei Vor-Ort-Erzeugung ist eine externe Anlieferungsmöglichkeit notwendig, idealerweise mit Verträgen mit mehreren Anbietern/Produktionsstätten, um die Ausfallssicherheit zu erhöhen. Hinweis: gemäß Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) sollen bis 2030 Tankstellen mit einer Kapazität von min. 1.000 kg/d errichtet werden ^{#15}. Bei der Konfiguration von Betankungsanlagen sollte auf eine redundante Ausführung der Verdichterstation bzw. Vorkühlanlage geachtet werden, da ein Ausfall dieser Aggregate die Betankung beeinträchtigen oder unmöglich machen kann.

Prozess der Wasserstoffversorgung



Produktion & Bereitstellung

Versorgung mit Wasserstoff: Die Versorgung mit Wasserstoff kann mittels Vor-Ort-Erzeugung oder durch externe Lieferung (mittels Trailer, Bahn oder Pipeline) erfolgen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind für eine Entscheidung die am jeweiligen Standort möglichen Wasserstoffgestehungskosten der Produktionsanlage mit den Kosten für einen angelieferten Wasserstoff gegenüberzustellen.

Vor-Ort-Erzeugung	Externe Lieferung		
	mit Trailer	per Bahn	Pipeline
<ul style="list-style-type: none"> Erfordert Einhaltung der RED-II & -III-Richtlinien, dadurch schwieriger umzusetzen ab täglichem Bedarf >1 Trailerladung Vor-Ort-Erzeugung sinnvoll bzw. notwendig höhere Versorgungssicherheit ermöglicht Reduktion der (rechtlich limitierten) Vor-Ort Speichermenge 	<ul style="list-style-type: none"> Komplexitätseingrenzung durch den Wegfall der Produktionsanlage und damit einhergehender Einhaltung der RED-II & -III-Richtlinien Trailer: geringere Investkostenanteile —> für kleine Flotten geeignet oder während der Hochlaufphase, bis max. Tagesbedarf von 1 TrILERmenge Bahn: nur in Ausnahmefällen zielführend, z.B. bei direkter Schienenanbindung Pipeline: hohe Versorgungssicherheit bei geringen Investitionskosten 		

Änderungen ab 2030 durch AFIR-Regulierung: Mit der AFIR-Regulierung, wonach ab 2030 in Europa an allen Verkehrsknotenpunkten und mind. alle 200 km eine Wasserstoff-tankstelle mit einer Kapazität von 1000 kg H₂/Tag errichtet werden muss, wird eine Versorgung mit Vor-Ort-Produktion bzw. mittels Pipeline-Anschluss an das Transeuropäische Gasnetz (European Hydrogen Backbone) zunehmend mehr Bedeutung erlangen. In diesem Fall ist der Einsatz eines elektrochemischen Wasserstoffverdichters zu empfehlen, um Verunreinigungen in der Pipeline zu reduzieren.

Verdichtung & Speicherung

Verdichtertechnologien

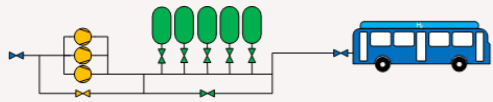
Die weit verbreitete Verdichtung mit **mechanischer Kolbenkompressoren (MC)** ist aktuell vor allem für große Massenströme und ab Verdichtungseingangsdrücken von 50-100 bar geeignet, weißt aber einige Nachteile in Bezug auf Lärm, Verschleiß und Zuverlässigkeit auf. Dagegen ist die **elektrochemische Kompression (EHC)** aktuell noch in Entwicklung, besitzt aber das Potential einer geräuscharmen und effizienten Verdichtung mit gleichzeitiger Aufreinigung des Wasserstoffs.

	Elektrochemische Kompression	Mechanische Kompression
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Geräusch- und vibrationsfreier Betrieb durch fehlende bewegliche Komponenten, ermöglicht Wasserstofftankstellen in bevölkerungsreichen städtischen Gebieten Reinigung von Gasgemischen möglich und kein Risiko von Verunreinigungen im Produktgas hohe Wirkungsgrade und weniger Stufen für niedrige Eingangsdrücke (< 3 kWh/kg von 1 bis 100 bar), bis zu 1000 bar in 1 Stufe möglich 	<ul style="list-style-type: none"> seit Jahren gängige Technologie für die Gasverdichtung (TRL 8-9) und eine große Anzahl etablierter Hersteller auf dem Markt hohe Durchsätze (> 100-200 kg/h) bei entsprechenden Eingangsdrücken (> 50-100 bar), geeignet für Booster-Verdichtung hohe Wirkungsgrade bei höheren Eingangsdrücken (ca. 2,7 kWh/kg von 50-1000 bar erreichbar)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> TRL für Systeme im industriellen Maßstab sehr niedrig (5-7), Kosten hoch und aktuell keine Systeme für hohe Durchflüsse am Markt empfindlich für kritische Verunreinigungen (CO, CO₂, H₂S, HCl) Aktuell noch niedrige Wirkungsgrade (> 6 kWh/kg) in ungeeigneten Betriebsbereichen (niedrige Befeuchtung, hohe Stromdichte). 	<ul style="list-style-type: none"> maximale Druckverhältnisse von ca. 8:1 innerhalb einer Stufe. Daher mehrere Stufen bei niedrigen Eingangs- für hohe Ausgangsdrücke starke Lärmemissionen, hohe Komplexität, hoher Wartungsaufwand durch Verschleiß beweglicher Teile mögliche Verunreinigungen aufgrund von Schmiermitteln (Öl) für bewegliche Teile

Betankung

Die Betankungskonzepte für gasförmigen Wasserstoff umfassen die Betankung durch:

Überströmen aus Hochdruck-speicherflaschen



- es ist bis zu 2-fache Bedarfsmenge vorzuhalten, um Busse vollständig betanken zu können
- Verdichterleistungen geringer als bei Booster-Betankung

Direktverdichtung von Wasserstoff in den Fahrzeugtanks >> „Booster“



- hohe Verdichterleistung (120 kg/h für 20 kg in 10 min) für Betankung mit geringem Vordruck erforderlich
- als Hybrid-Konzept in Kombination mit Überstrom-Tanken vorgesehen —> 100%iges Booster-Konzept v.a. für Großflotten und bei geringem Restdruck in Speichern angewendet

Zwischen den zwei **Betankungskonzepten** gibt es noch **Mischformen (Hybrid)**, die je nach Speicherstand vor Ort angewendet werden können. Für eine Überströmbetankung muss eine größere Menge Wasserstoff vor Ort gespeichert werden, weshalb hier im Bezug auf rechtliche Einschränkungen (SEVESO), die maximale Busanzahl beschränkt ist. Beim Booster-Konzept werden dagegen leistungsstärkere Verdichter benötigt.

Aktuell gibt es zwei gängige **Tankdrücke** für Busse: 350 und 700 bar. Die Wahl des Drucks hängt stark von der gewünschten Reichweite des Fahrzeugs ab. Im Stadtverkehr reicht oft ein Druck von 350 bar aus, da übliche Speichermengen von 38-40 kg für eine Reichweite von >450km ausreichen. 700-bar-Infrastruktur ist teurer und erfordert mehr Aufwand für die Verdichtung; sie lohnt sich nur für lange Strecken ohne Tankmöglichkeit.

Zusammenfassend lässt sich die geeignete **Betankungsinfrastruktur-Konfiguration** je nach geplanter Wasserstoffbetankungsmenge wie folgt darstellen: Zu Beginn eignet sich eine externe Anlieferung mit Überströmbetankung. Für sehr große Mengen sind vor Ort Erzeugung, Pipeline-Versorgung und Booster-Betankungskonzepte zielführender. Eine Anlieferung per Schiene oder Flüssigwasserstoff ist derzeit auf Ausnahmefälle beschränkt.

Standortplanung und Errichtung

Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Errichtung einer Wasserstoffanlage sind europäische und regionale Gesetzgebungen zu beachten, wie z.B. die Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED-II / RED-III) oder die SEVESO-Richtlinie (Richtlinie 2012/18/EU) zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen. Wasserstoff darf entsprechend dieser Richtlinien unter Einhaltung der gesetzlichen Sicherheitsabstände uneingeschränkt bis zu einer Lagermenge von 5.000 kg an einem Standort gespeichert werden. Eine Überschreitung erfordert zusätzliche Sicherheitsanforderungen und eine erhöhte Öffentlichkeitsarbeit. Das Raumordnungsgesetz legt fest, welche Flächen grundsätzlich für die Errichtung von SEVESO-Betrieben möglich sind, was lokal zu Einschränkungen der H₂-Speichermenge führen kann.

Beschaffungsprozess

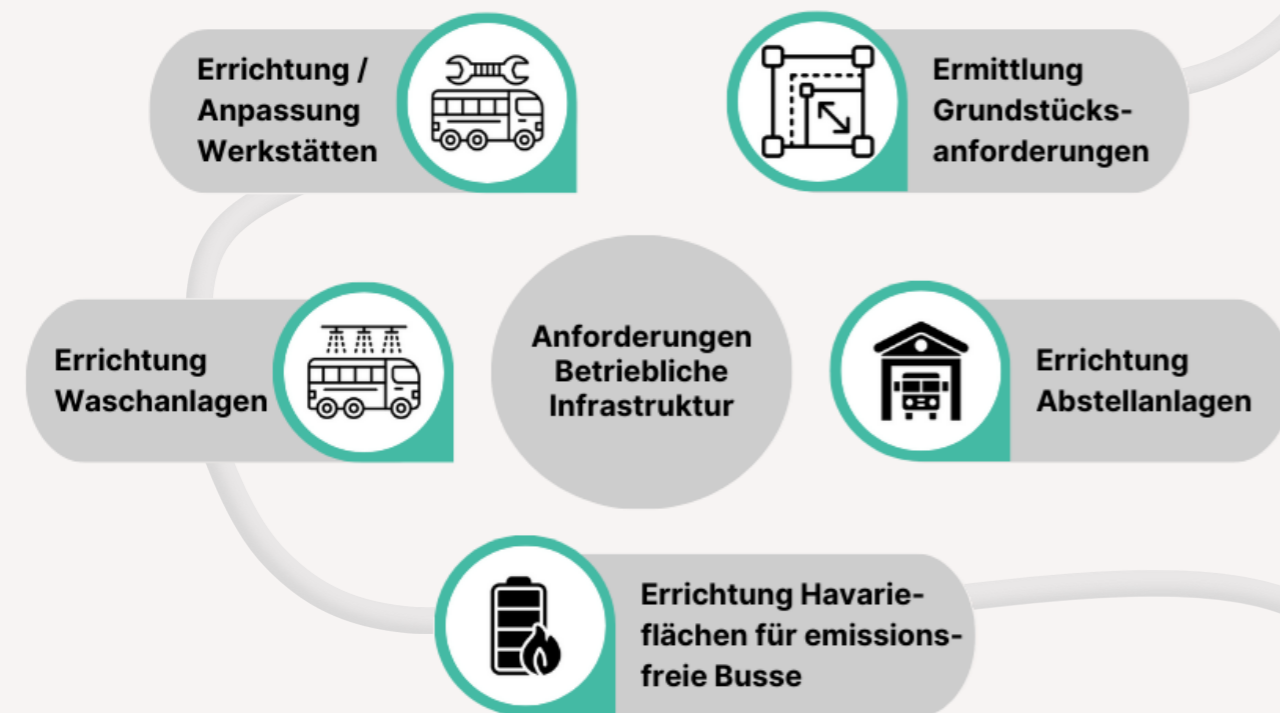
Für die Beschaffung der H₂-Tankinfrastruktur ist eine funktionale Ausschreibung mit vorangehender Markterkundung und einem klaren Lastenheft zielführend. Aktuelle Anbieter bieten oft Gesamtlösungen basierend auf Standardmodulen an, was kostengünstiger und schneller umsetzbar ist als kundenspezifische Lösungen. Zur Bewertung der Angebote sollten vorab definierte Kriterien für technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte erarbeitet werden. Die Planungsphase sollte ein leicht zugängliches Layout für Anlagenteile und modulare Erweiterbarkeit berücksichtigen, um zukünftige Bedarfe zu decken.

Erfahrungen & Empfehlungen

- Frühzeitiges Festlegen von Randbedingungen für eine funktionale Ausschreibung
- Enge Zusammenarbeit zwischen Unterlagenersteller:innen und Auftraggeber:innen
- Austausch mit Referenzprojekten aus Betriebs-, Planungs- und Genehmigungssicht
- Begleitung der Ausschreibungsunterlagen durch erfahrene Expert:innen aus technischer und rechtlicher Sicht
- Regelmäßige Gespräche mit der Behörde, um Skepsis gegenüber neuen Technologien zu verringern.

Umsetzung | BETRIEBLICHE INFRASTRUKTUR

Der Betriebshof für emissionsfreie Busse unterscheidet sich von dem für Dieselsebusse in einigen Punkten. Neben der notwendigen Lade- und Tankinfrastruktur sind weitere Anpassungen der betrieblichen Infrastruktur notwendig. Nachfolgende Grafik gibt einen Überblick über die betriebliche Infrastruktur, die zu bedenken ist.



Außerdem ist Folgendes zu berücksichtigen:

Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen: Die Verwendung von nachhaltigen Baustoffen ist nur ein einzelner Aspekt des nachhaltigen Bauens. Nachhaltig ist eine Konstruktion auch dann, wenn sie mittels kleiner Veränderungen an neue Anforderungen angepasst werden kann und dadurch länger nutzbar bleibt.

Reserven einplanen: Sämtliche Abmessungen entlang der (Um)Planung als auch die statischen Dimensionierungen sollten über Reserven verfügen, damit Änderungen keine größeren, strukturellen Umbauten erfordern und steigende Lastanforderungen auch zukünftig bedient werden können.

Ermittlung der Grundstücksanforderungen

Für die Umrüstung bzw. die Neuschaffung eines Grundstücks für den Betriebshof der emissionsfreien Busse sind u.a. die nachfolgenden Punkte zu berücksichtigen. Der laufende Betrieb sollte trotz Umbauarbeiten sichergestellt werden, falls nicht ohnehin ein zweiter Standort bzw. eine Standorterweiterung vorgesehen ist.

Grundstücksflächenbedarf für den Busbetrieb in Graz:

- Benchmark des VDV: ca. 46.000 m² (rechteckiges Grundstück).
- Bestand + neues Grundstück: 36.800 m² + 22.000 m².

Neues Grundstück - zusätzlicher Standort

Da der aktuelle Betriebshof bereits an den Kapazitätsgrenzen angelangt ist und die neue emissionsfreie Busflotte größer ist und zusätzlich mehr Platz für die notwendige Infrastruktur benötigt wird, wurde ein zusätzlicher Standort in der Hedwig-Katschinka-Straße angekauft.

- Zielwerte neues Grundstück: überdachte Abstellfläche für rund 80 Busse + Werkstatt mit zwei Arbeitsständen

- **Ausreichende Dimensionierung des Grundstücks**, sodass der (Mehr-)Bedarf an emissionsfreien Bussen langfristig gedeckt werden kann. Der Standort sollte weitgehend systemunabhängig dimensioniert werden, sodass Technologieinnovationen zu späteren Zeitpunkten wahrgenommen und Systementscheidungen angepasst werden können. Daher sind ausreichend Ausbaureserven vorzusehen.
- **Ausreichende Dimensionierung des netzseitigen Anschlusses** und dementsprechende Grundstücksauswahl
- **Einhaltung von Bauvorschriften:**
 - VDV Schrift 822- Formel als Benchmark (Qualität des Grundstückszuschnitts)
 - Baurechtliche Anforderungen beachten (z.B. Anteil von Grünflächen, Maß der Bebauung). Diese sind in der VDV- Formel nicht enthalten.
 - Sonstige Bauvorschriften von örtlichen Behörden
- **Einbezug der Anrainer:innen**

Errichtung von Abstellanlagen

Für die Abstellung der emissionsfreien Busse werden üblicherweise Carports errichtet. Diese wirken einerseits Schallreduzierend, was insbesondere in den Nachtstunden wichtig sein kann, und sind andererseits für hybride Nutzungen kompatibel. Folgende Punkte müssen in der Errichtung berücksichtigt bzw. ausgearbeitet werden:

- Geeignetes Lade- bzw. Tankkonzept evtl. im Carport
- Nachrüstbarkeit/ Umrüsfähigkeit beachten
- Nutzung der Dachfläche: Grünkonzept, PV- Anlagen, Verkehrsflächen für PKW
- Städtebauliche Aspekte berücksichtigen
- Falls Carports bereits vorhanden: ggf. bauliche Anpassungen wie z.B. höhere Tore

Errichtung von Havarieflächen für emissionsfreie Busse

Eine Havariefläche dient als Abstellfläche für (potenziell) beschädigte Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. Im Falle eines verzögerten Ausbrechens eines Brandes wird ein Übergreifen der Flammen auf benachbarte Fahrzeuge oder Gebäudeteile verhindert. Bei der Auswahl und Errichtung dieser Flächen ist Folgendes zu bedenken ^{#16}:

- Größe ausgelegt auf längste Gefäßgröße (Gelenkbus) + zumindest 0,5 Meter
- Versiegelter Untergrund aus einer nicht brennbaren Oberfläche
- Kennzeichnung der Fläche mit Gefahrenhinweisen
- Mind. 5 Meter Sicherheitsabstand empfohlen (abhängig von der Landesbauordnung)
- Fläche kann im Normalbetrieb als Abstellfläche genutzt werden
- Brandschutzmaßnahmen treffen bzw. vorbereiten (z.B. Hydrant in der Nähe)

Errichtung der Waschanlagen

Vor der Nutzung der betriebseigenen Waschanlage ist die Eignung für Busse mit elektrischen Antrieben zu klären.

Anpassung / Neuerrichtung der Werkstattanlagen

Folgende Ansprüche an Neuerungen bzw. an den Neubau der Werkstatt für emissionsfreie Busse:

- **Anpassung der Arbeitsstände:** Gem. der VDV- Schrift 822 wird aktuell ein Achsabstand der Fahrzeugarbeitsstände von 6 m empfohlen. Nebeneinander liegende Werkstattarbeitsstände für Hochvoltarbeiten oder Dacharbeitsbühnen erfordern jedoch ein Achsmaß der Arbeitsstände von mind. 7 m, besser 8 m.
- **Integration eines Dacharbeitsplatzes:** Dies ist notwendig, da sich die Arbeiten von unter dem Fahrzeug auf das Fahrzeugdach verlagern.
- **Geschosshöhe:** Für die Dacharbeitsbühnen einschließlich Kranbahn wird eine lichte Geschosshöhe von 6,5 m benötigt. Nachhaltig ist eine lichte Geschosshöhe von mind. 7 m. Auch die Höhe der Tore muss ggf. angepasst werden.
- **Errichtung spezieller Arbeitsplätze:** Optional kann ein Arbeitsplatz für Arbeiten unter Spannung (AuS) und ein Lagerbehälter für Batteriemodule bereitgestellt werden.

Darüber hinaus müssen u.a. folgende Elemente in der Ausstattung der Werkstatt mitberücksichtigt werden (diese Werkzeuge müssen für die elektrischen Arbeiten am Fahrzeug zugelassen sein) ^{#17}:

- Isolierte HV-Werkzeuge zum Arbeiten unter Spannung
- Prüf- und Diagnosewerkzeuge
- Messgerät zur Isolationsmessung und Potenzialausgleichsmessung
- Transporthilfen für schwere Komponenten
- Absperrungen für Arbeits- und Gefahrenbereiche
- Benötigte Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter:Innen, z.B. Hochvoltschulungen, Fahrzeug-spezifische Ausbildungen etc.

Umlaufplanung (UP)

Die UP soll die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des öffentlichen Verkehrs maximieren und dessen Umweltauswirkungen minimieren, wobei folgende Faktoren eine Rolle spielen:

- **Reichweite:** Sie ist abhängig von der verfügbaren Batteriekapazität und dem Energieverbrauch je Kilometer. Dieser wird von Faktoren wie der Fahrweise, der Topographie oder der Umgebungstemperatur (& resultierender Kühl-/Heizbedarf) beeinflusst. Da batterieelektrische Busse eine begrenzte Reichweite haben, müssen Umläufe - ggf. saisonal - im Betrieb angepasst und Ladestrategien entwickelt werden.
- **Ladeinfrastruktur:** Hier muss sichergestellt werden, dass die Busse bei der Ausfahrt einen ausreichend hohen Ladezustand aufweisen, um die vorgesehenen Tagesreichweiten abdecken zu können. Die Anzahl der Ladestationen und die Anforderungen der Disposition innerhalb des Betriebshofes hängen von der Betriebshoforganisation ab. Dadurch kann sich die Anzahl der benötigten Ladestationen im Betriebshof bei effizienter, evtl. teilweise automatisierter Disposition stark reduzieren. Üblicherweise wird dabei eine Ladestation pro Fahrzeug inkl. Reservationen (Ausfall) geplant.
- **Flexibler Linieneinsatz:** Dazu müssen folgende Parameter analysiert werden:
 - SoC bei Ankunft am Betriebshof
 - Benötigter SoC für geplanten Einsatz inkl. Heizungs- und Klimatisierungsbedarf

Instandhaltung & Reparatur

Für sämtliche Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten an den emissionsfreien Bussen sind Betriebsanweisungen zu aktualisieren bzw. zu erstellen.

Bei der Fehlererkennung und -behebung emissionsfreier Busse spielen moderne Diagnosesysteme eine wichtige Rolle. Daher müssen zum Fahrzeug passende Diagnosesysteme angeschafft werden. Typische Wartungen mechanischer Dieselbus-Teile wie der Motorölwechsel entfallen, wobei im Gegenzug mehr elektrische Komponenten zu warten sind. Insgesamt erfordert die Wartung und Reparatur von Elektro- bzw. Wasserstoffbussen ein ganzheitliches Verständnis der spezifischen Technologien und deren Komponenten.

Notfallkonzepte und Brandschutz

In Bezug auf Notfallpläne sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- **Notfallkonzepte:** Detaillierte Notfallpläne, die klare Handlungsanweisungen für verschiedene Notfallsituationen enthalten, sind wesentlich. Verantwortlichkeiten, Handlungen und Kommunikationswege müssen festgelegt werden, um eine schnelle Reaktion und Koordination zu ermöglichen. Um geeignete Schutzkonzepte erstellen zu können, sollten die nötigen Unterlagen bereits bei Bestellung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch die jeweiligen Hersteller bereitgestellt werden.

Zur Erstellung können u.a. folgende Informationen genutzt werden:

- Sicherheitsdatenblätter / Vorgaben zum Umgang mit Energiespeichern
- Hebe- und Bergekonzept nach Herstellervorgaben
- Vorgehen bei Unfällen mit Deformationen im Bereich der HV-Komponenten
- Notabschaltung durch Bediener
- Sicherstellen und Prüfen der Spannungsfreiheit des Fahrzeugs
- Bergeplan für Abschleppunternehmen und Absicherung im öffentlichen Raum
- Anforderungen an den Havariestellplatz

Darüber hinaus ist es sinnvoll, bei der Anschaffung der batterieelektrischen Busse örtliche Rettungskräfte (Feuerwehr, Polizei und Abschleppunternehmen) zu informieren, um proaktiv auf mögliche Fragen eingehen zu können.

- **Brandschutz:** Brandschutz ist entscheidend bei der Einführung von emissionsfreien Bussen, da Brände in Busdepots erhebliche Löschaufwände erfordern. Bestehende Löschanlagen sind oft ineffektiv, und die engen Zwischenräume der abgestellten Fahrzeuge erschweren den Zugang zum Brandherd. Busse mit Lithium-Ionen-Batterien setzen mehr Energie frei und erzeugen dichten Rauch, was die Löscharbeiten der Feuerwehr erschwert, da toxische und leicht entflammbare Stoffe freigesetzt werden können. Daher ist die frühzeitige Einbindung von Feuerwehr, Polizei und Versicherungen unerlässlich. Ein Brandschutzsachverständiger sollte anhand örtlicher Gegebenheiten eine Brandrisikoanalyse durchführen und entsprechende Maßnahmen auf Basis der vorhandenen Sicherheitsinfrastruktur (z.B. Havarieplatz) ableiten.

Personalschulung

Ein sicherer und ordnungsgemäßer Betrieb der neuen Technologien ist die Basis für die Umstellung der Busflotte. **Folgendes Personal** ist umfassend zu schulen:

Werkstätten-Personal

Die in Hybrid-, Elektro-, Brennstoffzellenfahrzeugen und eingesetzten elektrischen Systeme arbeiten mit potenziell lebensgefährlichen Spannungen. Die OVE-Richtlinie R19: 2021-06-01 ist Mindestanforderung.

Fahrpersonal

Auch wenn sich die Handhabung emissionsfreier Busse im Betrieb nur unwesentlich von Dieseln unterscheidet, ist eine Schulung des Fahrpersonals notwendig um u.a. einen effizienten Betrieb zu gewährleisten und im Notfall bei Unfällen richtig zu reagieren.

Betriebsmanagement

Die Mitarbeiter:innen müssen geschult werden, um den Betrieb und die Planung der Flotte unter Berücksichtigung der Anforderungen neuer Technologien (z.B. Reichweite, Ladebedarf) effizient zu organisieren.

BSP GRAZ - INHALTE SCHULUNGEN:

- Vorteile & Umweltrelevanz neuer Technologien
- Bus-Ladung (funktionale Einweisung)
- Energiesparendes Fahren

Das ist bei der Schulungsplanung zu bedenken:

- ✓ **Schulungen frühzeitig in Planung integrieren:** Schulungen sollten bereits zu Beginn der Flottenumstellung in die Ressourcenplanung aufgenommen werden.
- ✓ **Busse für Schulungen zurückhalten:** Optimal wäre es, je einen Bus der zu schulenden Technologie vor Ort (in der Werkstätte) zu haben, um die Schulungen effizient und einfach durchführen zu können. Dies ist in der Ressourcenplanung zu bedenken.
- ✓ **Fahr- und Werkstattpersonal frühzeitig einbinden:** Dies ist vor allem während (technischer/organisatorischer) Probleme wichtig, um Vorbehalten vorzubeugen, Akzeptanz zu erhalten und vorhandene Erfahrungen aller zu nutzen.

Anforderungen an ein intelligentes Monitoringsystem

Durch ein gezieltes und intelligentes Monitoring können ein effizienter und zuverlässiger Busbetrieb sowie wesentliche Einsparungen in folgenden Bereichen erzielt werden:

- **Betriebsoptimierung:** z.B. durch zielgerichtete Anpassung der Umlaufplanung, Betriebshof-, Lade- und Lastmanagement, effektive Ausnutzung von Fahrzeugreichweiten, optimale Planung von Ladephasen, bewusste Wahl von Sicherheitspuffern etc.
- **Wartungsoptimierung:** effiziente Fehlersuche durch Verknüpfung von Fahrzeug-, Ladeinfrastruktur- und Betriebsdaten, rasche Sichtbarkeit von Abweichungen im Fahrzeugeinsatz und Ladeverhalten, übersichtliche Fehlerberichte.
- **Sicherheitsoptimierung:** laufende Aufzeichnung der Belastung und des Verhaltens von Batterien, Beobachtung der Batteriealterung und Anpassung der Belastung, frühzeitiges Erkennen und Beheben von Sicherheitsrisiken.

Die **Einführung eines geeigneten Monitoring-Systems** erfordert eine umfangreiche Planung und frühzeitige Definition notwendiger Parameter. Festgelegt werden müssen die gewünschten Daten, die Übertragungsschnittstelle sowie die Form der Datenübermittlung. Für die Schnittstellendefinition ist zu empfehlen, die Anforderungen mit bereits existierenden Systemen abzugleichen. Die Anforderungen an das Monitoring System sollten in den Ausschreibungsunterlagen für Busse und Infrastruktur aufgenommen werden.

Für die **Installation und Erprobung** der Systeme zur Datenerfassung und -Aufzeichnung ist die Reservierung von genügend Zeit erforderlich. Es empfiehlt sich, eine Testphase von mehreren Wochen für die Aufzeichnung und Auswertung der Daten zu planen, um die Funktionalität des Systems sicherzustellen und etwaige Anpassungen mit dem Hersteller frühzeitig zu klären. **Beispiele für Datenaufzeichnungen:**

- Gefahrene **Distanzen** pro Tag
- **Lade- bzw. Tankzeiten** für E- bzw. H₂-Busse
- **Verbräuche** pro Tag oder pro definierten Zeiträumen
- **Energieverbräuche** von Nebenverbrauchern, z.B. Heizung / Klimatisierung
- **Auslastung der Fahrzeuge** bzw. Fahrgastzahl für einzelne Fahrten / durchschnittlich
- Gefahrene **Kilometer zwischen Störungen** („distance between failure“)

Monitoring am Beispiel Graz

Der Demonstrationsbetrieb im Rahmen des Forschungsprojektes move2zero wurde aufgrund von Budgetengpässen mit nur einem geleasteten und einem in einem anderen Projekt bereitgestellten Bus durchgeführt. Daher wurde keine Ausschreibung durchgeführt und infolgedessen konnten keine Anforderungen an Datenübermittlung gestellt werden. Daraus folgte, dass auch herstellerunabhängige Kommunikationstools wie Open Charge Point aufgrund fehlender Systemschnittstellen bzw. fehlender Rechtsgrundlagen nicht eingebaut werden konnten. Die Datenaufzeichnung erfolgte daher teilweise durch GPS-Daten, Lade- und Tankdaten sowie durch händische Aufzeichnungen der Fahrer:innen.

BEISPIEL GRAZ—ERFAHRUNGEN ZUM MONITORING:

Im Rahmen des Forschungsprojektes move2zero konnten folgende Erfahrungen in Bezug auf wichtige Aspekte die Datenerfassung und –Auswertung gesammelt werden:

- ✓ **Anforderungen & Abstimmungen:** Genaue Definition der erforderlichen Daten, der Anforderungen an die Datenschnittstelle, der Art der Datenübertragung etc. in der Ausschreibung bzw. frühzeitige direkte Abstimmung mit dem Hersteller.
- ✓ **Frühzeitiges Evaluieren und Auswerten** der ersten Datensets, um ggf. Anpassungen der übermittelten Daten bzw. der Art der Datenübermittlung treffen zu können.
- ✓ **Vorbereitende Maßnahmen:** Vorgelagerte Durchführung von Leerfahrten auf den geplanten Linien, um die Funktion des Systems sicherzustellen und die ausgewerteten Daten zu plausibilisieren und verifizieren.
- ✓ **Langzeitbeobachtung:** Einsatz der Busse für zumindest einen Monat auf derselben Linie, um eine repräsentative Aussage treffen zu können. Langfristig und für sämtliche Optimierungsüberlegungen sollten Daten zumindest über ein Jahr (unterschiedliche klimatische Bedingungen) erhoben und ausgewertet werden.
- ✓ **Zusätzliche Datenerhebung:** z.B. Aufzeichnung des Tagestemperaturverlaufes (innen & außen) für die Interpretation der Energieverbrauchsdaten sowie Erhebung des Besetzungsgrades, da dieser relevante Informationen zur Interpretation der Verbrauchsdaten liefert.

Projektplanung & Ressourcen

Kapitel 04 gibt einen Überblick über die organisatorischen Überlegungen des Dekarbonisierungs-Prozesses und enthält neben Informationen zu relevanten Prozessschritten eine Wirtschaftlichkeitsrechnung sowie eine Übersicht über nationale und internationale Fördermöglichkeiten. Folgende Fragen werden im Detail behandelt:

- Welche Prozessschritte sind in der Dekarbonisierung die wesentlichen und wie viel Zeit nehmen diese in Anspruch?
- Mit welchen Kosten ist für die unterschiedlichen Technologien zu rechnen und wie ist der wirtschaftliche Vergleich über die Laufzeit?
- Welche (inter-)nationalen Fördermöglichkeiten gibt es aktuell?



04

Projektplanung | ANSCHAFFUNGSPROZESS

Die Darstellung zeigt einen möglichen **Prozessablauf in Monaten**, der auf Erfahrungen aus Graz basiert, aber aufgrund verschiedener Umstände nicht exakt so umgesetzt wurde.

Anschaffung Infrastruktur (Betriebliche- Lade- und Tankinfrastruktur)				
	Prozessschritt	Monate	Unsicherheit	Entscheidung
A1	Grundstücksevaluierung <i>Optional: zusätzlicher Grundstückserwerb</i>	5	/	➤ E1: Grundstückswahl
A2	Lastenhefterstellung/Bedarfsplanung <i>Optional: Architekturwettbewerb (AW)</i>	5	/	➤ E2: Auftrag Planer & Architekt
A3	Vorentwurfs-, Entwurfs- & Einreichplanung	9	Zeit	
A4	Detailplanung Infrastruktur	6		
A5	Einholen behördlicher Bescheide	9	Zeit	
A6	Öffentliche Ausschreibung Infrastruktur	7	Zeit + Kosten	➤ E3: Auftrag für Errichtung
A7	Errichtung Betriebl./Lade-/Tankinfrastruktur	12	Kosten	

Anschaffung batterieelektrische & Brennstoffzellen-Busse				
	Prozessschritt	Monate	Unsicherheit	Entscheidung
B1 C1	Markterkundung	4	/	
B2 C2	Wirtschaftlichkeitsberechnung/ Technologieauswahl	6	/	➤ E4: Wahl Technologie-Mix
B3 C3	Lastenhefterstellung	4	/	
B4 C4	Öffentliche Ausschreibung	6	/	➤ E5: Bestellung Busse
B5	Lieferung Batteriebusse	15	Zeit	
C5	Lieferung Brennstoffzellenbusse	17	Zeit	



Projektplanung | WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG

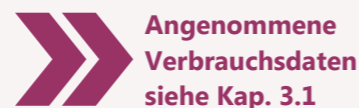
Die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert auf sämtlichen Annahmen, welche im Rahmen der Erstellung des Optimierungsmodells getroffen wurden. Einige wesentliche Annahmen und Inputdaten sind auf den nächsten beiden Seiten dargestellt.

ZENTRALE ANNAHMEN	Solobusse	Gelenkbusse
Nutzungsdauer Fahrzeuge	10 Jahre	
Nutzungsdauer ONC-Fahrzeuge inkl. Batterie	8 Jahre	
Lebensdauer Brennstoffzelle	3 Jahre	
Batteriekapazität ONC	500 kWh	650 kWh

Infrastruktur	
Art Ladestation im Depot	CCS + Pantograph
Art Ladestation entlang der Strecke	Pantograph
Bezug von emissionsfreien Strom (Umweltzeichen)	
Herstellung von grünem Wasserstoff (Errichtung eigener Infrastrukturanlagen)	

INPUTDATEN *	Solobusse	Gelenkbusse
Anschaffungskosten 2030 ONC	494.619 €	673.004 €
Anschaffungskosten 2030 OPC+supercaps	432.668 €	615.337 €
Anschaffungskosten 2030 OPC+batteries	540.859 €	726.074 €
Anschaffungskosten 2030 FC-REX	485.910 €	682.295 €
Anschaffungskosten 2030 FC	467.837 €	648.349 €
Anschaffungskosten 2030 Diesel	376.319 €	478.075 €

* Werte auf Basis von Prognosen bzw. Annahmen.

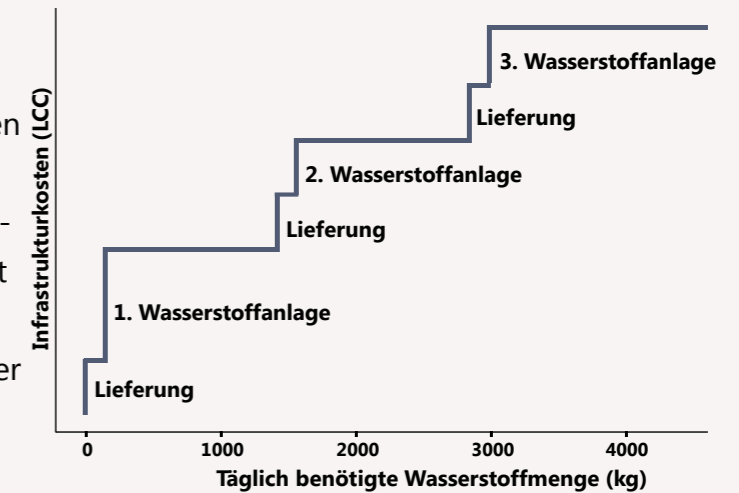


Infrastruktur	
Kosten Ladeinfrastruktur	beide abhängig von Anzahl Busse
Kosten H2-Betankungsanlage	>> sprungfixe Kosten (abhängig)
Strompreis *	0,098 - 0,145 €/kWh
H ₂ -Herstellungskosten	3,44 €/kg
Dieselpreis *	1,78 - 2,28 €/l

* zeitliche Entwicklung (z.B. Inflation, Annahmen bzgl. CO₂-Preis) inkludiert, nicht abgezinst

Sprungfixe Kosten:

Je nach Anzahl der Busse der jeweiligen Technologie und der entsprechenden Ausbaustufe der Ladeinfrastruktur steigen die Infrastrukturkosten sprunghaft in Stufen an. Die Berechnung von gemittelten Kosten pro Fahrzeug ist daher wenig sinnvoll.



REFERENZSZENARIO	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl Busse (= aktuelle Anzahl Dieselbusse)	65	95
	+ 10 % Reserve* (= 16 Busse)	

*10 % Reserve u.a. für zusätzlich notwendige Busse aufgrund von Schulungen, Defekten, Reparaturen und Wartungen. Die Reserve i.H.v. 10 % wurde auf Basis der VDV Vorschrift angenommen. Aktuelle Erfahrungen aus der DACH-Region zeigen jedoch, dass derzeit mit höheren notwendigen Reserven gerechnet werden muss.

Projektplanung | WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG

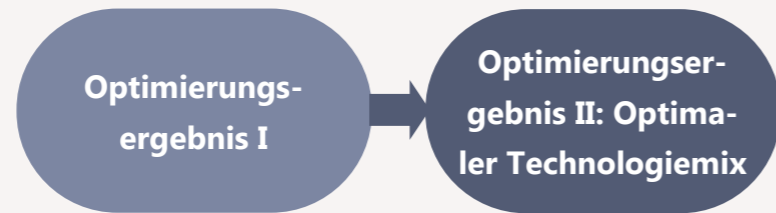
	Diesel	ONC	FC-REX	FC
	Referenz			
FLOTTENGRÖßE	160 +10% Reserve	176 +10% Reserve	160 +10% Reserve	160 +10% Reserve
12-Meter-Busse	65 Busse	71 Busse	65 Busse	65 Busse
18-Meter-Busse	95 Busse	105 Busse	95 Busse	95 Busse
BUSFLOTTE	213.836.777 €	354.088.133 €	341.443.440 €	345.569.560 €
Anschaffungs-, Wartungs- & Ersatzkosten (für 20 Jahre)				
BUSBETRIEB	737.520.408 €	632.684.008 €	645.995.941 €	647.436.231 €
Energiekosten	134.302.393 €	25.555.885 €	42.777.926 €	44.218.216 €
Fahrpersonal	562.486.754 €	565.718.008 €	562.486.754 €	562.486.754 €
Werkstattpersonal	40.731.261 €	41.410.115 €	40.731.261 €	40.731.261 €
INFRASTRUKTUR	0 €	30.452.032 €	76.523.986 €	61.656.563 €
Infrastruktur entlang d. Linie	0 €	0 €	0 €	0 €
Infrastruktur Depot	0 €	16.262.779 €	15.269.578 €	7.793.932 €
Werkstattinfrastruktur H ₂	0 €	0 €	53.233.597 €	53.233.597 €
Werkstattinfrastruktur Elektro	0 €	14.189.253 €	8.020.811 €	629.034 €
SUMME	951.357.185 €	1.017.224.173 €	1.063.963.367 €	1.054.662.354 €



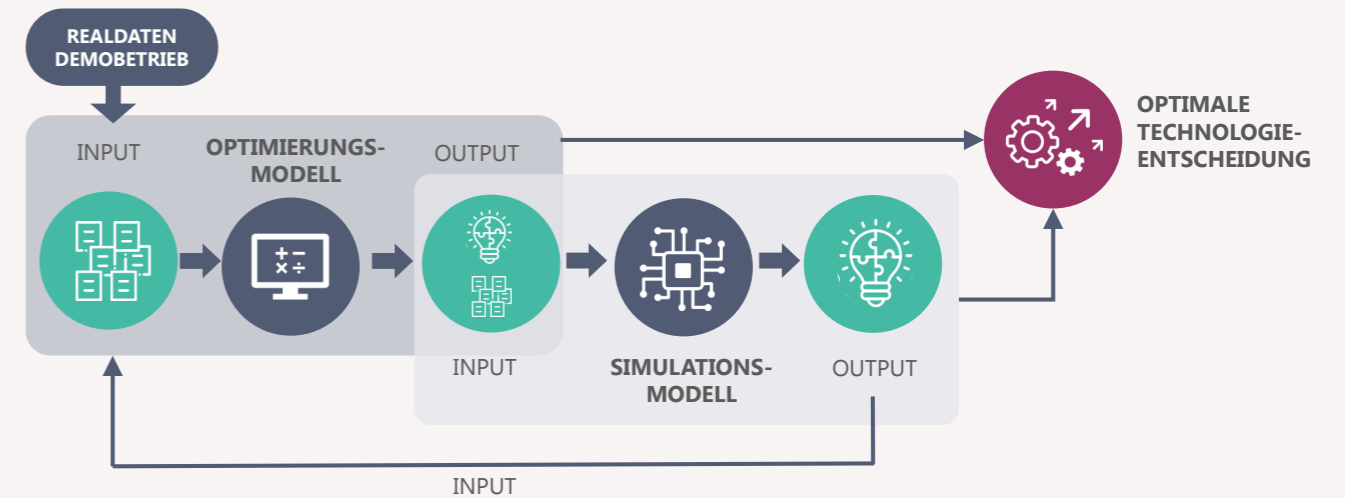
OPC + supercaps und **OPC + batteries** sind in dieser Darstellung zum Technologievergleich nicht angeführt, da beide Technologien für jeweils 11 Buslinien in Graz nicht umsetzbar sind. Grund dafür sind die Linienführungen (Haltestellen) an welchen die Errichtung von Ladeinfrastruktur nicht möglich ist (z.B. aufgrund von Altstadtsschutzzonen). Beide Technologien werden jedoch für die Berechnung des optimalen Technologie-Mix (nächste Seite) berücksichtigt.



Die 10 % Bus-Reserve ist in allen Werten berücksichtigt.



	Optimierungsergebnis I	Optimierungsergebnis II: Optimaler Technologiemitmix
FLOTTENGRÖßE	179 +10% Reserve	176 +10% Reserve
12-Meter-Busse	ONC: 61 / OPC+SC: 13	71 ONC Busse
18-Meter-Busse	ONC: 54 / OPC+SC: 51	105 ONC Busse
BUSFLOTTE	332.291.662 €	354.088.133 €
Anschaffungs-, Wartungs- & Ersatzkosten (für 20 Jahre)		
BUSBETRIEB	628.882.846 €	632.684.008 €
Energiekosten	25.052.797 €	25.555.885 €
Fahrpersonal	561.741.080 €	565.718.008 €
Werkstattpersonal	42.088.969 €	41.410.115 €
INFRASTRUKTUR	47.333.581 €	30.452.032 €
Infrastruktur entlang d. Linie	23.607.232 €	0 €
Infrastruktur Depot	10.390.109 €	16.262.779 €
Werkstattinfrastruktur H ₂	0 €	0 €
Werkstattinfrastruktur Elektro	13.336.240 €	14.189.253 €
SUMME	1.008.508.089 €	1.017.224.173 €



Optimierungsergebnis I: Erstes Ergebnis aus der Berechnung des Optimierungsmodells auf Basis der Annahmen welche zum Teil auf den vorangegangenen Seiten dargestellt sind. In diesem Optimierungsergebnis kommt ein Technologiemitmix von 115 ONC- und 64 OPC+Supercap-Bussen raus.

Simulationsmodell: Mit einem dynamischen Simulationsmodell, in welchem reale Daten wie z.B. Staudaten und Bus-Verspätungen eingeflossen sind, wurden die Umlaufpläne aus dem Optimierungsergebnis 1 in einem realitätsnahen Szenario simuliert. Das Ergebnis der Simulation zeigte, dass OPC+supercaps keine robuste Technologie darstellt und es vermehrt zu Fahrzeugausfällen kommen kann. Darüber hinaus sind OPC + Supercap Busse aktuell nicht in entsprechender Form am Markt verfügbar. Aus diesen Gründen wurde eine wiederholte Optimierungsrechnung ohne OPC+supercaps als Technologie-Option durchgeführt.

Optimierungsergebnis II - Optimaler Technologiemitmix für Graz: Im Endergebnis zeigt sich, dass für Graz der vollständige Einsatz von ONC Bussen als die kostenoptimale Technologie hervorgeht. Für die Ausführung werden dabei 71 Solobusse und 105 Gelenkbusse - ergibt in Summe 176 Busse - benötigt.

Förderungs- und Finanzierungsoptionen

Wie in der Wirtschaftlichkeitsanalyse gezeigt, ist die Umstellung von Dieselbetrieben auf emissionsfreie Fahrzeuge derzeit und auch in näherer Zukunft mit Mehrkosten in Bezug auf Anschaffungskosten verbunden. Um diese zu verringern, können verschiedene Förderungen für die erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur in Anspruch genommen werden.



(1) Förderungen: EU-Ebene

- **ELENA:** Förderung von Projektvorbereitungskosten wie Machbarkeitsstudien und Planungsprozesse.
- **Clean Hydrogen Joint Undertaking (CH JU)** - Förderung für Forschungs- und Innovationsaktivitäten im Bereich von Wasserstofftechnologien
- **Connected, Cooperative and Automated Mobility (CCAM)** - Förderung von Forschungs- und Innovationsaktivitäten im Rahmen vom Horizon Europe Programm



(2) Förderungen: Österreich

Nationale Förderungen

- **EBIN:** Förderung von Anschaffungskosten für emissionsfreie Busse und Lade- sowie Tankinfrastruktur.
- **Zero Emission Mobility:** Förderung von Forschungs- und Demonstrationsprojekten im Bereich emissionsfreie Mobilität & Energie.
- **Smart Cities Demo:** Förderung von großen Demonstrationsprojekten und Smart Cities Aktivitäten.

Regionale/lokale Förderungen

- Regionale Förderung PV-Anlagen
- Regionale Zuschüsse für nachhaltiges Bauen
- Klimapartnerschaften (BMK)



(1) + (2) Relevante Websites zu verfügbaren Förderungen

- [Förderkompass](#) mit Informationen zu EU-/Bundes- und Landesförderungen im Bereich der Forschung
- [Horizon Europe Ausschreibungen](#)
- [Förderungen des BMK](#) im Bereich Elektromobilität
- [Klima- und Energiefonds](#)
- [Ausschreibungen der FFG](#)
- Kommunalkredit Public Consulting: [Förderungen](#) und [Finanzierung](#), u.a. von Infrastrukturprojekten



(3) Alternative Finanzierungsmodelle

- Public-Private-Partnerships
- EIB-Kredite für Infrastrukturprojekte / ÖV-Ausbau
- Kommunalkredit Direkt— Finanzierung von Infrastrukturprojekten
- Förderung durch Gebietskörperschaften

Nachfolgend werden mögliche Finanzierungs- und Förderoptionen aufgelistet, unterteilt nach (1) Förderungen auf EU-Ebene, (2) Förderungen in Österreich inkl. Relevanter Websites für diese Förderungen, sowie (3) Optionen für alternative Finanzierungsmodelle, bei denen es sich vor allem um Kredite speziell für Infrastrukturprojekte handelt.

Klimawirkungen

Kapitel 05 befasst sich mit den Klimawirkungen der Dekarbonisierung und zielt auf folgende Fragen ab:

- Welche Ökodesign-Kriterien sollten in den Ausschreibungsprozessen mitberücksichtigt werden?
- Wie schneiden die unterschiedlichen emissionsfreien Technologien in der Treibhausgas-Bilanzierung ab?



05

Öko-Design Kriterien für emissionsfreie Busse

Für alle Berechnungen und Bewertungen im vorliegenden Leitfaden werden für den Betrieb der Busse ausschließlich erneuerbaren Energiequellen eingesetzt. Dies ist wesentlich um die größtmöglichen Vorteile in den Umweltauswirkungen des lokal emissionsfreien städtischen Bussystems abzubilden. Wird ausschließlich erneuerbare Energie eingesetzt so resultieren die Umweltauswirkungen der Busse aus der Rohstoffgewinnung, dem Herstellungsprozess und der Entsorgung an deren Lebensende. Daher ist es wichtig, ökologische Produktgestaltung über den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen. Im Beschaffungsprozess sollten umweltfreundliche Busse und Infrastrukturkomponenten priorisiert werden. Auch die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards während der Herstellung ist entscheidend. Anforderungen an die Busproduzenten bezüglich Ökodesign sollten im Ausschreibungsprozess festgelegt werden.

Mögliche Fragestellungen an die Bushersteller zur Beurteilung der Nachhaltigkeit

✓ Hat der Erstausrüster ein betriebliches zertifiziertes Umweltmanagementsystem?

Mögliche Zertifizierungen:

- Zertifizierung nach ISO 14001
- Zertifizierung nach EMAS

✓ Werden umweltrelevante Informationen über das Fahrzeug bereitgestellt?

Mögliche Unterlagen:

- Life Cycle Assessment gemäß ISO 14040/44-2006
- Environmental Product Declaration (EPD) gemäß ISO 14025-2006

✓ Welche Kältemittel kommen in den Fahrzeugen zum Einsatz?

- Anzustreben sind Kältemittel mit geringem Global Warming Potential (GWP), wie beispielsweise die Kühlung mittels CO₂ (GWP 1).

Die Bewertung der übermittelten Informationen der Hersteller kann mithilfe eines Punktesystems erfolgen.



Ein Beispiel für ein System zur Punktevergabe findet sich im Dokument [Bewertungsmethodik Lastenheft](#).

Da der Umfang der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Informationen stark schwankt, kann es sinnvoll sein, eine Kombination aus qualitativer Bewertung und Punktevergabe zu verwenden. Dabei werden für bestimmte Kriterien des Lastenhefts, bei denen die Rückmeldungen klar bewertbar sind, Punkte vergeben und für wenig leicht bewertbare Informationen qualitative Beschreibungen ergänzt (z.B. zu Nachhaltigkeitsinitiativen in der Beschaffung).

✓ Werden Maßnahmen zur Forcierung von Kreislaufwirtschaft gesetzt?

Relevante Angaben:

- wiederverwertbare Bauteile in Massenprozent bezogen auf das Leergewicht
- Angaben über die Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen
- Information über die Rezyklierbarkeit, Verwertbarkeit und Demontage von Bauteilen und Komponenten der Fahrzeuge
- Erklärung dass alle Produkte, Bauteile oder Komponenten frei von besorgniserregenden Stoffen (Substances of Very High Concern, SVHCs gemäß der REACH-Verordnung) sind.

✓ Wie werden Umwelt- & Nachhaltigkeitsstandards in der Lieferkette überwacht?

Relevante Angaben:

- Informationen über Initiativen zur nachhaltigen Materialbeschaffung in der Lieferkette
- Informationen über Initiativen zum nachhaltigen Abbau von Erzen über die gesamte Lieferkette (z.B. Cobalt Initiative for Sustainable Mining)

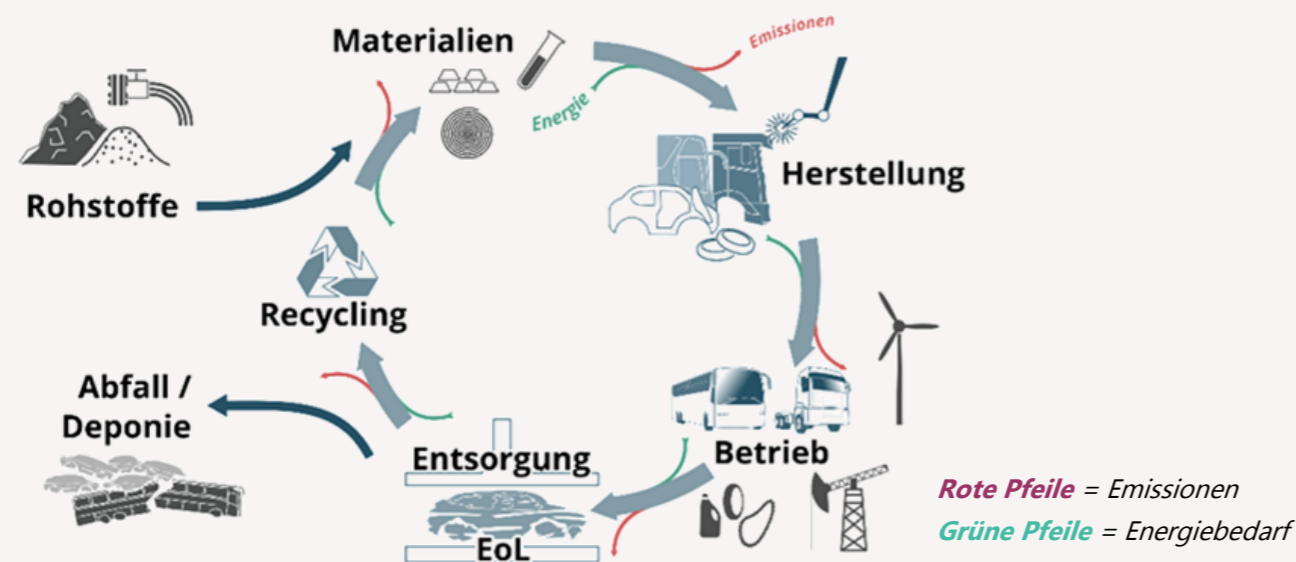
Treibhausgasemissionen

Die wesentliche Ursache für vermehrt auftretende Wetteranomalien und Extremwetterereignisse sind laut einer überwiegenden Mehrzahl der Wissenschaftler:innen die vom Menschen verursachten Emissionen von Treibhausgasen (THG). Der Verkehrssektor war dabei im Jahr 2022 in Österreich mit knapp 30% der Sektor mit den zweithöchsten THG-Emissionen (nach Energie- und Industrie) ^{#18}. Obwohl der ÖV im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr jene Variante mit den geringeren THG-Emissionen ist, hat die Dekarbonisierung von Busflotten großes Potential hinsichtlich der Gesamtemissionen.

Wie kann entschieden werden, welche Art von Bussen für den Anspruch, THG-Emissionen zu minimieren, am besten geeignet ist?

Die Betrachtung auf die lokalen bzw. direkten Emissionen zu beschränken, ist hier nicht ausreichend, da im Betrieb von Batterieelektrischen- und Brennstoffzellen-Bussen keinerlei Verbrennungsemissionen anfallen. Für einen fundierten Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien wird deshalb üblicherweise eine sogenannte Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt, die auch die bei der Herstellung, Wartung und Entsorgung der Busse sowie bei der Bereitstellung der Antriebsenergie anfallenden THG-Emissionen betrachtet (siehe nachfolgende Abbildung).

Lebenszyklus eines Busses

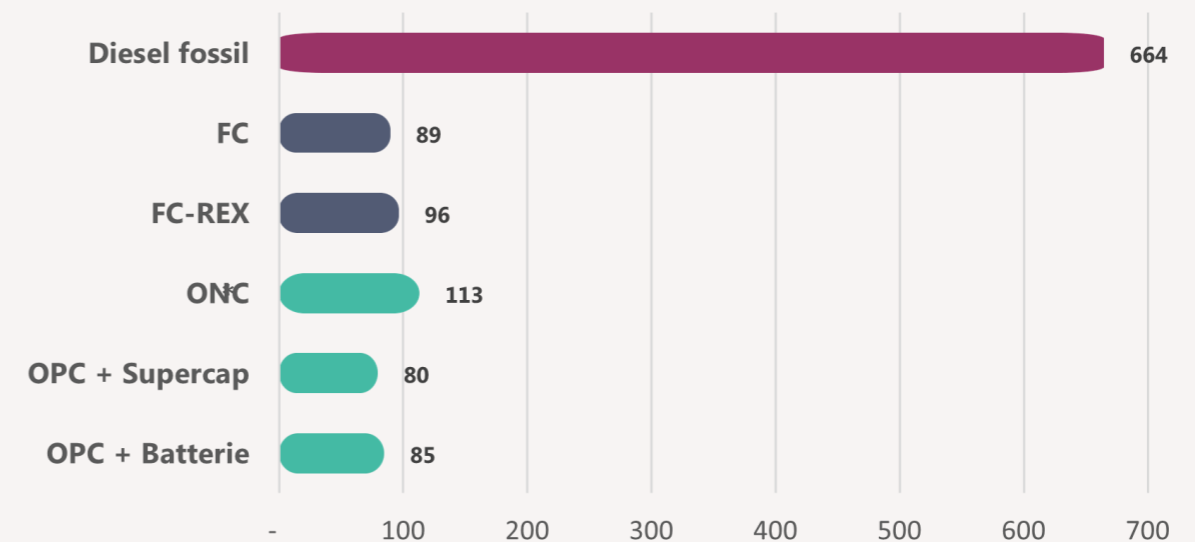


Werden die gesamten Lebenszyklusemissionen eines 12m Busses berechnet, zeigen sich bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 10 Jahren deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Antriebssystemen (Abbildung 2). Dabei ist es nicht überraschend, dass die größten THG-Emissionen mit 664 Tonnen CO₂eq vom fossilen Dieselbus verursacht werden. Die Lebenszyklus-THG-Emissionen der alternativen Busse (batterieelektrischer Bus bei Gelegenheitsladung und Brennstoffzellenbus) mit 80 bis 96 Tonnen sind recht ähnlich. Die Emissionen des batterieelektrischen Busses bei Depotladung liegen ~15-30% höher als die des batterieelektrischen Busses bei Gelegenheitsladung und jene des Brennstoffzellenbusses ^{#19}.

Zentrale Annahmen für die Berechnung: In den Berechnungen wurde angenommen, dass ausschließlich erneuerbarer Strom eingesetzt wird. Für alle Busse wurde eine jährliche Fahrleistung von 60.000 km auf 10 Jahre angenommen. Beim ONC wurde ein Akkutausch (500 kWh NMC-Akku) nach 8 Jahren berücksichtigt und anteilmäßig bei den Lebenszyklustreibhausgasemissionen für 10 Jahre aufgeschlagen.

Hinweis: Im Vergleich der einzelnen Busse ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Busse für die Bedienung des gesamten Liniengebietes je Technologie variiert.

Lebenszyklusemissionen eines 12m-Busses über 10 Jahre in Tonnen CO₂eq



Detaillierte Beschreibung der Antriebsarten: siehe Kap. 3.1

* Annahme: Batterietausch nach 8 Jahren

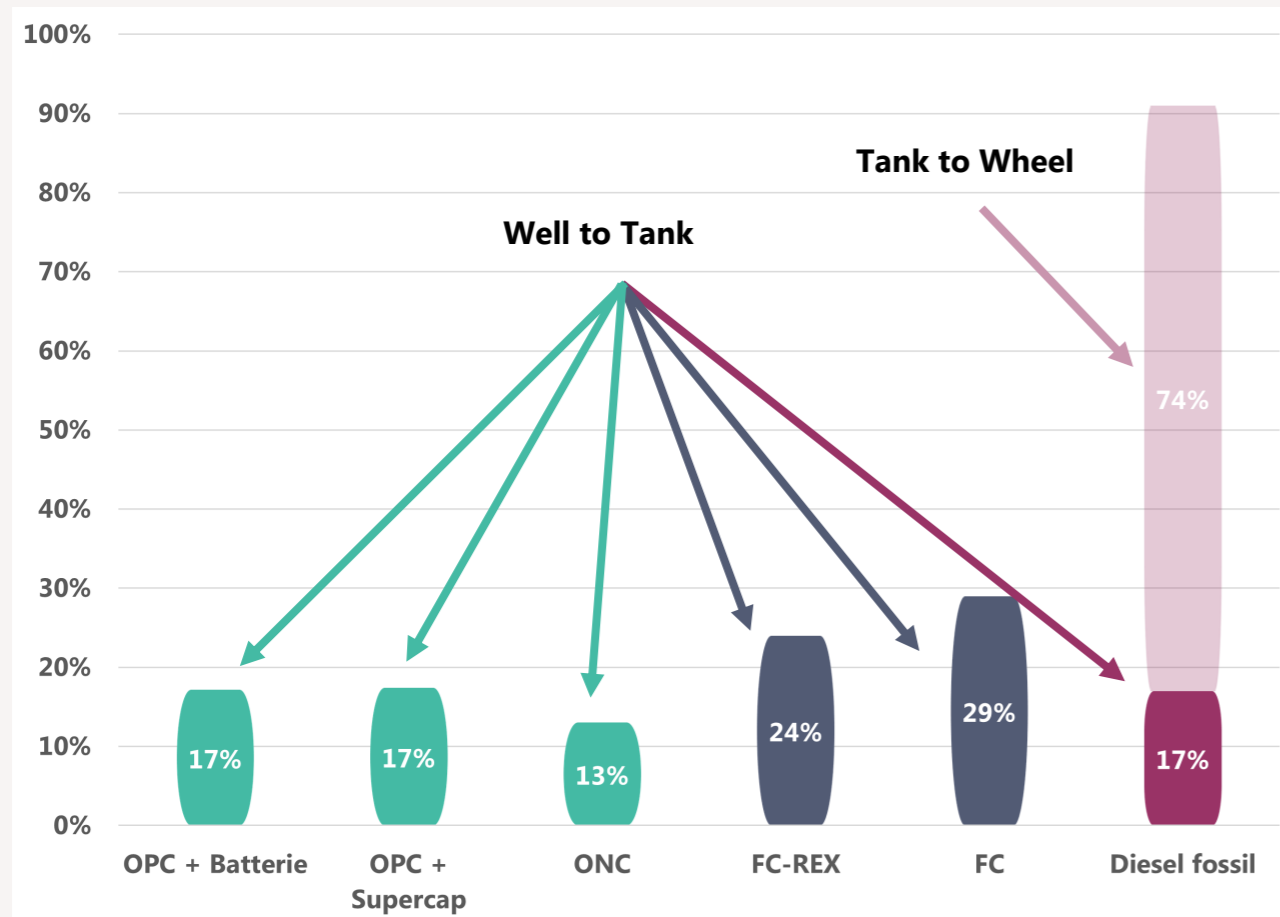


Klimawirkungen | LEBENSZYKLUSANALYSE

Bei den alternativen Antriebssystemen ist die Herstellung der Busse für den Großteil der Lebenszyklus-THG-Emissionen verantwortlich. So entstehen z.B. bis zu 87% der Lebenszyklus-THG-Emissionen bei der Produktion eines batterieelektrischen Busses (Depotladung), sofern ausschließliche erneuerbarer Strom für den Antrieb genutzt wird.

Die nachstehende Abbildung illustriert einerseits die vorgelagerten Emissionen der Busse („Well-to-Tank“), die im Rahmen der Energieerzeugung – von der Rohstoffgewinnung für die Energieerzeugung bis hin zum Transport und der Verteilung der Energie – anfallen. Andererseits werden die direkten Emissionen („Tank-to-Wheel“), die während des Fahrbetriebs entstehen, dargestellt. Alle elektrifizierten Antriebe, einschließlich der Brennstoffzellentechnologie, weisen in diesem Bereich keine Emissionen auf.

Anteil der Well-to-Tank und Tank-to-Wheel Emissionen im Vergleich zu den gesamten Lebenszyklusemissionen eines Busses



Fazit & weiterführende Links



06



FAZIT

Der Leitfaden stellt ein ganzheitliches und detailliertes Instrument dar, das Städten und Verkehrsdienstleistern ermöglicht, die Dekarbonisierung ihrer Busflotten zielgerichtet und effektiv voranzutreiben. Dies wird einerseits durch die rechtlichen Vorgaben der CVD-Richtlinie untermauert, die klare Beschaffungsquoten für saubere und emissionsfreie Busse festlegt. Andererseits trägt die Umstellung auf eine emissionsfreie Busflotte zu signifikanten lokalen Verbesserungen bei, darunter eine bessere Luftqualität, geringere Lärmbelastung, Vorreiterrolle im Klimaschutz, Stärkung der lokalen Wirtschaft und Erhöhung der Energieunabhängigkeit.

Für die erfolgreiche Einführung von emissionsfreien Bussen ist eine an die vorherrschenden Rahmenbedingungen angepasste Umsetzung notwendig. Eine umfassende Bestandsaufnahme sowie die Definition der vorherrschenden Anforderungen an das emissionsfreie Bussystem ist dabei von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus ist es wichtig, alle relevanten Stakeholder wie z.B. Fahrzeughersteller, Energieversorger, Stadtverwaltungen und die Öffentlichkeit frühzeitig und kontinuierlich miteinzubeziehen.

Der Hauptteil des Leitfadens umfasst folgende Ergebnisse:

- **Technologieauswahl:** eine sorgfältige, den vorab definierten Anforderungen entsprechende Auswahl der emissionsfreien Antriebstechnologie ist essenziell. Sowohl batterieelektrische als auch wasserstoffbetriebene Busse haben spezifische Vor- und Nachteile, die im Kontext der lokalen Infrastruktur, Topographie und Betriebsanforderungen abgewogen werden müssen.
- **Infrastrukturaufbau:** Ein zentraler Aspekt ist der Aufbau einer adäquaten Lade- und Tankinfrastruktur. Für batterieelektrische Busse können sowohl zentrale als auch dezentrale Lademöglichkeiten geschaffen werden, während für wasserstoffbetriebene Busse eine passende Tankinfrastruktur und Wasserstoffversorgung etabliert werden muss.
- **Betriebliche Anpassungen:** Die Integration emissionsfreier Busse erforderte erhebliche betriebliche Anpassungen, insbesondere hinsichtlich der Umlauf- und Einsatzplanung. Intelligente und automatisierte Lade- und Betankungskonzepte sollten frühzeitig konzipiert und in allen Bereichen der Planung mitberücksichtigt werden.

Der Leitfaden unterstreicht die Bedeutung der Berücksichtigung von Energieeffizienz und -management in allen Phasen der Umstellung.

- **Prozessplanung und Wirtschaftlichkeit:** In der Projektplanung wurde ein detaillierter Fahrplan entwickelt, der die notwendigen Schritte, Meilensteine und Ressourcen definiert, um die Dekarbonisierungsziele zu erreichen. Die sorgfältige Ressourcenplanung gewährleistet, dass alle materiellen, finanziellen und personellen Kapazitäten optimal eingesetzt und mögliche Risiken minimiert werden. Die wirtschaftliche Vergleichsrechnung der unterschiedlichen Technologien ist ein wesentlicher Teil des Dekarbonisierungsprojektes und zentraler Aspekt des Optimierungsmodells als Basis für die optimale Technologieentscheidung.
- **Klimawirkung:** Die Untersuchung der Klimawirkung hebt die Bedeutung der Dekarbonisierung hervor, indem sie dessen Potenzial zur Verringerung von Treibhausgasemissionen und zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung aufzeigt. Diese Analyse unterstreicht die Rolle innovativer Technologien und Ansätze bei der Bewältigung der Klimakrise und betont die Notwendigkeit, umweltfreundliche Lösungen in den Vordergrund zu stellen.

Der vorliegende Leitfaden zur Dekarbonisierung städtischer Busflotten bietet somit eine umfassende Strategie zum emissionsfreien Betrieb von Bussen und hat das übergeordnete Ziel, den öffentlichen Verkehr nachhaltiger zu gestalten. Der Leitfaden dient dadurch als wichtige Ressource für Städte und Verkehrsbetriebe, die den Übergang zu einer umweltfreundlichen Mobilität anstreben.



LITERATURVERZEICHNIS

- #1 <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>
- #2 <https://unfccc.int/node/28581>
- #3 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/europaeische-energie-klimaziele#zielvereinbarungen>
- #4 Gemäß aktuellem Entwurf der europäischen Kommission vom 06.02.2024, siehe auch https://emis.vito.be/sites/emis/files/articles/91/2024/Factsheet_Europe_s_2040_climate_pathway_en.pdf.pdf
- #5 Bundeskanzleramt (2020). Österreich und die Agenda 2030 - Freiwilliger Nationaler Bericht zur Umsetzung der Nachhaltigen Entwicklungsziele / SDGs (FNU)
- #6 <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/clean-and-sustainable-mobility/>
- #7 <https://www.parlament.gv.at/gegenstand/XXVII/ME/118>
- #8 <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010295>
- #9 <https://fdoc.ffg.at/s/vdb/public/node/content/5qeNs234RqSvYzx-nE4Afw/1.0?a=true#:~:text=Ziel%20des%20F%C3%B6rderprogramms%20ist%20es,und%20Betankungsinfrastruktur%20bis%20Mitte%202026.>
- #10 https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Leitfaden-fuer-Busse-mit-alternativen-Antrieben_NOW.pdf
- #11 NOW GmbH (2021). Abschlussbericht: Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge - Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV, Berlin.
- #12 NOW GmbH (2021). Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben, Berlin.
- #13 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L._2023.157.01.0020.01.ENG&toc=OJ%3AL%3A2023%3A157%3ATOC
- #14 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle>
- #15 <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>
- #16 VDE Renewables GmbH (2023). Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen, Grundsatzstudie, Alzenau.
- #17 VDE Renewables GmbH (2023). Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen, Grundsatzstudie, Alzenau.
- #18 <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase#:~:text=Die%20gr%C3%B6%C3%9Ften%20Verursacher%20der%20THG,Tonnen%20CO2%2D%C3%84quivalent.>
- #19 eigene Berechnungen Umweltbundesamt basierend auf ecoinvent, GREET, Herstellerangaben und GEMIS



WEITERFÜHRENDE LINKS

- **Move2zero Projektwebsite**
 - Ziel des Leitprojektes „move2zero“ ist die vollständige Dekarbonisierung der städtischen Busflotte und die Einführung bedarfsabhängiger Shuttles als Ergänzung zum klassischen Linienverkehr. Der vorliegende Leitfaden ist ein wesentliches Ergebnis dieses Forschungsprojektes.
 - **Link:** <https://www.move2zero.at/>
- **E-Bus-Tool**
 - Online-Entscheidungshilfe für Verkehrsunternehmen für die Auswahl von Bussen mit alternativen Antrieben unter Berücksichtigung der konkreten spezifischen Einsatzbedingungen vor Ort.
 - **Link:** [https:// www.ebustool.de](https://www.ebustool.de)